



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

**EVALUACIÓN Y ZONIFICACIÓN PRELIMINAR DEL PELIGRO VOLCÁNICO DEL VOLCÁN TACORA,
XV REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA, ANDES CENTRALES DEL NORTE DE CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

JOSÉ ARTURO BARRIENTOS COLLAO

PROFESOR GUÍA
ANGELO CASTRUCCIO ALVAREZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
ALVARO AMIGO RAMOS
DIEGO GAYTÁN BAHAMONDEZ

SANTIAGO DE CHILE
JUNIO, 2013

RESUMEN

En el presente trabajo se evalúan y zonifican los peligros volcánicos del volcán Tacora.

La investigación indica que el volcán Tacora tiene una historia eruptiva explosiva más reciente a la documentada, pues se encontró un depósito de flujo piroclástico estimado en edad menor a 20 ka. No se encontraron depósitos de caída piroclástica, por lo tanto, en la actualidad, presenta una baja probabilidad de tener una erupción explosiva de gran magnitud ($VEI > 4$).

Para realizar la zonificación del peligro volcánico se modelaron los eventos volcánicos que se considera pueden causar mayor daño: lahares, flujos de densidad piroclástica, avalanchas volcánicas y caída de piroclastos, sobre la base de datos estadísticos globales y con diferentes metodologías apropiadas para cada caso. Para la modelación de flujos piroclásticos y avalanchas volcánicas se utilizó el método del cono de energía implementado a través del modelo computacional LAHARZ. Para modelar la caída piroclástica se utilizó el modelo Tephra2, al que se ingresaron datos de viento extraídos del National Oceanic and Atmospheric Administration (Re-análisis del NOAA), además de estimaciones de masa emitida en dos escenarios eruptivos y datos topográficos.

La modelación de lahares señala que ante la eventual ocurrencia de este proceso volcánico y debido a la topografía del sector, las zonas que revisten mayor peligro se encuentran ubicadas hacia el NE y W del volcán, asociadas a las estaciones de mayor acumulación de nieve (invierno y verano).

Según los resultados obtenidos, de producirse un evento explosivo, las zonas impactadas por los flujos piroclásticos y avalanchas volcánicas cubrirían un radio aproximado de 12 km siendo el sector N-NW el menos afectado, protegido por altos topográficos.

La caída de piroclastos, dependiente de la dirección y velocidad del viento, afectaría mayoritariamente el sector Este del volcán en invierno, en otoño y en primavera, aunque no de forma tan clara en las dos últimas estaciones. En verano la caída de piroclastos podría afectar en todas las direcciones.

Ante la instalación de una planta geotérmica se recomienda monitoreo de microsismicidad y de gases en fumarolas, levantar protecciones y construir canales para el desvío de posibles lahares.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Serviland Minergy e Infinergeo SpA por financiar y hacer posible la realización de este trabajo. A Diego Gaytán por su empatía en situaciones difíciles y su apoyo. A Alejandro Arriagada por su buena disposición y por agilizar la compra de computadores que fueron de gran ayuda.

Al Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), Proyecto FONDAP N°15090013, financiado por la Comisión Nacional de Ciencia y Tecnología (CONYCT), por promover las instancias de generación y capacitación de capital humano ligado a la geotermia.

Mis más sinceros agradecimientos a los profesores miembros de la comisión examinadora por sus oportunos comentarios y correcciones, las cuales permitieron mejorar sustancialmente el borrador y mapa originales. A Angelo Castruccio, mi profesor guía, por acompañarme a terreno, por sus críticas y por responder mis inquietudes y consultas. A Alvaro Amigo por su gran ayuda y buena disposición a pesar de lo limitado de su tiempo.

A los geólogos Daniel Bertín y Marcelo García, por sus comentarios y correcciones que aportaron y facilitaron este estudio.

A los profesores del Departamento de Geología de la Universidad de Chile, por compartir sus enseñanzas y experiencias profesionales.

A María Rosa y a Blanca, pues sin su ayuda y sonrisa amable, estaría aun perdido entre trámites y papeles.

A mis compañeros de carrera especialmente a Yerko, Chicho, Xuxú, Mary y Marcela quienes con su compañía, hicieron de mi paso por esta facultad una gran experiencia. Juntos recorrimos un gran camino en terreno, congresos y en el patio de los naranjos. A mis compañeros en Serviland Carter, Pelao, Guga y Paulina, por su compañía y ayuda.

A mi familia por apoyarme en todo este largo proceso y por confiar siempre en mí. A mis padres por todo su amor, preocupación y dedicación, y por guiarme siempre por el camino del trabajo, la constancia, la responsabilidad, los valores y la libertad. A mi hermana por su cariño, compañía y apoyo. Muchas gracias a mi tía Mary por su gran ayuda y buena voluntad. A mis primos, a mis tíos y tías y a mis padrinos por su cariño.

A mis amigos de la vida Rodrigo, Julio, Lautaro, Akagui, Flayo, Felipe y Fernanda por su amistad, compañía y buenos momentos y soportarme durante tantos años.

Finalmente, a María Jesús por todo su amor, ayuda, comprensión y compañía.

TABLA DE CONTENIDO

1.	Introducción	1
1.1.	Formulación del problema	1
1.2.	Objetivos	6
1.2.1.	Objetivo General	6
1.2.2.	Objetivos Específicos	6
1.3.	Estudios Anteriores	7
1.3.1.	Fumarolas	7
1.3.2.	Fumarolas y microsismicidad	7
1.3.3.	Actividad histórica	7
1.4.	Ubicación y acceso	8
1.5.	Metodología de Trabajo	9
1.5.1.	Etapas en gabinete previo a campañas en terreno	9
1.5.2.	Etapas de terreno	9
1.5.3.	Etapas de análisis	11
1.5.4.	Método Datación de Ar- Ar StepHeating	12
1.5.5.	Modelos computacionales utilizados	13
1.5.5.1.	Modelos de elevación digital	13
1.5.5.2.	LAHARZ	13
1.5.5.3.	Tephra2	15
1.5.6.	Método del Cono de Energía para modelar flujos piroclásticos y avalanchas volcánicas.	17
1.5.7.	Método de modelación de flujos piroclásticos y avalanchas volcánicas con LAHARZ	18
1.5.8.	Método de modelación de lahares con LAHARZ	19
2.	Marco Geológico	20
2.1.	Marco Geotectónico	20
2.1.1.	La Zona Volcánica Central (ZVC)	20
2.2.	Basamento del volcán	22
2.3.	Geología de volcán Tacora Pv(a), Pv(d) (Pleistoceno)	25
2.3.1.	Depósitos glaciares Qg (Pleistoceno Superior)	26
3.	Características físicas de los depósitos	27
3.1.	Levantamiento geológico de terreno	27
3.1.1.	Depósitos de flujos piroclásticos	28
3.1.2.	Depósitos de avalancha volcánica	30
3.1.3.	Depósitos laháricos	32

3.1.4.	Domo Dacítico	33
3.1.5.	Lavas.....	34
3.2.	Petrografía.....	36
3.2.1.	Petrografía Macroscópica y Microscópica	36
3.2.1.1.	Depósitos de flujo piroclástico	36
3.2.1.2.	Lavas.....	37
3.2.1.3.	Domo.....	38
3.3.	Geoquímica	39
3.3.1.	Resultados Elementos Mayores	39
3.3.2.	Resultados de Elementos Trazas: Tierras Raras	41
3.3.3.	Resultados otros Elementos Trazas	43
4.	Resultados y análisis de dataciones	44
5.	Modelación y resultados	46
5.1.	Modelación y resultados de flujos piroclásticos y avalanchas volcánicas	46
5.1.1.	Escenarios eruptivos para flujos piroclásticos	46
5.1.2.	Escenarios para la generación de avalanchas volcánicas	48
5.1.3.	Resultados de la modelación de flujos piroclásticos y avalanchas volcánicas	51
5.2.	Modelación de lahares	53
5.2.1.	Escenarios y simulaciones para los lahares	53
5.2.2.	Resultados de la modelación de lahares	55
5.3.	Modelación de caída de piroclastos.....	57
5.3.1.	Escenarios eruptivos	57
5.3.2.	Creación de mapas probabilísticos	58
5.3.3.	Resultados de la modelación de caída de piroclastos	60
6.	DISCUSIÓN.....	66
6.1.	Eventos eruptivos del volcán Tacora.....	66
6.2.	Aplicabilidad y limitaciones de modelos	67
6.2.1.	LAHARZ.....	67
6.2.2.	Tephra2.....	70
6.3.	Ocurrencia de lahares.....	70
6.4.	Ocurrencia de flujos de lavas	71
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	72
	REFERENCIAS.....	76

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Pérdida de vidas humanas (y porcentajes) como consecuencia de la actividad volcánica en el período 1600- 1989, agrupadas según la causa de muerte (modificado de Tilling, 1989).	2
Tabla 2. Resultados Geoquímica de Elementos Mayores, normalizado	40
Tabla 3. Resultados Geoquímica de tierras raras , normalizados al condrito	42
Tabla 4. Resultados Geoquímica de elementos trazas, normalizados al condrito	43
Tabla 5. Resultados entregados en de dataciones realizadas en el laboratorio de geocronología del SERNAGEOMIN.	44
Tabla 6. Resultados de simulaciones de volúmenes iniciales de lahares	54
Tabla 7. Escenarios eruptivos para la modelación de caída de piroclastos.....	57
Tabla 8. Comparación del volcán Tacora con volcán Láscar (Gardeweg y Medina 1994; Gardeweg <i>et al.</i> , 2004).	68

ÍNDICE DE FÍGURAS

Figura 1. Número promedio de “eventos catastróficos” registrados por año en el mundo	3
Figura 2. Rectángulo de concesión volcán Tacora.....	5
Figura 3. Ubicación y accesos.	8
Figura 4. Ubicación de muestras para la zona de estudio.....	10
Figura 5. Ubicación de muestras enviadas a datación.	12
Figura 6. Esquema idealizado del recorrido del lahar.....	14
Figura 7. Polígono considerado para extraer los datos de topografía como entrada para el modelo Tephra2.....	16
Figura 8. Esquema del método del cono de energía.	17
Figura 9. (A) Zonas volcánicas de Los Andes. (B) Zona Volcánica Central de Los Andes. Se presentan los volcanes activos de esta zona, se destaca el volcán Tacora.	21
Figura 10. Unidades geológicas reconocidas en este estudio en el volcán Tacora.	27
Figura 11. Depósito de flujos piroclásticos al NE del volcán	28
Figura 12. Depósitos de oleada basal de un flujo piroclástico.	29
Figura 13. Depósitos de avalancha volcánica.....	30
Figura 14. Depósitos de avalancha volcánica.....	31
Figura 15. Depósito de avalancha volcánica. (a) Corte artificial que expone la base de depósito. (b) Vista panorámica de depósito de avalancha.....	31
Figura 16. Depósito de flujo de pasto y detritos. Asociado al sismo Mw 8.4 de Arequipa, Junio 2001 (Naranjo y Clavero, 2005).	32
Figura 17. Afloramiento de domo en el centro y derecha de la figura, se observa una espina característica de domos peleanos, marcado en rectángulo rojo.....	33
Figura 18. Afloramiento de domo, mirado desde el interior del cráter del volcán Tacora.	34
Figura 19. (a) Afloramiento de secuencia de lavas superiores de bloque, de 90 m de altura por 1 km de largo, (b) Afloramiento de lavas basales de bloque de 150 m de largo por 9 m de altura.	35
Figura 20. Fotomicrografía de sección transparente representativa de la muestra J13.	36
Figura 21. Fotomicrografía de sección transparente representativa de la muestra J45.	37

Figura 22. Fotomicrografía de sección transparente representativa de la muestra MG-2 (arriba) y J04 (abajo).	38
Figura 23. Diagrama de álcalis totales vs sílice con las 5 muestras analizadas.	40
Figura 24. Diagrama Spider con muestras normalizadas al condrito.....	42
Figura 25. Razón La/Yb vs Yb (ppm), con valores normalizados al condrito	42
Figura 26. Razón Sr/Y vs Y (ppm), con valores normalizados al condrito	43
Figura 27. Fotomicrografía de sección transparente representativa de la muestra J-05.	44
Figura 28. Fotomicrografía de sección transparente representativa de la muestra MG-2.	45
Figura 29. Fotomicrografía de sección transparente representativa de la muestra J10.	45
Figura 30. Comparación de depósitos de flujo piroclástico del volcán Tacora con los de la erupción del volcán Lascar de 1993.....	47
Figura 31. Mapa de clasificación de pendientes en el volcán Tacora.....	49
Figura 32. Depósito de flujo piroclástico NE, distancia recorrida, desde el vent escogido, hasta donde se encuentran depósitos de flujos piroclásticos L= 9 km y depósito de avalancha volcánica con el posible de lugar de origen hasta donde se encuentran estos depósitos L= 12.8 km.	50
Figura 33. Mapas de zonificación de flujos piroclásticos y avalanchas volcánicas mediante conos de energía.	52
Figura 34. División del área nevada, observada en imagen satelital de Enero 2006, en cuencas para la estimación de volúmenes de lahares.....	54
Figura 35. Modelo a partir de resultados de simulación de lahares en el volcán Tacora, con el programa LAHARZ	56
Figura 36. Muestra de resultados modelación en Tephra2, los días fueron escogidos para representar las direcciones de vientos.....	59
Figura 37. Modelos de espesores de depósitos de caída, en Invierno, en el escenario 1 (VEI 2-3), en la figura superior con una probabilidad de un 20% y en la inferior con una probabilidad de un 50%.	62
Figura 38. Modelos de espesores de depósitos de caída, en Verano, en el escenario 1 (VEI 2-3), en la figura superior con una probabilidad de un 20% y en la inferior con una probabilidad de un 50%.	63
Figura 39. Modelos de espesores de depósitos de caída, en Invierno, en el escenario 2 (VEI 3-4), en la figura superior con una probabilidad de un 30% y en la inferior con una probabilidad de un 50%.	64

Figura 40. Modelos de espesores de depósitos de caída, en Verano, en el escenario 2 (VEI 3-4), en la figura superior con una probabilidad de un 30% y en la inferior con una probabilidad de un 50%.
.....65

1. Introducción

1.1. Formulación del problema

Para la formulación del Proyecto de Identificación del Peligro Volcánico asociado al área del volcán Tacora, es necesario esclarecer el concepto de Peligro Volcánico. Al respecto Tilling (1989), señala que “El Peligro Volcánico es la probabilidad de que un área determinada sea afectada por procesos o productos volcánicos potencialmente destructivos en un intervalo de tiempo dado”. Dentro de éstos se encuentran gases volcánicos, lavas (coladas y domos de lava), caída de piroclastos, flujos y oleadas piroclásticas, lahares o flujo de detritos sin y post eruptivos, colapsos estructurales, terremotos volcánicos y tsunamis (Ferres, 2008).

Por otra parte la noción de riesgo volcánico, según la UNESCO (1972), es definida como el producto (Fournier d’Albe, 1979): entre el valor y la vulnerabilidad X Peligro, donde el “valor” es el número de vidas o el valor monetario de los bienes en riesgo en un área volcánica y la vulnerabilidad. Según la UNESCO (1996) puede ser de dos tipos:

- Vulnerabilidad estructural o física: describe el grado hasta el cual una estructura es susceptible de ser dañada o alterada en una situación de peligro. Corresponde a valor numérico desde 0 (no daños) hasta 100 (destrucción total).
- Vulnerabilidad humana: es la falta relativa de capacidad de una persona o comunidad para prever un peligro, hacerle frente, resistirlo y recuperarse de su impacto. Entre los factores que incrementan la vulnerabilidad humana a los desastres se encuentran la urbanización excesivamente rápida, el crecimiento demográfico, la falta de conocimientos acerca de cómo hacer frente a los efectos de los desastres, y la pobreza. De todos estos factores, es probable que la pobreza constituya el origen de la vulnerabilidad de la mayoría de la gente al impacto de la mayoría de los peligros.

En términos globales más de 1.300 volcanes han entrado en erupción durante los últimos 10.000 años; aproximadamente la mitad de éstos han tenido erupciones en tiempos históricos (Tilling, 1989). Además, casi dos tercios de los volcanes activos se ubican en o cerca de los límites de las placas tectónicas en la región circumpacífica (Tilling, 1989). Típicamente, unos 50 volcanes entran anualmente en erupción (Simkin *et al.*, 1981). Los peligros volcánicos afectan, directa e indirectamente, la vida y salud de las personas; si se comparamos con otros “desastres” naturales o inducidos por el hombre, los causados por fenómenos volcánicos y asociados son bastante infrecuentes, afectan a un número menor de personas y causan por lo tanto menores pérdidas en vidas humanas y económicas. Un ejemplo es la erupción más destructiva de la historia (Tambora, Indonesia, 1815) que acabó con la vida de 92.000 personas, frente a las 500.000 víctimas que produjo el peor huracán (Delta del Ganges, Bangladesh, 1970) (Tilling, 1989).

Sin embargo, entre el año 1.000 d.C. y la actualidad, se estima que más de 300.000 personas han fallecido a causa de la actividad volcánica tanto directa como indirectamente. Tilling (1989), actualizó estos datos e hizo un estudio comparativo de pérdidas entre 1600-1899 y 1900-1986 (Tabla 1).

Tabla 1. Pérdida de vidas humanas (y porcentajes) como consecuencia de la actividad volcánica en el período 1600- 1989, agrupadas según la causa de muerte (modificado de Tilling, 1989).

Causa Primaria	1600-1899		1900- 1986	
	Perdidas Humanas	%	Perdidas Humanas	%
Coladas piroclásticas y avalanchas	18.200	9,8	36.800	48,4
Lahares y otros flujos	8.300	4,5	28.400	37,4
Caída de piroclastos y proyectiles balísticos	8.000	4,3	3.000	3,9
Tsunamis	43.600	23,4	400	0,5
Enfermedades y hambre post-eruptivas	92.100	49,4	3.200	4,2
Coladas lávicas	900	0,5	100	0,1
Gases y llluvias ácidas	-----	-----	*1900	2,5
Otras Causas desconocidas	15.100	8,1	2.200	2,9
TOTALES	186.200	100	76.000	100,0

*Incluye las muertes causadas por escapes letales de gas en el dos lagos cratéricos en Camerún: 37, Lago Monoun, agosto de 1984 (Tilling *et al.*, 1989); y >1.700, Lago Nyos, agosto de 1986 (Tilling *et al.*, 1989). El gas letal (dióxido de carbono) en ambos casos es de origen volcánico.

De su análisis se desprende que el número medio anual de víctimas para el periodo 1900-1986 es mayor que el total de los tres siglos anteriores. Esto puede estar relacionado al incremento de la población humana, lo que nos ha llevado a habitar zonas con potenciales riesgos geológicos, especialmente cercanas a los volcanes (Fig. 1).

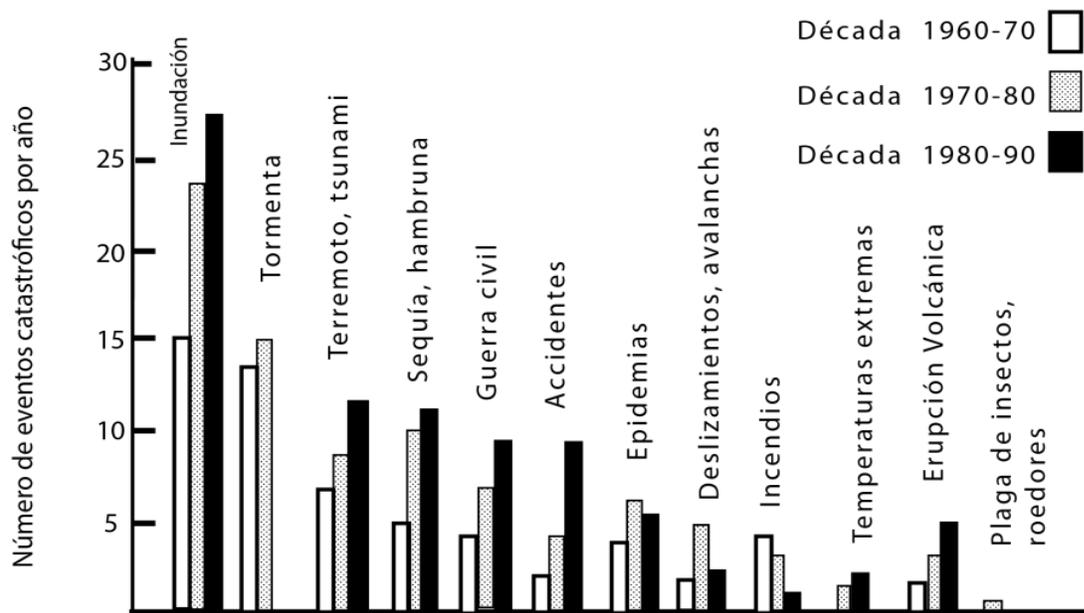


Figura 1. Número promedio de “eventos catastróficos” registrados por año en el mundo excepto para las erupciones volcánicas, los datos para la década de los '80 cubren el período (1980-1981) (modificado de Tilling, 1989). Los “eventos catastróficos” representan “la interacción entre los fenómenos físicos o naturales extremos y un grupo humano vulnerable”, cuyo resultado es “conmoción general, destrucción, pérdida de vidas y de medios de sustento, y personas heridas” (O’Keefe y Westgate, 1976).

Si se considera que unas 360 millones de personas, (aproximadamente el 10% de la población del planeta) viven en las inmediaciones de volcanes potencialmente peligrosos, en la década de 1980 (Tilling, 1989), y si se mantiene la frecuencia eruptiva

actual, que no debería cambiar a escala de tiempo humana, millones de personas más estarán bajo la amenaza de alguna actividad volcánica futura.

Este estudio busca identificar la ubicación de las zonas potencialmente peligrosas en torno al volcán Tacora y estimar los escenarios eruptivos de futuras erupciones. Aun cuando el volcán no presente signos de actividad, estos estudios son importantes pensando en objetivos en el mediano-largo plazo. Pues sirven como base a estudios de peligro de mayor rigurosidad que impliquen monitoreos permanentes y permitan decretar niveles de alerta temprana ante un posible escenario eruptivo.

Se emplea para ello una modificación de metodologías revisadas adaptada al contexto de una memoria de pregrado (Malin y Sheridan, 1982, Alberico *et al.*, 2007, Ferres, 2008), en donde se estiman los procesos volcánicos de erupciones pasadas del volcán Tacora (detallados en la Metodología).

Gran parte de las plantas geotérmicas se encuentran cerca de volcanes, por lo que estudiar el peligro volcánico asociado es de gran importancia. Esta memoria es financiada parcialmente por la empresa Serviland Minergy S.A., quienes poseen la concesión para la exploración geotérmica del lugar. Por lo tanto es necesaria la realización de estudios de riesgo y peligro volcánico en la zona denominada “volcán Tacora” y sus alrededores (Fig. 2). Esta concesión fue otorgada a la empresa Serviland Minergy S.A., y luego traspasada a Infinergeo SPA.

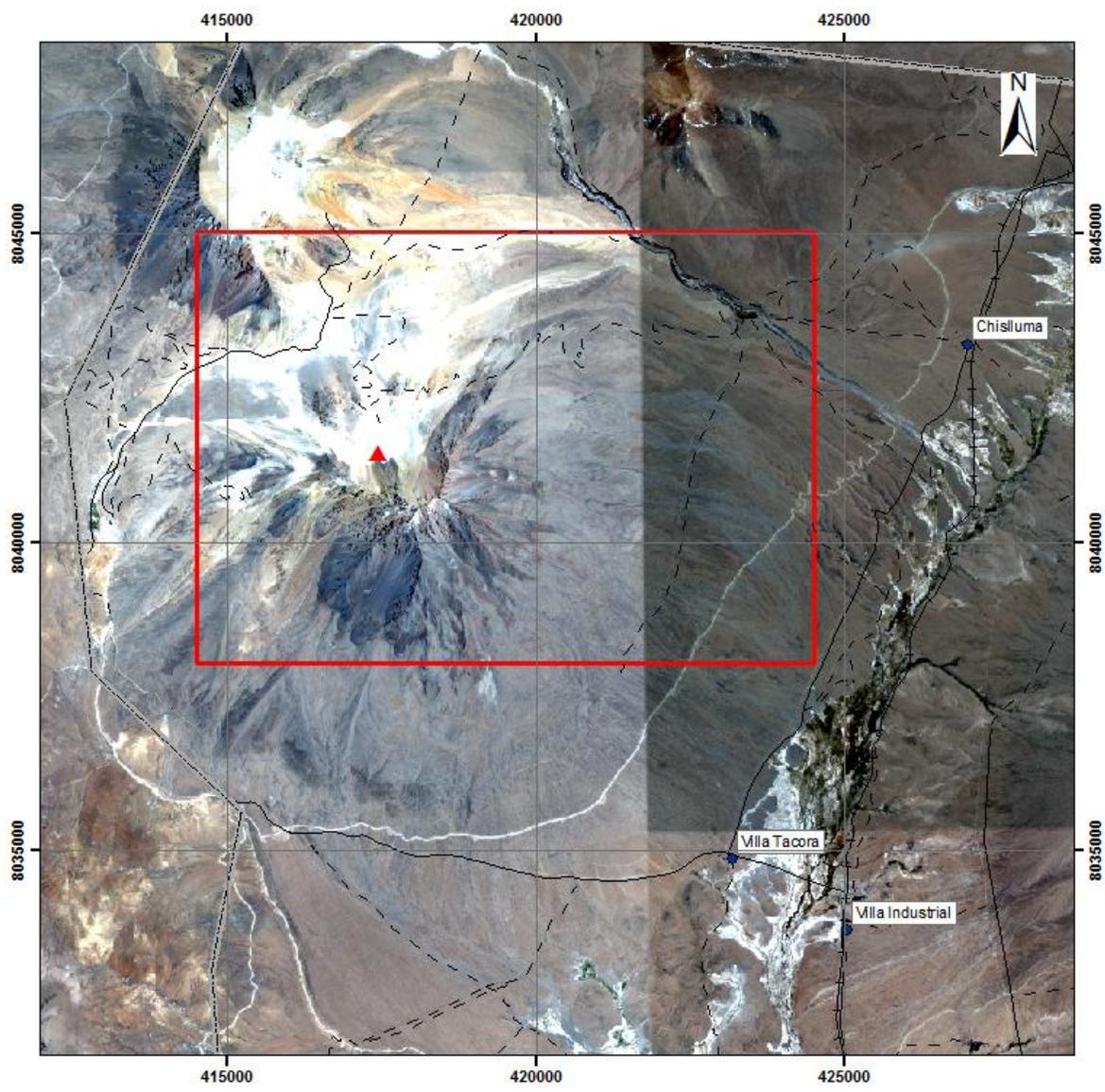


Figura 2. Rectángulo de concesión volcán Tacora. Coordenadas UTM WGS 1984, 19S.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Evaluar y zonificar el peligro volcánico asociado al área del volcán Tacora

1.2.2. Objetivos Específicos

- (a) Determinar los procesos volcánicos del volcán Tacora que han ocurrido en el pasado.
- (b) Estimar los posibles escenarios eruptivos del volcán Tacora.
- (c) Identificar las áreas que podrán ser impactadas por los procesos volcánicos tales como avalanchas volcánicas, flujos de densidad piroclástica, lahares y depósitos de caída de piroclastos.

1.3. Estudios Anteriores

1.3.1. Fumarolas

Capaccioni *et al.*, (2011) plantearon un modelo conceptual, en base a los estudios en composiciones isotópicas N_2 R/R_a, $CO_2/{}^3He$ y $\delta^{13}C-CO_2$. Mencionan tres niveles posibles de reservorios geotérmicos, los dos más profundos a 270°C y el que se encuentra más somero a 85°C.

Aguilera (2008) presenta un estudio de un segmento de volcanes de la Zona Volcánica Central, realizado análisis de gases de fumarolas y de aguas termales. Para el volcán Tacora destaca que las emisiones presentan una mezcla de orígenes hidrotermal y magmático, aunque con una mayor contribución de fluidos hidrotermales, especialmente en las emisiones localizadas en el borde NE del campo fumarólico basal NW del Tacora.

1.3.2. Fumarolas y microsismicidad

Clavero *et al.*, (2006) midieron microsismicidad y emisiones de SO_2 y CO_2 , en cuatro volcanes del norte de Chile. Las mediciones del Tacora arrojaron flujos relativamente bajos de SO_2 en comparación con otros volcanes activos de los Andes Centrales.

La actividad sísmica registrada para este estudio es bastante intensa y marcada por dos tipos de eventos:

- (1) Aquellos asociados al movimiento de fluidos en subsuperficie y, por lo tanto, asociados a procesos de desgasificación habituales.
- (2) Aquellos más profundos asociados a fracturamiento y/o movimiento de magma.

1.3.3. Actividad histórica

Hantke y Parodi (1966) menciona actividad (no confirmada) en 1930 y 1937. Mientras que Petit-Breuilh (2004) recopiló antecedentes que sugieren actividad en 1830, 1877, 1937, 1939 y 1950. Siendo los de mayor importancia la erupción de 1830 y de 1930 con VEI 2 y 1 respectivamente (Newhall y Self, 1982). El volcán Tacora también era conocido por el nombre de Chipicani.

1.4. Ubicación y acceso

El volcán Tacora se ubica en los $17^{\circ}43'S$, $69^{\circ}46'W$; corresponde al volcán más septentrional de Chile; 5.980 m s.n.m (1700 m desde su base). Se encuentra en la región de Arica y Parinacota a ~100 km de Arica, capital regional, a ~66 km de Putre (Capital Provincial) y a 5.5 km del límite con la Republica del Perú.

Se puede acceder al volcán Tacora desde Arica utilizando la Ruta 11, que lleva a Putre luego hacia el Norte, la ruta A-23 permite llegar a la Villa Tacora. Luego para llegar al volcán son 15 km por la ruta A147 hacia el Este, bordeando al volcán, también se puede bordear por el Oeste y llegar hasta el cráter en camino de ripio (Fig. 3).

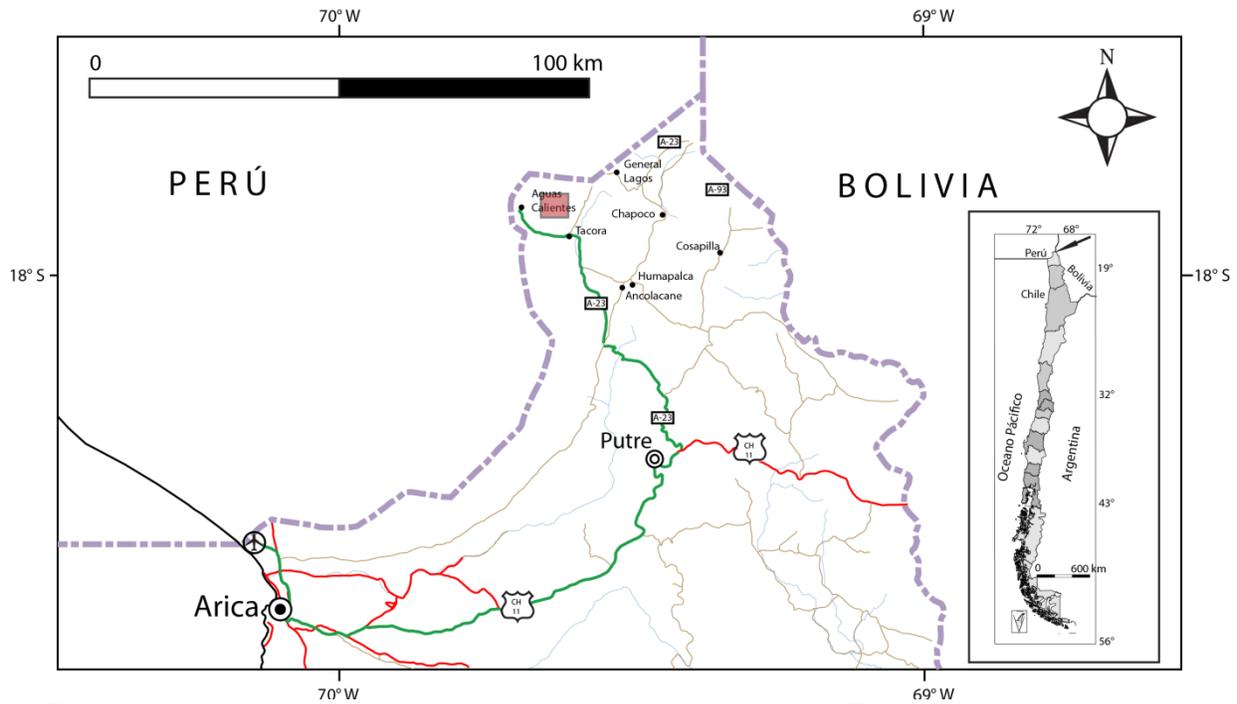


Figura 3. Ubicación y accesos. Con verde el camino hacia el volcán Tacora.

1.5. Metodología de Trabajo

1.5.1. Etapas en gabinete previo a campañas en terreno

En la primera campaña la etapa previa al terreno consistió en una revisión bibliográfica de la zona, con la intención de conocer las unidades geológicas presentes. Conjuntamente se investigó acerca de metodologías orientadas a la evaluación de peligro volcánico, para tener una idea de métodos en trabajos anteriores.

De manera adicional se analizaron imágenes satelitales de la zona, con la intención de identificar unidades y accesos.

El trabajo de gabinete en preparación al segundo terreno, además de lo anterior, se definió reevaluar algunas interpretaciones, y en particular buscar nuevos depósitos y zonas de interés.

1.5.2. Etapa de terreno

Se efectuaron dos campañas de terreno (marzo-abril 2012, septiembre octubre 2012), en las que se levantó la información geológica de los productos volcánicos identificados.

La primera campaña de terreno se realizó entre los días 24 de marzo y 10 de abril de 2012. Se levantaron alrededor de 190 puntos de control, incluyendo observaciones geológicas y mediciones estructurales, y se tomaron 62 muestras para correlación e individualización de unidades y estudio. De todas estas se seleccionaron 3 para factibilidad de datación radiométrica. El levantamiento geológico preliminar escala 1:25.000 fue efectuado en una superficie de 70 km² aproximadamente.

La segunda campaña se realizó entre los días 28 de septiembre y 5 de octubre de 2012.

En terreno se levantaron alrededor de 38 puntos de control, incluyendo observaciones geológicas y reinterpretaciones, y se recolectaron 21 muestras para correlación e individualización de unidades y estudio, (Fig. 4.).

El levantamiento geológico se realiza a escala 1:25.000 (mapa en Anexo A) y con énfasis en la estratigrafía volcánica, en particular depósitos piroclásticos, de avalanchas y laháricos.

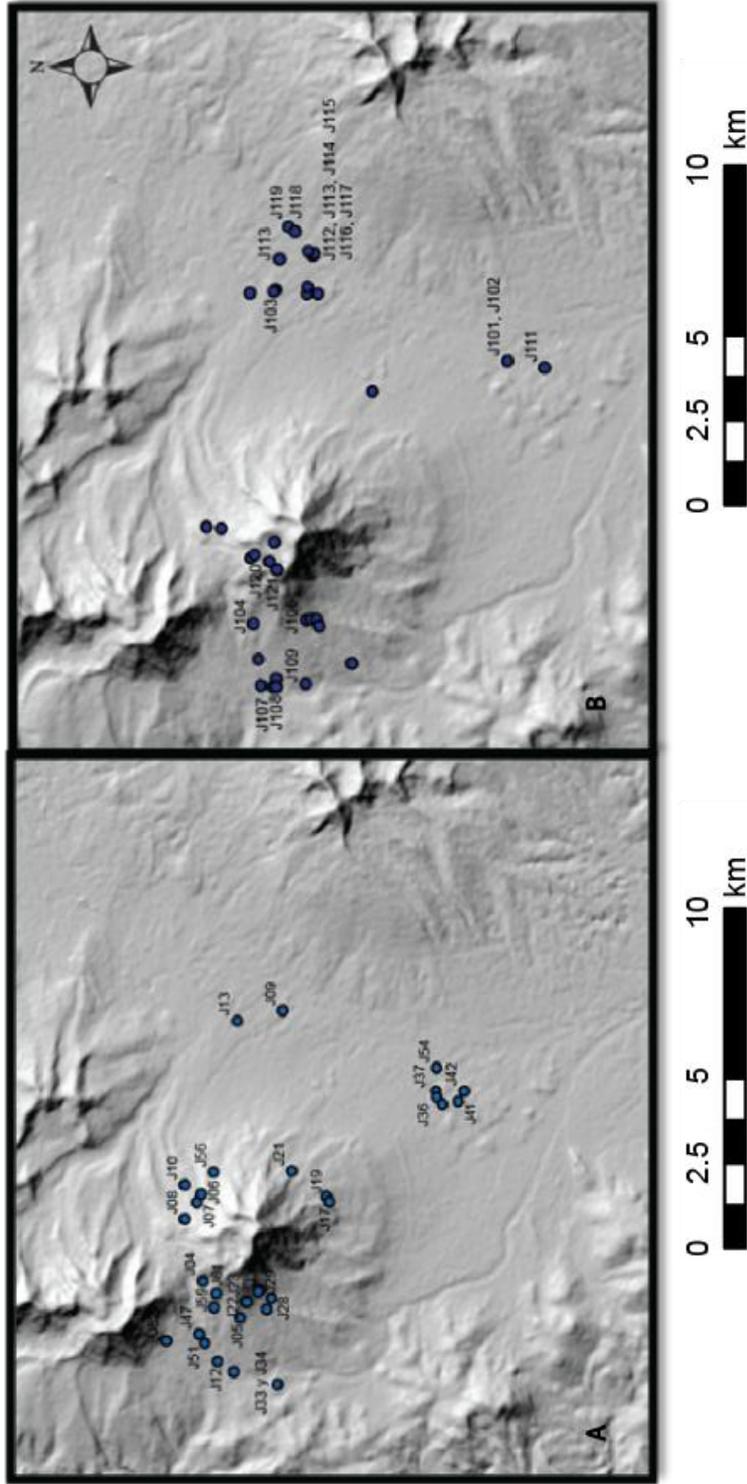


Figura 4. Ubicación de muestras para la zona de estudio. (A) 24 de marzo al 10 de Abril de 2012. (B) 28 de septiembre al 5 de Octubre de 2012, para este último también se consideraron los puntos en que se realizaron descripciones sin toma de muestras, estos son los puntos sin código.

1.5.3. Etapa de análisis

- Para el objetivo específico (a), se desarrolla un mapa geológico a escala 1:25.000, para tener una aproximación de la sucesión de eventos. Esto podrá realizarse también con un análisis de las observaciones de terreno y del resultado de dataciones radiométricas.
- Estimación de escenarios eruptivos posibles para el volcán. Para ello se estima el VEI, haciendo un análisis comparativo de la erupción del volcán Láscar de 1993 con los productos piroclásticos observados en el volcán Tacora.
- Utilización del método del cono de energía para determinar las zonas de potencial impacto de avalanchas volcánicas y corrientes de densidad piroclástica. Utilización del software ArcGis 9.3, el módulo WorkStation y el modelo LAHARZ (Shilling *et al.*, 1998).
- Utilización del modelo LAHARZ para determinar las zonas de inundación de flujos laháricos, para lo cual se utilizan distintos volúmenes de material.
- Utilización de modelo Tephra2 (Bonadonna *et al.*, 2005) para la modelación de caída de piroclastos.

A continuación se detallan el método de datación radiométrica y los últimos cuatro puntos de la etapa de análisis.

1.5.4. Método Datación de Ar- Ar StepHeating

Se utilizó el método de datación $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ *StepHeating*. Este método de datación geocronológica se basa en el decaimiento de nucleídos inestables a nucleídos estables. Todo nucleído tiene una constante de decaimiento, que no depende de la temperatura, ni de la presión, sino que solo depende del tiempo y se ha transformado en uno de los métodos de geocronología más aplicable y preciso (Renne *et al.*, 1998). Realizado en laboratorio del SERNAGEOMIN.

Se enviaron 3 muestras de mano (1 a 2 kg) a datación (Fig. 5) mediante el Método Ar-Ar *stepheating*, estas son las siguientes:

- J-05 (Dacita): en Masa fundamental
- J-10 (Andesita de anfíbola): en anfíbola*
- M-G2 (Andesita de biotita): en biotita*

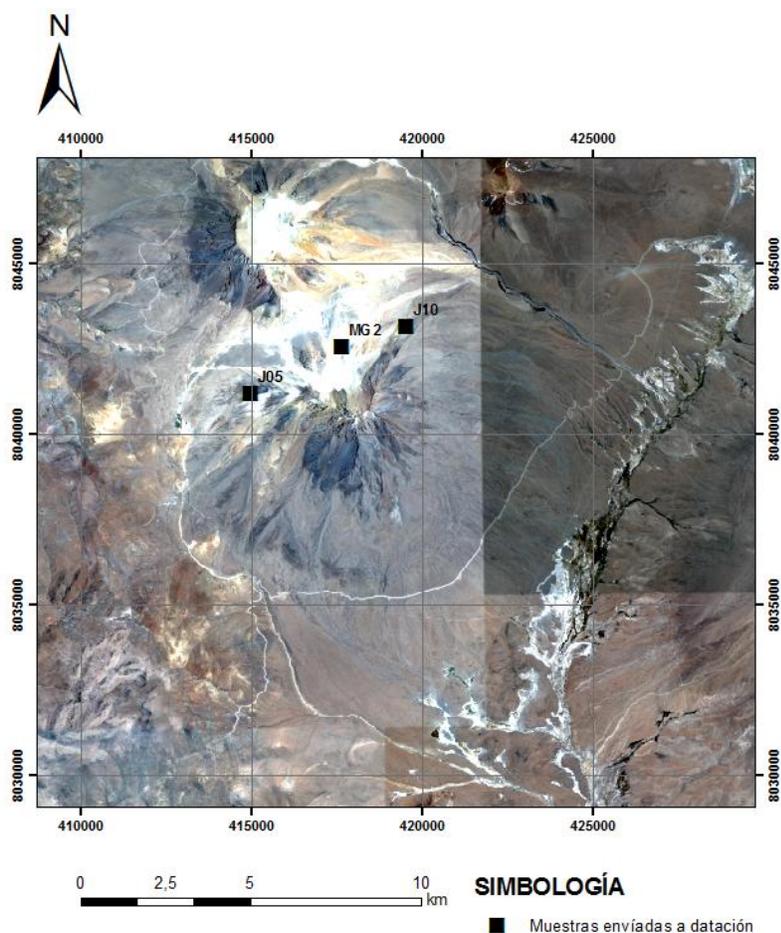


Figura 5. Ubicación de muestras enviadas a datación.

* Las muestras J-10 y MG-2 requirieron separación de minerales de Anfíbolos y Biotitas respectivamente

1.5.5. Modelos computacionales utilizados

1.5.5.1. Modelos de elevación digital

La estimación de áreas afectadas por flujos piroclásticos, avalanchas volcánicas, y caída de piroclastos, requieren la utilización de modelos de elevación digital (DEM, por sus siglas en inglés). Cada cual tiene una resolución específica y un error asociado. Se evalúa cuál de estas formas arroja un DEM que se ajuste mejor a los propósitos deseados. Un DEM obtenido a partir de las curvas de nivel cada 50 m sacadas del IGM presenta problemas en la generación de redes de drenaje y de un *hillshade*, arrojando un modelo poco confiable. Se realizó una simulación en LAHARZ con el SRTM, Topográfico y ASTER GDEM con el mismo número (500) para la función acumulación de flujo (Shilling, 1998) obteniéndose mayor detalle en las redes de drenaje en el ASTER GDEM, sin embargo las simulaciones del DEM topográfico arrojaron grandes errores. Por esta razón se opta por un ASTER GDEM de 30 m de precisión, el que arroja resultados que se aproximan de mejor manera a lo esperado según la topografía.

1.5.5.2. LAHARZ

LAHARZ es un modelo computacional, desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (Iverson *et al.*, 1998; Schilling, 1998), que permite delinear las zonas de peligro de lahares de una manera rápida, objetiva y reproducible en diferentes zonas. La justificación de este método deriva de análisis en lahares genéricos a escala y análisis estadísticos a 27 lahares en 9 volcanes documentados.

En conjunto, estos análisis semi-empíricos, entregan ecuaciones que predicen la inundación de un valle por un lahar, calculando áreas de inundación transversales (A) y planimétricas (B) en función del volumen del lahar (V) (Fig. 6). Las ecuaciones predictivas corresponden a (Iverson *et al.*, 1998):

$$A = 0,05 V^{2/3}$$

$$B = 200 V^{2/3}$$

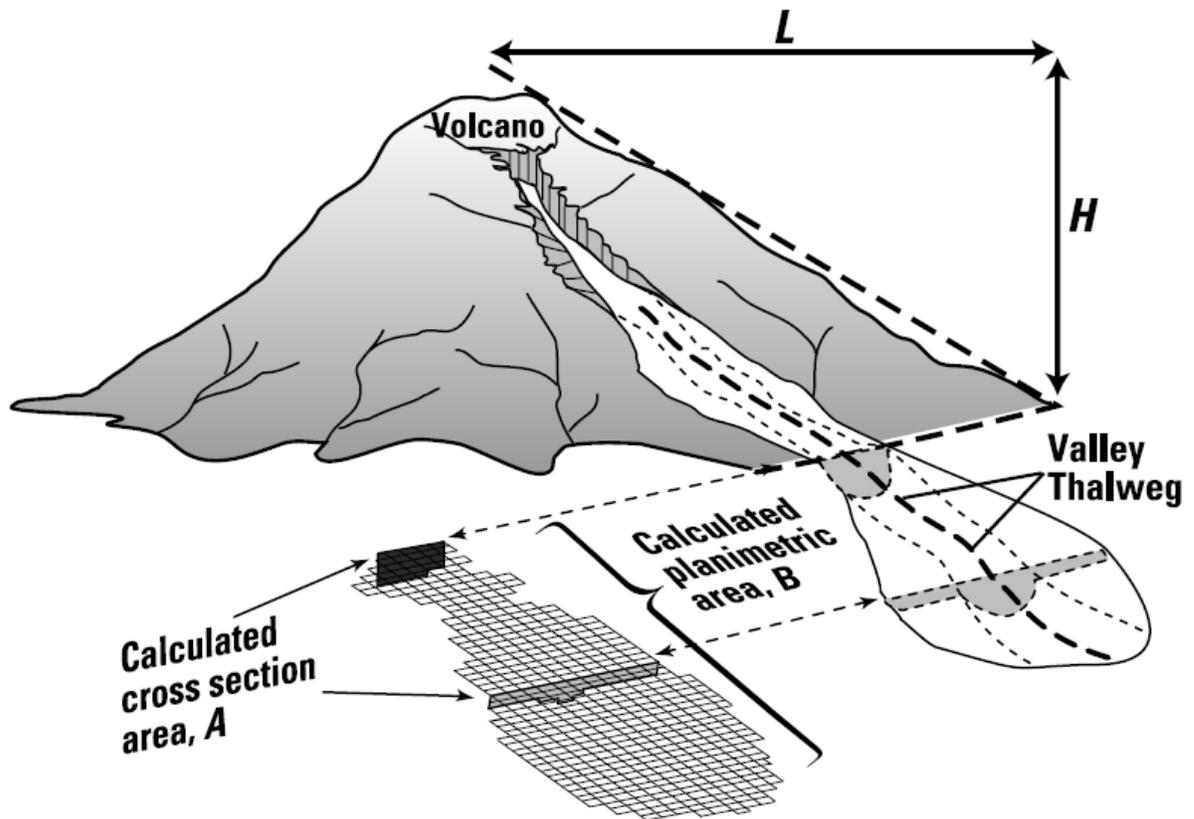


Figura 6. Esquema idealizado del recorrido del lahar. La razón H/L describe el alcance de la zona de peligro proximal, a partir del cual comienza la deposición en la simulación. A y B corresponden a las secciones: transversal y planimétrica respectivamente las que se emplean en el programa LAHARZ (Figura extraída de Iverson *et al.*, 1998).

1.5.5.3. Tephra2

El modelo Tephra2 se desarrolló con el objetivo de estimar las zonas más susceptibles de acumular material piroclástico de caída asociado a erupciones explosivas. El modelo recibe como entrada datos de dirección y velocidad de vientos, topografía, altura de columna, masa emitida y densidad de partículas, de manera que el modelo calcula para cada punto de grilla las ecuaciones de difusión, advección y sedimentación. Estos datos son obtenidos de la siguiente manera:

Dirección y velocidad de vientos:

Estos datos se obtienen del Re-análisis del National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), que toma datos de toda la información disponible meteorológica mundial en satélites, barco, radio sondeos, estaciones de superficie, aviones, etc. Se integra la información a computadores y resuelven las ecuaciones atmosféricas, las que entregan una grilla de datos de dirección y velocidad de viento.

Para el Tacora se consideran datos de direcciones y velocidades de viento desde el año 1991 hasta 2010 (20 años), cada 6 horas, i.e., 4 datos diarios, y diferentes alturas, 30 en total. Para efectos de este estudio se realizará la modelación utilizando dos alturas: 16 y 21 km (según los escenarios estimados en el punto 5.3.1.) sobre la cota del cráter del Tacora. Luego se obtienen $4 \cdot 365 = 1460$ datos anuales por altura, equivalentes a 2920 datos. Con el objetivo de reducir el número de simulaciones a ejecutar se consideró un año meteorológico típico (Scaini *et al.*, 2012). Seleccionando los meses que engloben de mejor manera la variabilidad, un mes que tenga información representativa comparándola por cada mes de los años analizados. Es decir: Enero 2000, Febrero 1998, ... Diciembre 2005 (Amigo *et al.*, 2012). Aquí se consideran las componentes dirección y velocidad del viento, ponderadas según 0,7 dirección y 0,3 velocidad, porque se busca el mes que englobe de mejor manera la variabilidad.

Datos Topográficos.

Se trabaja con un modelo ASTER GDEM con una resolución de 30 m, el mejor modelo disponible de libre acceso. El siguiente paso es definir el tamaño de la grilla de topográfica sobre la que se modelará. Debido que los vientos presentan mayoritariamente un sentido de transporte de Oeste a Este y viceversa, la grilla se

consideró de mayor amplitud en esta dirección. No obstante, se debe considerar que en verano esta dirección varía hacia el SE y NW. También, dentro de la grilla seleccionada, se consideran los poblados aledaños al lugar, ubicados al E del volcán (Fig. 7)

La grilla corresponde a una matriz de aproximadamente 800 puntos en dirección E-O y 400 puntos en dirección N-S, equiespaciados a 100 m.

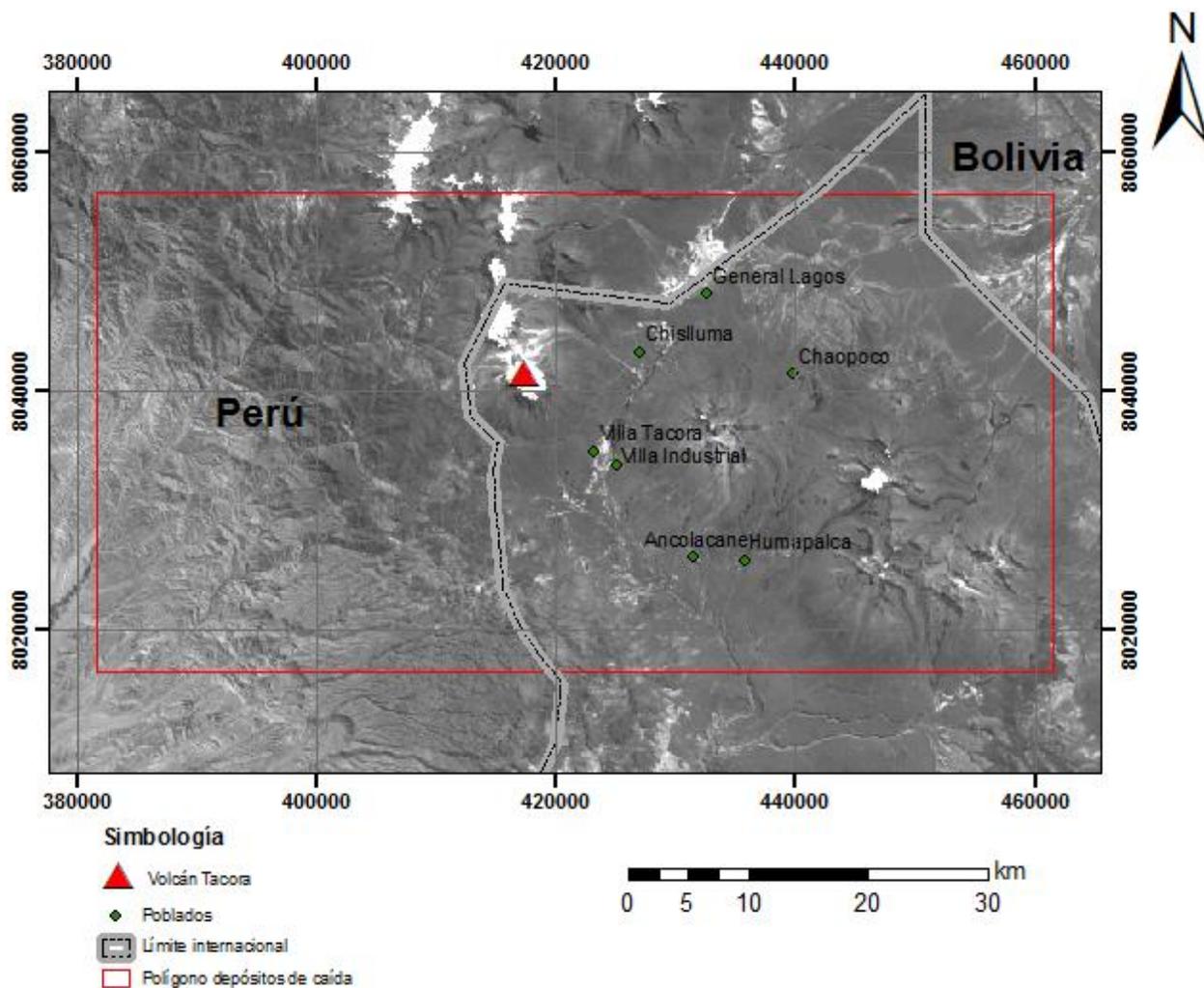


Figura 7. Polígono considerado para extraer los datos de topografía como entrada para el modelo Tephra2.

1.5.6. Método del Cono de Energía para modelar flujos piroclásticos y avalanchas volcánicas.

A través del método del cono de energía (Malin y Sheridan, 1982), se evalúa la posible distribución de flujos piroclásticos y avalanchas volcánicas. Este método provee una aproximación simple y conservativa para evaluar el peligro volcánico sin requerir cálculos amplios ni aproximaciones no controladas (Fig. 8).

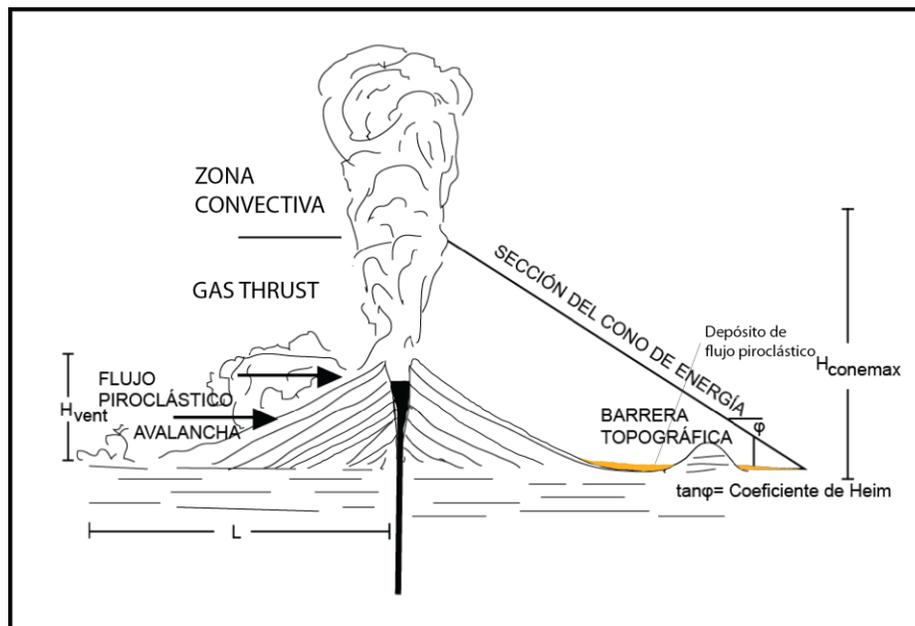


Figura 8. Esquema del método del cono de energía. Los parámetros: altura máxima de colapso ($H_{conemax}$), elevación del conducto volcánico (H_{vent}), coeficiente de Heim y la distancia de alcance de los flujos piroclásticos (L) necesarios para realizar la simulación de flujos piroclásticos. Modificado de Alberico *et al.*, (2007).

El método consiste en generar un cono de altura H y radio L , donde H corresponde a la altura del lugar donde se originan los flujos piroclásticos (cráter), al que puede agregarse la altura de colapso de la columna eruptiva según el tipo de flujo que se quiera modelar, y L es la distancia entre el origen de los flujos (visto en planta) y el lugar donde estos flujos se detienen (Malin y Sheridan, 1982). La tangente del ángulo que la sección del cono de energía forma con la horizontal, es llamada coeficiente de Heim (H/L) y da cuenta de las características reológicas del flujo piroclástico.

Este método compara la energía del cono de elevación (i.e. la energía potencial dada por el flujo piroclástico), con respecto a la topografía. Si la altura del cono de energía es mayor que la altura topográfica, entonces el área puede ser invadida por un flujo piroclástico o por una avalancha volcánica. Lo contrario significa que el flujo piroclástico (o avalancha volcánica) encuentra un obstáculo topográfico evitando su propagación.

1.5.7. Método de modelación de flujos piroclásticos y avalanchas volcánicas con LAHARZ

El modelo LAHARZ (Schilling *et al.*, 1998) es una aplicación implementada dentro de la plataforma workstation de ArcGis. Requiere datos topográficos, para lo que se utilizará un modelo de elevación digital ASTER GDEM, tal como se mencionó en el punto 1.5.5.2..

Para ambos (flujos piroclásticos y avalanchas volcánicas) se necesita ingresar el coeficiente de Heim (H/L), obtenido interpretando la información del levantamiento geológico en terreno.

Para flujos piroclásticos se consideró la ubicación del cráter y campos fumarólicos para estimar el posible lugar de origen de los flujos piroclásticos, del que se utilizó su altura (H) y la distancia del lugar de origen estimado al lugar más alejado donde se reconozcan depósitos de flujo piroclástico (radio L del cono). También se necesita estimar la altura de colapso eruptivo ($H_{conemax} - H_{vent}$), la que puede ser nula, si se modelara un colapso de un domo, lo que no corresponde al caso de los depósitos de flujo piroclásticos encontrados en el volcán Tacora.

Para avalanchas volcánicas el punto de partida de altura H , se escoge en los sectores más elevados del volcán, los que exhiben lavas muy fracturadas y presentan altas pendientes (45° a 70°) y el radio L , se obtiene al igual que para los depósitos de flujo piroclástico, con la distancia entre el posible lugar de origen y el lugar más alejado en donde se reconocen depósitos de avalancha volcánica.

1.5.8. Método de modelación de lahares con LAHARZ

La modelación de lahares también utiliza el método del cono de energía aplicado a flujos piroclásticos, este genera un cono de depósitos piroclásticos (explicado en el punto 1.5.5.2. y 1.5.6.), que son una potencial fuente de sedimentos de los posibles lahares, junto con el agua disponible y sedimentos no consolidados que se encuentren en el lugar, es necesario realizar una estimación de estos volúmenes. Sobre la base del área que cubran estos depósitos y el agua disponible se estima el área de generación de lahares. Luego se determinan los posibles cauces por los cuales los potenciales flujos pueden seguir sus trayectorias, esto se realiza considerando redes de drenaje que genera el modelo LAHARZ. Posteriormente se determina el punto de inicio de inundación, en donde se modelan diferentes volúmenes estimados.

2. Marco Geológico

En este capítulo se describen las principales antecedentes tectónicos, magmáticos y geológicos de los Andes Centrales del norte de Chile, en particular entre los 19°-21°S, a fin de contextualizar el volcán Tacora a escala regional. Se describirá el basamento del volcán, en el en cual se presentan las formaciones estratificadas desde el Oligoceno Superior hasta el Holoceno.

2.1. Marco Geotectónico

El principal rasgo morfoestructural del margen occidental de Sudamérica corresponde a la Cordillera de los Andes, la cual recorre desde Venezuela hasta Tierra del Fuego.

Las zonas de volcanismo activo en los Andes ocurren donde el ángulo de subducción es relativamente inclinado (25-30°), por lo que se ven interrumpidas en zonas donde la subducción es más plana (~10°) (Stern, 2004). Así, el arco volcánico andino ha sido dividido en cuatro zonas: la Zona Volcánica Norte, la Zona Volcánica Central, la Zona Volcánica Sur y la Zona Volcánica Austral (Stern, 2004), lo que refleja la segmentación geológica y tectónica de la Cordillera de los Andes (Fig. 9 a) (Stern, 2004).

Peligros asociados con volcanes Andinos incluyen lava, flujos piroclásticos, lahares, avalanchas volcánicas y caída de piroclastos (Stern, 2004).

2.1.1. La Zona Volcánica Central (ZVC)

La ZVC incluye 44 edificios volcánicos activos y también 18 centros de menor actividad (Fig. 9 b), al menos 6 centros silíceos de ignimbritas de considerable tamaño y/o sistemas de calderas, en ambos casos pertenecientes al Cuaternario y localizados en alturas mayores a 4000 m s.n.m. en regiones del Norte de Chile, NW de Argentina, Sur del Perú y SW de Bolivia (Stern, 2004).

La erupción histórica de mayor magnitud de los Andes (VEI = 6) fue la generada por el volcán Huaynaputina (Perú), en 1600 (de Silva and Zielinski, 1998; Thouret *et al.*, 1999, 2002; Adams *et al.*, 2001). Otras erupciones de las que se tiene algún registro

son las Vulcanianas y sub-Plinianias del volcán Misti (Perú), en los últimos 50 ka, la última en 1.455 ± 15 d.C. (Stern, 2004).

El Láscar, en el norte de Chile es el volcán recientemente más activo de la ZVC, entró en un ciclo eruptivo en 1984 (Gardeweg *et al.*, 1998) con erupciones en 1986, 1990, 1993 (VEI 3.4) y en el 2000 (Stern, 2004).

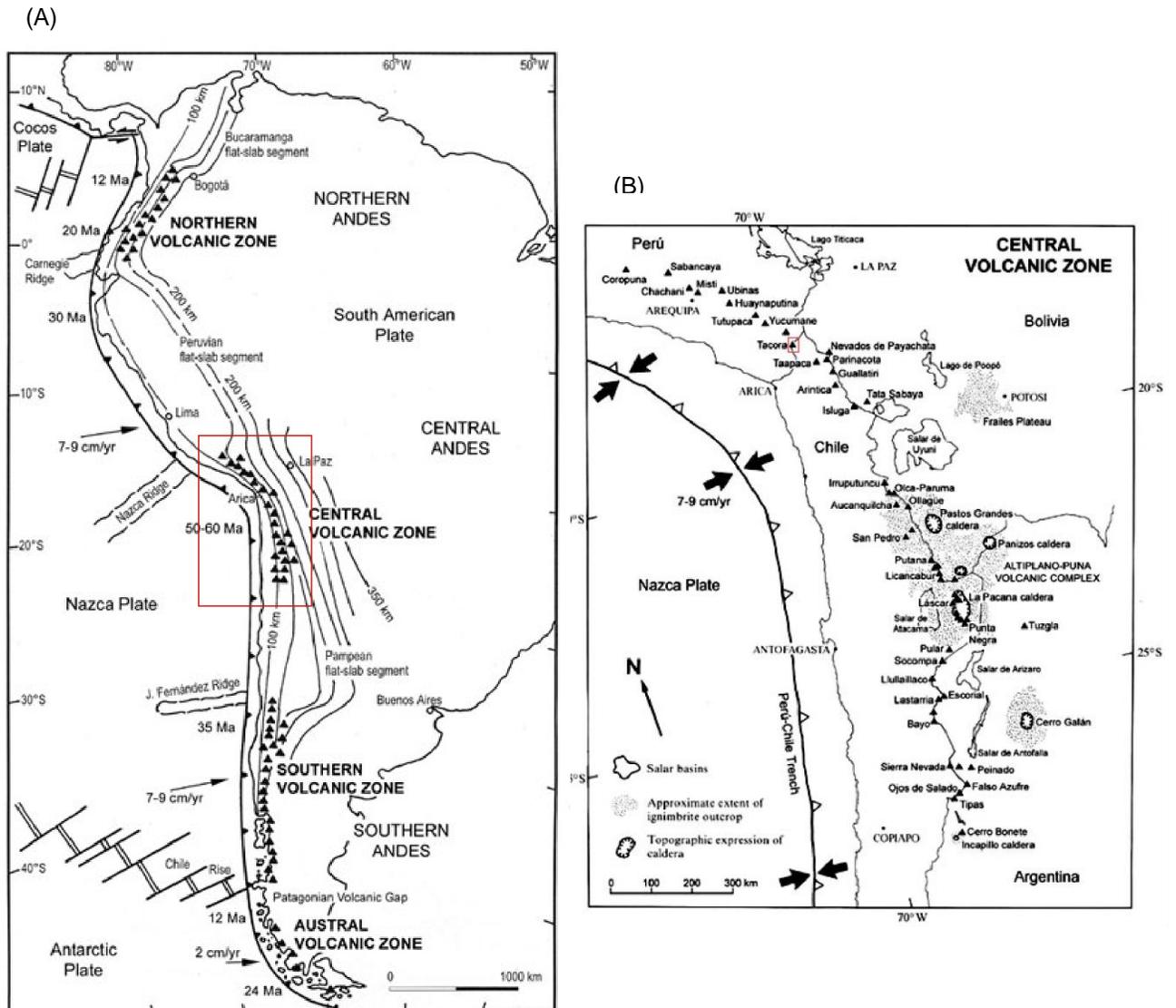


Figura 9. (A) Zonas volcánicas de Los Andes. (B) Zona Volcánica Central de Los Andes. Se presentan los volcanes activos de esta zona, se destaca el volcán Tacora. Modificado de Stern (2004) y de Silva y Francis (1991).

2.2. Basamento del volcán

Las unidades cenozoicas cubren gran parte del norte de Chile y afloran en superficies y quebradas de la Depresión Central, la Precordillera y el Altiplano chileno. Estas unidades corresponden principalmente a rocas ígneas que cubren e intruyen un basamento paleozoico o mesozoico deformado, y que se intercalan con depósitos sedimentarios continentales. La proveniencia de las unidades ígneas ha sido atribuida al arco volcánico migratorio, mientras que las unidades sedimentarias corresponderían a los depósitos asociados al levantamiento del flanco occidental de los Andes Centrales y a la degradación de los centros volcánicos (Naranjo y Paskoff, 1985; Charrier *et al.*, 2005; García y Hérail, 2005; Farías *et al.*, 2005).

A continuación se detallan las unidades lito estratigráficas

- **Formación Lupica (Oligoceno superior – Mioceno inferior)**

La Fm. Lupica (Montecinos, 1963) es una serie principalmente volcánica con una gran extensión en la Cordillera Occidental dentro de la XV Región, la cual se presenta deformada y con grandes variaciones laterales. Su sector occidental se conforma de 2000-2500 m de secuencias volcánicas y volcano-sedimentarias; mientras que su sector oriental corresponde a 1500-2000 m de secuencias esencialmente volcánicas (García, 2002). Esta formación sobreyace en discordancia angular y de erosión a substratos precenozoicos, como el Complejo Metamórfico de Belén (CMB; Montecinos, 1963) en la región de Belén (García, 1996), y, debido a su extensión y plegamiento, subyace en discordancia a distintas unidades del Neógeno (Riquelme, 1998; Charrier *et al.*, 2005). García (1996) redefinió la Fm. Lupica separándola en tres miembros: el miembro inferior se constituye de 400 a 600 m de coladas masivas de andesitas y dacitas con algunas intercalaciones de sedimentos fluvio-aluviales e ignimbritas; el miembro intermedio se conforma de un paquete de 800 a 1400 m de tobas soldadas riolíticas; y el miembro superior se compone de 400 a 600 m de areniscas y conglomerados asociados a depósitos fluviales o aluviales distales, intercalada de ignimbritas y lavas (García, 1996, 2002; Charrier *et al.*, 2005).

- **Formación Oxaya OMO (Oligoceno Superior-Mioceno Inferior).**

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, subhorizontales 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 el presente trabajo se prefiere considerar todas estas rocas como parte de la Formación Oxaya. Las rocas de esta unidad sobreyacen en discordancia angular a rocas de la Formación Livilcar (Jurásico Superior) y a los Intrusivos del Eoceno Eog, y subyacen, en discordancia angular y de erosión, a rocas volcánicas del Mioceno Medio, Mioceno Superior y Pleistoceno (Pv), a los depósitos de la Formación Visviri (PIPa) y a depósitos fluviales y aluviales del Pleistoceno.

En el área del presente levantamiento, las rocas de esta unidad afloran muy restringidamente, al oeste, subyaciendo el flanco occidental del volcán Tacora. Estas rocas corresponden a lavas riodacíticas porfídicas, formadas por hasta 25% de fenocristales (de largo menor a 8 mm) de feldespatos, cuarzo, anfíbola y biotita, y una masa fundamental microcristalina fina. La roca se encuentra parcialmente con alteración hidrotermal (localmente, muy fuertemente): la masa fundamental está silicificada, los feldespatos están sericitizados y/o argilizados, y los minerales máficos están alterados a clorita y/o biotita; localmente se observan vetillas de cuarzo con limonitas. Estas lavas se continúan lateralmente, hacia el norte y oeste, en el extremo sur de Perú, con las rocas de la Formación Huilacollo (Wilson y García, 1962). Numerosas dataciones radiométricas efectuadas en las tobas de la Formación Oxaya y sus equivalentes, han arrojado valores de 26 a 17 Ma (*eg. García et al.*, 2004), permitiendo asignarla al Oligoceno Superior-Mioceno Inferior.

- **Formación Putani (Mioceno Inferior-Medio).**

La Formación Putani fue definida informalmente por Henríquez (1963), como una sucesión predominantemente sedimentaria continental, plegada y fallada, expuesta en

el río Putani, al suroeste del poblado de Visviri, fuera del área del presente trabajo. La base de la unidad no está expuesta, y subyace en discordancia angular a rocas volcánicas del Pleistoceno y a rocas sedimentarias de la Formación Visviri (Plio-Pleistoceno) y a la Ignimbrita Lauca (García *et al.*, 2004).

Al sureste del volcán Tacora, este y noreste de Ancolacane (Fig. 7), durante el presente trabajo, se reconocieron afloramientos restringidos de rocas similares a aquellas de la Formación Putani, las cuales se encuentran moderadamente inclinadas (al oeste y norte) y cubiertas en discordancia angular por rocas volcánicas andesíticas atribuidas al Pleistoceno. Se trata de una unidad inferior formada por rocas sedimentarias detríticas (Mimp1) y una unidad superior formada por un depósito de toba (Mimp2). La unidad Mimp1 corresponde a una sucesión de limolitas, areniscas, paraconglomerados finos y parabrechas sedimentarias finas, que se encuentran moderada a fuertemente hematizadas, de color rojo intenso. La estratificación es plana, de espesor centimétrico a métrico; localmente se observan paleocanales de hasta 1 m de ancho. La unidad Mimp2 corresponde a una toba vítrea, dacítica a riodacítica, de color blanco, y con un espesor mínimo expuesto de 30 m. Contiene fragmentos de cristales de biotita (3-5%), feldespatos (3-5%) y cuarzo (1-3%), y pómez y líticos volcánicos, de diámetro menor a 5 cm.

Por su correlación litológica con las formaciones Chucal y Macusa, expuestas hacia el sur (García *et al.*, 2004), las rocas asignadas aquí a la Formación Putani se atribuyen tentativamente al Mioceno Inferior-Medio.

Formación Visviri PIPa (Plioceno Superior-Pleistoceno Inferior).

Fue definida informalmente por Herníquez (1963) como una sucesión sedimentaria continental, subhorizontal, semiconsolidada, expuesta alrededor de la localidad homónima. Sobreyace en discordancia angular a rocas de la Formación Putani Mimp y sobreyace en discordancia de erosión, a rocas volcánicas del Plioceno Plv y 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.

En el sector estudiado, la Formación Visviri aflora extensamente, y está constituida por hasta 100 m de espesor de gravas, grano fino a grueso, arenas,

areniscas y limolitas, semiconsolidadas, de colores pardo y gris. Estos depósitos se presentan bien estratificados, en capas continuas o lenticulares, de espesor centimétrico. Las gravas y areniscas gruesas, son en parte brechosas, predominantemente matriz-soportadas. Corresponden a depósitos pobre a medianamente seleccionados, formadas por clastos, de diámetro menor a 30 cm, angulosos a subredondeados. Los clastos son de rocas esencialmente volcánicas (andesíticas a riolíticas, pómez y escoria).

De acuerdo a las relaciones estratigráficas y de disección de la Formación Visviri, ella se asigna al Plioceno Superior alto-Pleistoceno Inferior, y se correlaciona estratigráficamente, hacia el sur en la Hoja Arica, con la parte superior de la Formación Lauca del Plioceno-Pleistoceno (Muñoz, 1988; Gaup *et al.*, 1999; García *et al.*, 2004).

- **Formación Huaylas (Mioceno superior)**

La Fm. Huaylas, definida por Salas *et al.* (1966), y redefinida por Viteri (1979) y García (1996), corresponde a una unidad sedimentaria clástica gruesa cuyos depósitos son sintectónicos y ligeramente plegados. Se expone entre la Cordillera Occidental y el oriental de la Precordillera, a la latitud de Arica con espesores de hasta 400 m (García, 2002). Esta formación yace en discordancia sobre las formaciones Oxaya, Lupica y Zapahuira, y está cubierta en discordancia de erosión por una ignimbrita característica que se extiende ampliamente hacia el este (Ignimbrita Pérez en Bolivia de Evernden *et al.*, 1977; Ignimbrita Lauca de Kött *et al.*, 1995; Muñoz y Charrier, 1996; Ignimbrita Lauca-Pérez de Wörner *et al.*, 2000).

Los sedimentos de esta unidad son una secuencia subhorizontal de gravas clasto soportadas y areniscas, de color marrón, con algunas intercalaciones de tobas riolíticas. Los clastos presentes provienen de unidades anteriores, como la Fm. Lupica (García 2011).

2.3. Geología de volcán Tacora Pv(a), Pv(d) (Pleistoceno).

Está emplazado sobre la Formación Huaylas (Aguilera, 2008; Salas *et al* 1966) Corresponde a un edificio volcánico moderadamente preservado, de forma

aproximadamente cónica, que cubre en su parte occidental a rocas de la Formación Oxaya. Está formado predominantemente por lavas andesíticas y dacíticas (Pv(a)) y subordinadamente por un domo dacítico (Pv(d)); estas rocas se encuentran parcialmente alteradas a minerales de arcilla y óxidos de hierro. En sus flancos Norte y Oeste, el volcán presenta emanaciones de gases asociadas a precipitación de azufre nativo, el cual fue motivo de explotación en el pasado (García, 2011).

La unidad Pv(a), de mayor extensión y volumen, está formada por lavas porfídicas y afaníticas, de composición andesítica a dacítica. Presentan texturas autobrechosas y bandeamiento de flujo. Las andesitas porfídicas contienen fenocristales de plagioclasa, anfíbola, piroxeno y/o biotita, mientras que las dacitas contienen fenocristales de plagioclasa, sanidina, biotita y anfíbola (García, 2011).

La unidad Pv(d) corresponde a un de composición dacítica a andesita cuarcífera, se expone restringidamente en la parte centro-norte del volcán. Presenta un bandeamiento marcado (con inclinación menor a 20° al noreste) de espesor entre 5 y 80 cm. Posee un textura porfídica con 30 a 35% de fenocristales, de largo menor a 15 mm, de plagioclasa (12-15%), sanidina (4-6%), biotita (6-8%), anfíbola (2-3%) y subordinadamente cuarzo (<1%). La masa fundamental es vítrea y microcristalina. La roca se encuentra leve y localmente alterada a minerales de arcilla y óxidos de hierro, mientras que la anfíbola, se encuentra moderadamente alterada a clorita.

2.3.1. Depósitos glaciares Qg (Pleistoceno Superior).

Se exponen principalmente en los flancos de los edificios volcánicos del Pleistoceno. Los depósitos corresponden esencialmente a morrenas laterales y/o frontales, y a mantos estratificados relativamente extensos y delgados, asociadas a diversos avances de las últimas glaciaciones. Las morrenas tienen espesores de hasta 200 m y corresponden a depósitos de para-brechas polimícticas, semiconsolidados, con muy mala selección, de fragmentos predominantemente volcánicos (de hasta 2 m de diámetro), siendo los mayores, frecuentemente subredondeados, y los menores, frecuentemente angulosos. La matriz es limo-arenosa. Los depósitos Qg se asocian a los diversos avances de las últimas glaciaciones en la zona durante el Pleistoceno Superior (eg. Amman *et al.*, 2001).

3. Características físicas de los depósitos

En el presente capítulo, se muestran los resultados de las observaciones realizadas en afloramientos de lavas, domos, depósitos de flujo piroclásticos, avalanchas volcánicas y de lahares, dando énfasis, por su relación con el estudio de identificación del peligro volcánico, a los flujos piroclásticos más recientes.

3.1. Levantamiento geológico de terreno

El levantamiento de la información geológica realizada en dos campañas de campo permitió cartografiar la zona del estudio a escala 1:25.000 (Fig. 10).

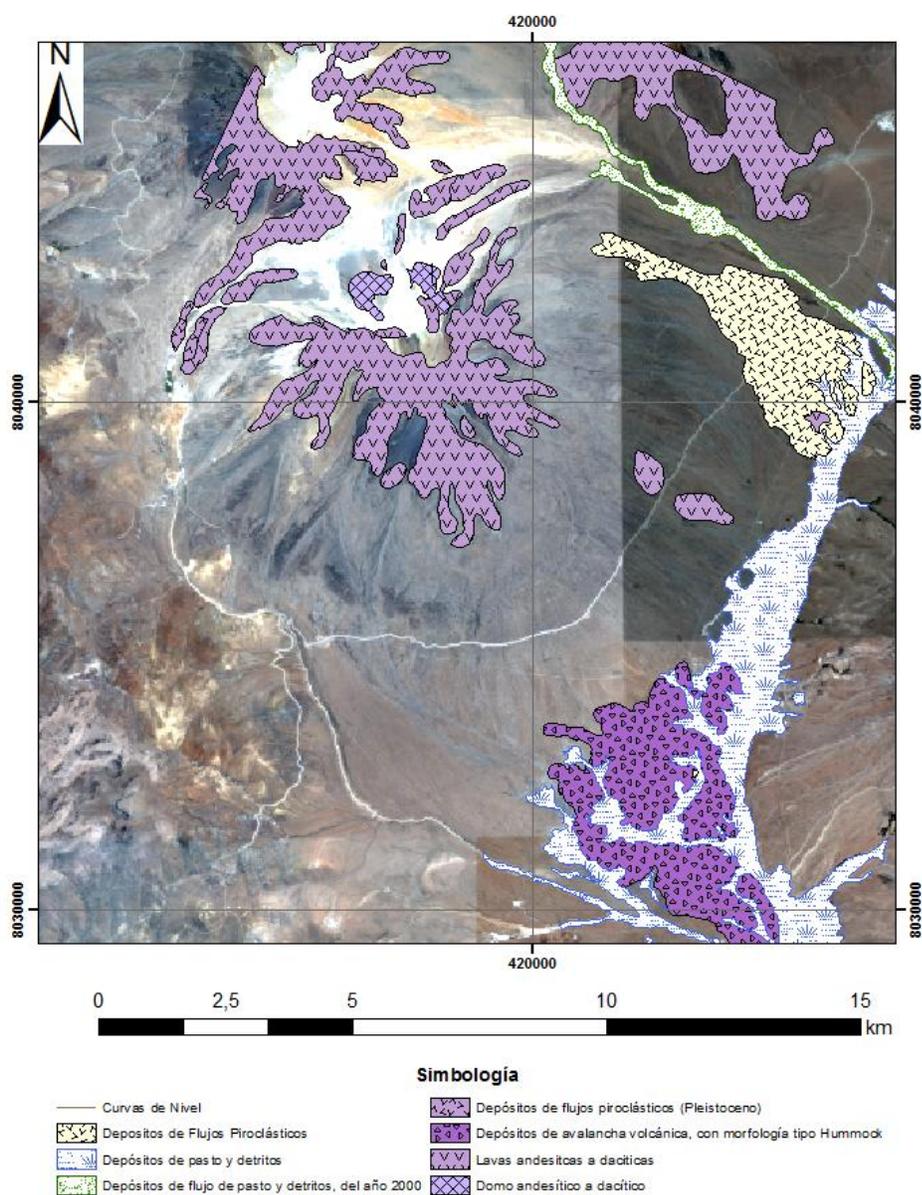


Figura 10. Unidades geológicas reconocidas en este estudio en el volcán Tacora.

3.1.1. Depósitos de flujos piroclásticos

Se observaron depósitos de flujos piroclásticos en diversos puntos alrededor del volcán. Los depósitos ubicados al NE del volcán, correspondientes a los de mayor interés por el tamaño del área de cobertura, baja consolidación, grado de preservación y posición estratigráfica (Mapa Anexo A), dado que se encuentran sobre depósitos glaciares en su extremo superior (Figs. 10, 11 y 12), sobre la Formación Visiviri, y en la misma posición estratigráfica que depósitos Holoceno aluvial (García, 2011), estos son indicios de que podrían corresponder también a depósitos holocenos.

El afloramiento NE (Fig. 10) presenta ~3 km de largo por ~1 km de ancho en su parte máxima y espesores de hasta 6 m. Presenta un 20% de matriz, 15% de líticos de tamaño lapilli fino y 65% de escoria tamaño lapilli fino a bloque con gradación inversa (Fig.11). Se observa con alteración superficial en grado medio y con matriz semi consolidada. Estos depósitos se intentaron datar mediante el método *Ar-Ar step heating* en el Laboratorio del SERNAGEOMIN, siendo rechazada la muestra por presentar alteración, se sugiere reintentar la datación en una muestra más fresca.

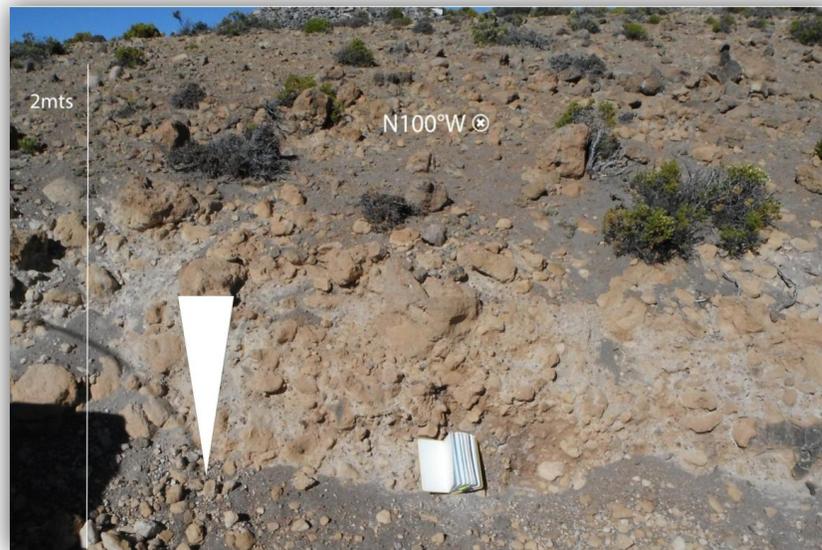


Figura 11. Depósito de flujos piroclásticos al NE del volcán



Figura 12. Depósitos de oleada basal de un flujo piroclástico.

En el extremo E de los depósitos de flujos piroclásticos encontrados al NE del volcán, mencionados como los de mayor interés, se observa una secuencia estratificada, siendo interpretada como un depósito de oleada basal de un flujo piroclástico. En este afloramiento de 1,7 a 2 m de altura por ~20 m de largo se distinguen 5 niveles (Fig. 12), de base a techo son los siguientes:

(5) 20 cm de gravas de grano fino, sin gradación clara, matriz soportada, fresca y no consolidada.

(4) Estrato de 80 cm, grano decreciente, 50% de matriz, 30% de escoria y 20% de líticos, de buena selección. En los 20 cm basales presenta un nivel negro de 5 cm a 10 cm de espesor.

(3) Estrato de 15 cm de espesor, sin gradación clara, 80% de matriz, 20% de líticos de tamaño lapilli medio a grueso.

(2) Estrato de 20 cm, 60% de matriz, 30% de juveniles (escorias), 10% de líticos, ambos líticos y juveniles sin gradación clara presentan tamaño de grano ceniza gruesa, buena selección.

(1) Estrato de 60 cm de espesor, se observa alterado a un color café, presenta un 60% de matriz semi-consolidada y un 40% de pómez granocreciente, tamaño lapilli fino.

(0) Depósito de flujo piroclástico principalmente escoriáceo, con gradación inversa de tamaño bloque a lapilli medio.

3.1.2. Depósitos de avalancha volcánica

Se observaron depósitos de avalancha volcánica al Sur Este del volcán (Fig. 10). Estos presentan una morfología tipo hummock (Figs.13, 14 y 15), de tamaño irregular entre 10 a 30 m de altura, aproximadamente, que disminuye al alejarse del volcán, sin embargo en el trayecto aparecen algunos afloramientos de mayor volumen, que contravienen la tendencia. Los depósitos cubren un área de 11,5 km² en forma aproximadamente triangular (Fig. 9), cuya base es la parte más cercana al volcán, enangostándose en dirección Sur. Se conforman por clastos de lavas andesítica y tobas, es clasto soportado, en su base un tamaño de clastos entre 10 cm y 30 cm de diámetro. En la cima, presenta bloques de 2 metros de diámetro, es decir, presenta una gradación grano decreciente.

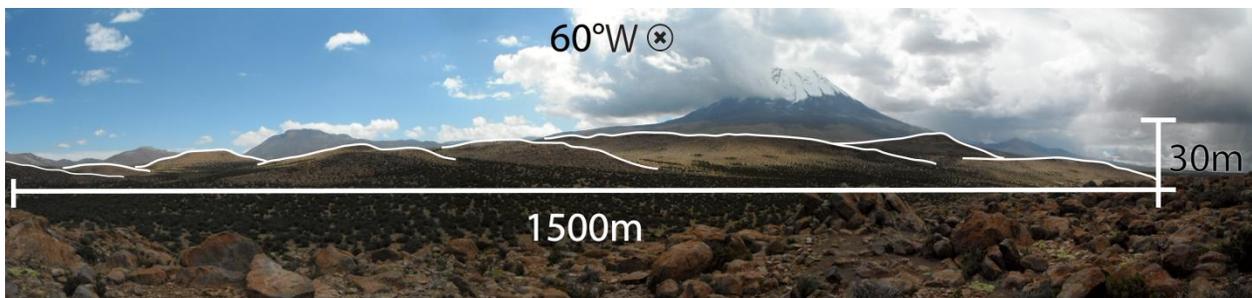


Figura 13. Depósitos de avalancha volcánica, visto desde el Sur



Figura 14. Depósitos de avalancha volcánica, el que se encuentra al centro a la izquierda es el que aparece en la figura 15 (línea roja indica el perfil en esta figura) en su lado E, vistos desde el Sur del volcán.

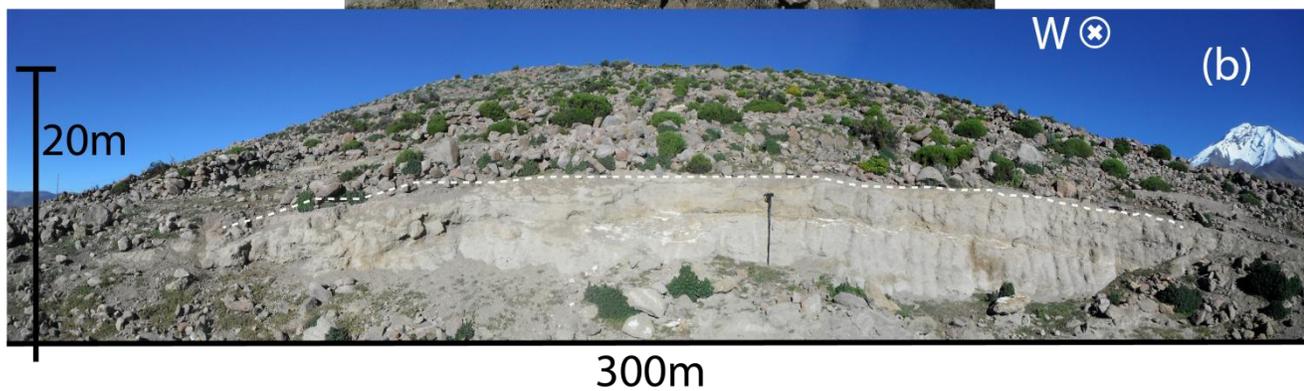
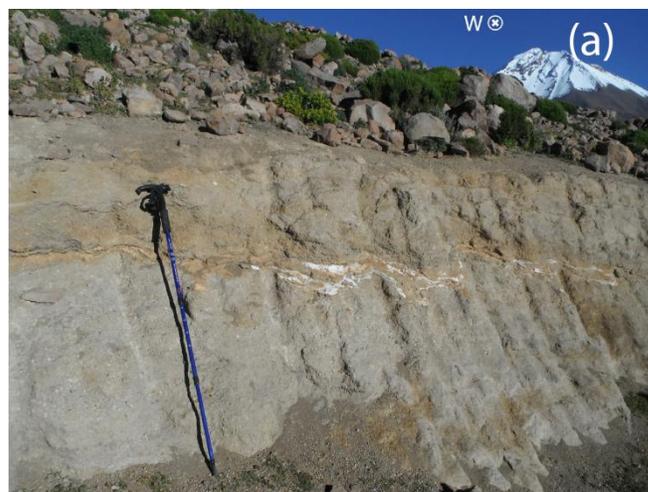


Figura 15. Depósito de avalancha volcánica. (a) Corte artificial que expone la base de depósito. (b) Vista panorámica de depósito de avalancha

3.1.3. Depósitos laháricos

Este depósito se identifica al NE del volcán, con más de 10 km de largo y un ancho variable entre 50 y 100 m (Figs. 10 y 16). De características peculiares, pues por su ubicación y origen es posible de clasificarlo como un lahar, aunque no se origina debido a una erupción. No obstante se compone de pasto y detritos, generados luego del colapso de un bofedal, asociado al sismo Mw 8.4 de Arequipa, Junio 2001 (Naranjo y Clavero, 2005). Presenta estructuras tipo levée en sus bordes, propias de los lahares, se observan clastos subredondeados de mala selección, de diámetro entre 10 cm y 2 m, es predominante el material fino y los bloques mayores a 2 m se encuentran en un porcentaje menor al 1%. Se observa gran cantidad de vegetación muerta.

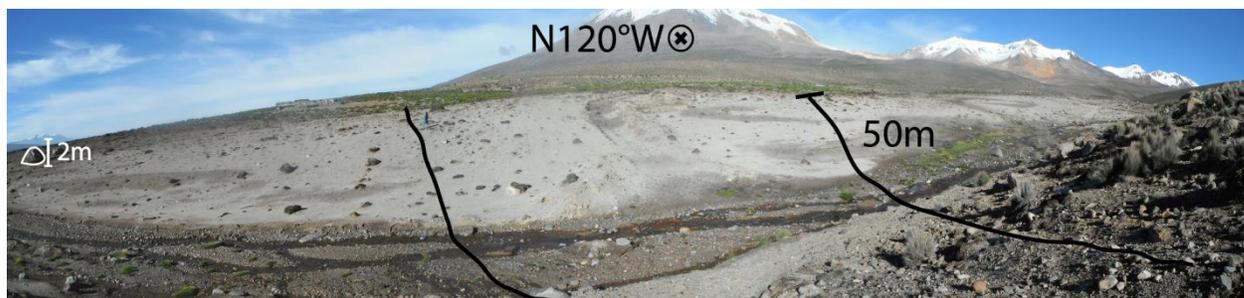


Figura 16. Depósito de flujo de pasto y detritos. Asociado al sismo Mw 8.4 de Arequipa, Junio 2001 (Naranjo y Clavero, 2005).

3.1.4. Domo Dacítico

Se expone restringidamente en la parte centro-norte del volcán (Figs. 10, 17 y 18). Es un afloramiento de 200 m de altura y ancho de 100 m, en el cual, Se observan paredes abruptas y muy fracturadas (fracturas cada 50 cm). En dirección N45°E se presenta un afloramiento de 90 m de alto 150 m de ancho, el que correspondería a la parte sur del domo de observado en la Fig 18. Además se observa un bandeamiento marcado (con inclinación menor a 20° al noreste).

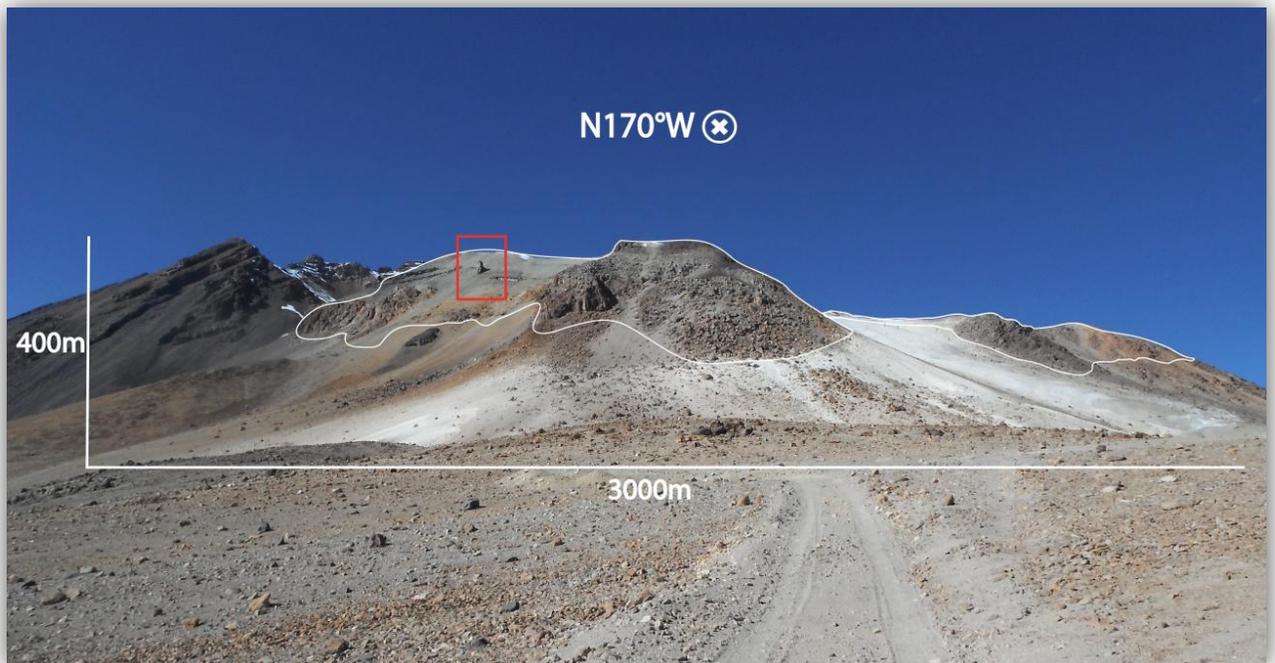


Figura 17. Afloramiento de domo en el centro y derecha de la figura, se observa una espina característica de domos peleanos, marcado en rectángulo rojo.

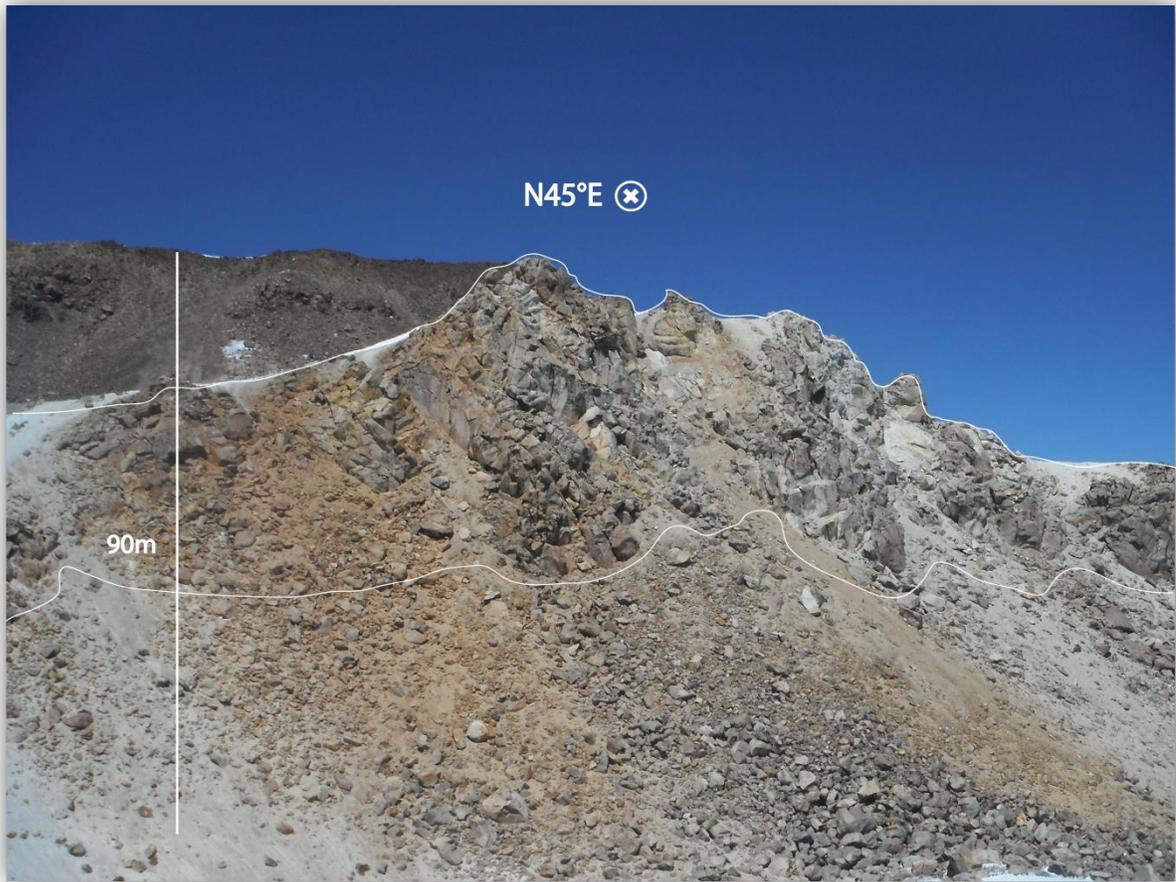


Figura 18. Afloramiento de domo, mirado desde el interior del cráter del volcán Tacora.

3.1.5. Lavas

En el volcán Tacora existen lavas de diferentes edades y ubicación. Las lavas superiores conforman gran parte del edificio volcánico de forma aproximadamente cónica, en sus flancos superiores se observan algunos afloramientos cuyas dimensiones aproximadas son de 90 m de ancho por 1000 m de largo (Fig. 19 a), con texturas de flujo de inclinación correspondiente con la topografía del lugar, de composición andesítica (principalmente), a dacítica y con texturas porfíricas a vitrofíricas de grano fino a medio, de color gris negro (con poca a nula alteración) y rojizo (con alteración a óxidos de hierro). Presentan alto grado de fracturamiento, con bloques de paredes lisas, baja presencia de vesículas, y presencia de brechas de lava,

estas características indican que corresponden a lava de bloque (Macdonald, 1972). En menor medida se observaron en los techos lavas rugosas y vesiculares características de las lavas AA, algunos autores consideran las lavas de bloque como una textura particular de las lavas AA, otros los clasifican en una categoría distinta (Lockwood y Hazzlet, 2010), por lo que aquí encontraríamos una lava AA con textura de bloque o bien lavas de bloque en mayor proporción y algunas lavas tipo AA.

Las lavas basales (Fig. 19 b) se presentan en los flancos Este y Oeste. En la base del volcán se observan afloramientos de tamaño aproximado de 10 m de altura por 150 m de largo, con bloques de más de 2 m de diámetro. También presenta un alto grado de fracturamiento, paredes lisas y baja vesicularidad ($< 5\%$), por lo que correspondería a una lava de bloques con un mayor grado de erosión, meteorización y alteración respecto de las lavas superiores.

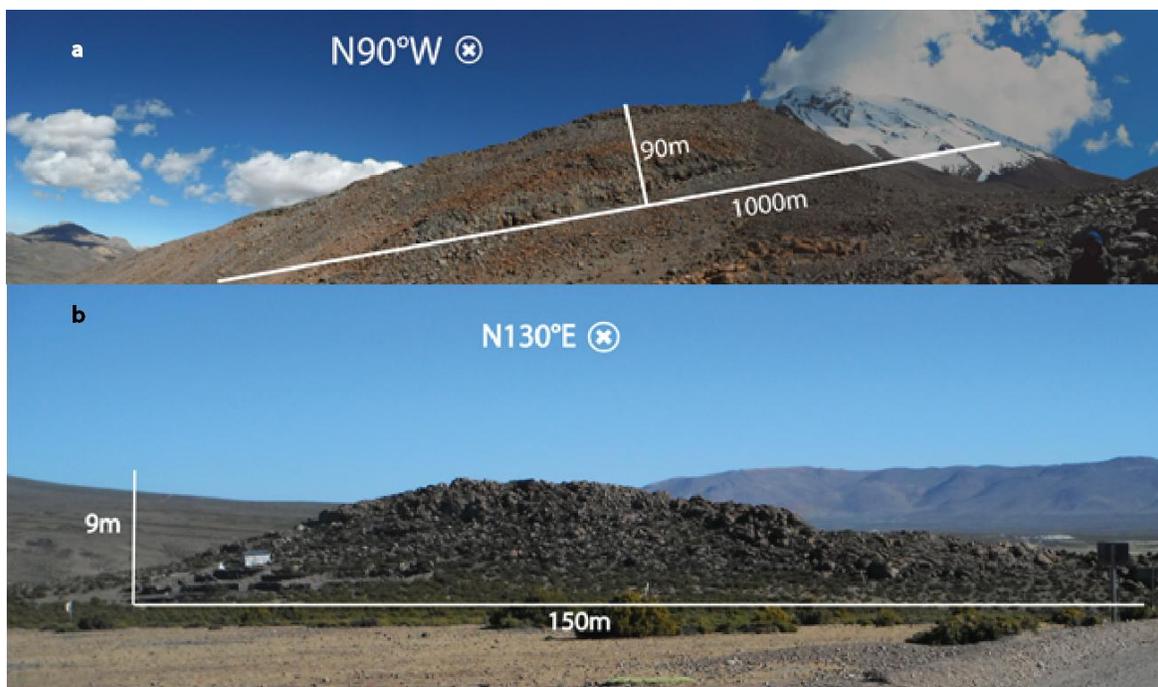


Figura 19. (a) Afloramiento de secuencia de lavas superiores de bloque, de 90 m de altura por 1 km de largo, (b) Afloramiento de lavas basales de bloque de 150 m de largo por 9 m de altura.

3.2. Petrografía

Se realizaron descripciones macroscópicas y microscópicas sobre muestras extraídas de los diferentes depósitos de flujos piroclásticos, lavas y el domo.

3.2.1. Petrografía Macroscópica y Microscópica

Se analizaron un total de 48 muestras macroscópicas (Anexo B) y en el análisis microscópico se describieron 20 cortes transparentes (Anexo C) resumidas a continuación.

3.2.1.1. Depósitos de flujo piroclástico

Se conforman por tobas cristalinas, líticas y vítreas compuestas de matriz (40-50%) tamaño ceniza fina a gruesa, por juveniles (5-30%) de pómez y escoria de tamaño lapilli medio a ceniza, líticos (10-20%) andesíticos a dacíticos de color grisáceo a negros, en la matriz y en los juveniles se distinguen vidrios y cristales (30 a 35%) de plagioclasa, anfíbola y biotita (Fig. 20). Presentan una alteración moderada de óxidos de hierro.

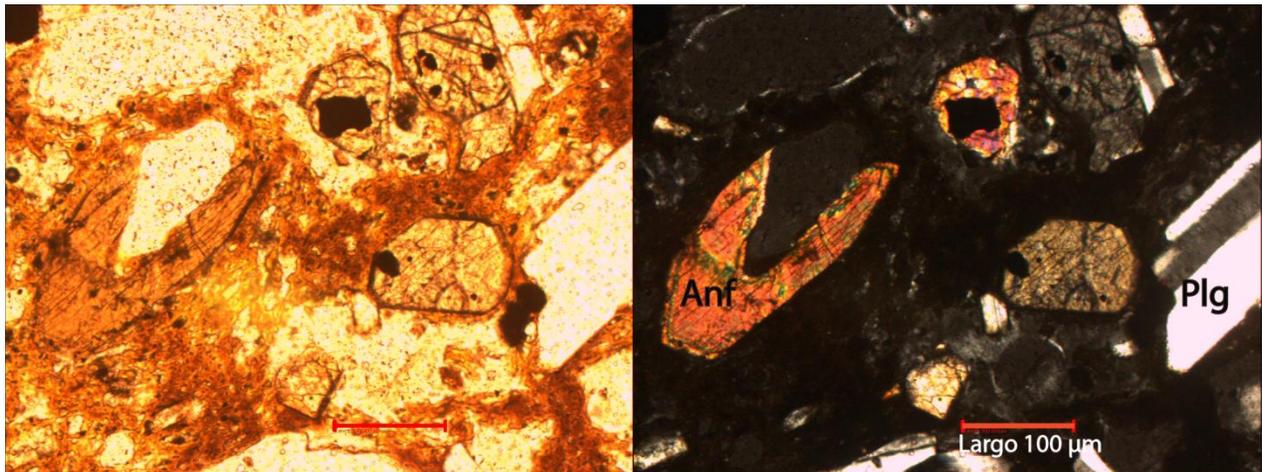


Figura 20. Fotomicrografía de sección transparente representativa de la muestra J13. Se observa una textura fanerítica vitrofírica con cristales de anfíbolos, plagioclasa y biotita. En la plagioclasa en la parte central se observa con textura de zonación oscilatoria, también algunas vescículas. Imágenes a nicoles paralelos (izquierda) y cruzados (derecha). Escala 100 μm .

3.2.1.2. Lavas

La mayoría de las lavas corresponden a andesitas de anfíbola y dacitas en menor proporción, con texturas hipocristalina, vitrofírica, equigranular (tamaño variable dentro del rango de grano fino), zonación oscilatoria, borde de descomposición y glomeroporfírica. Se caracterizan por tamaños de grano fino de cristales (< 2 mm reconocibles) de plagioclasa (20 – 50%), anfíbola (5-30%) (Fig. 21), feldespato (5-15%), biotita (2-5%) y ocasionalmente piroxeno (5-15%) insertos en una masa fundamental vítrea mesocrática de color negro a gris claro. Estructura homogénea y fábrica isotropa, planar y linear.

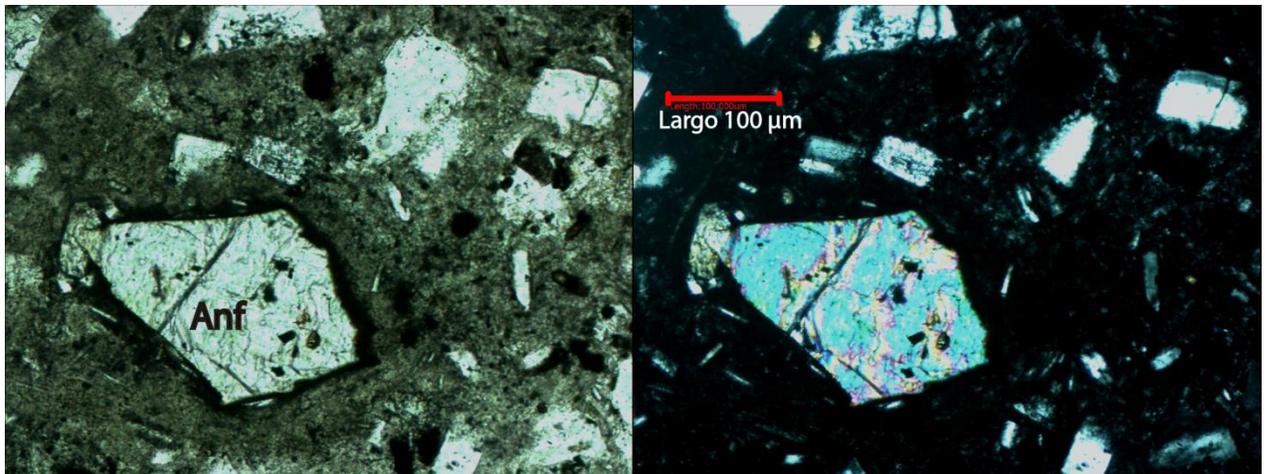


Figura 21. Fotomicrografía de sección transparente representativa de la muestra J45. Se observa una textura fanerítica vitrofírica con cristales de anfíbola y plagioclasa, con borde de descomposición en anfíbola. Imágenes a nicols paralelos (izquierda) y cruzados (derecha). Escala 100 µm.

3.2.1.3. Domo

El domo está compuesto principalmente por Dacitas y Andesitas de biotita. Las muestras presentan una matriz felsosídica, presencia de vesículas (5%), textura porfírica vitrofírica caracterizada por fenocristales de plagioclasa (25%) de grano fino a grueso y biotita (20%) y anfíbola (15%) de grano grueso (Fig. 22). Presenta cuarzo con textura de embahiamiento. Debido a la presencia de biotita y a una masa fundamental felsosídica, se infiere contenido de cuarzo criptocristalino. Se realiza análisis geoquímico para una mejor identificación (Capítulo 3, punto 4).

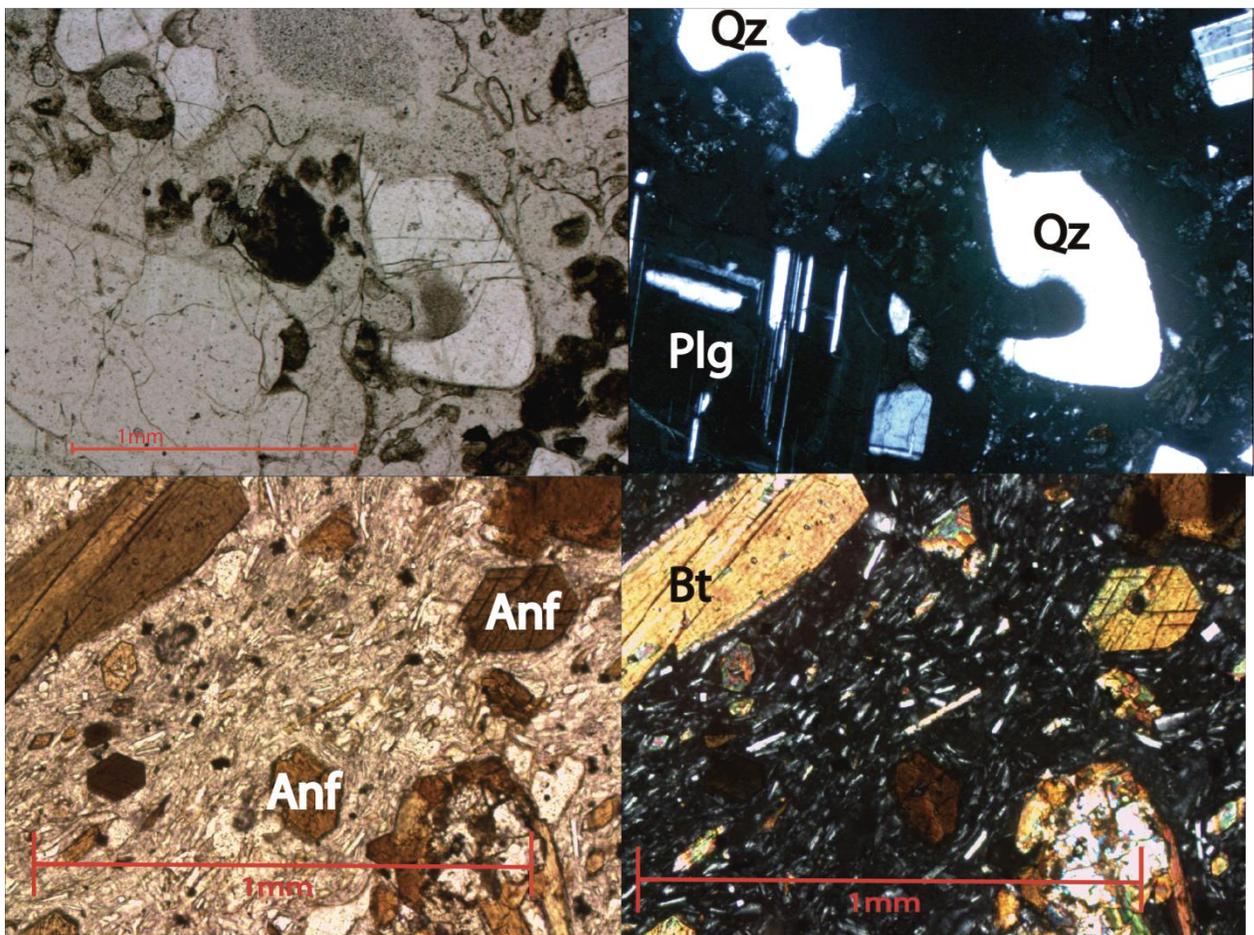


Figura 22. Fotomicrografía de sección transparente representativa de la muestra MG-2 (arriba) y J04 (abajo). En la muestra MG-2 se observa cuarzo con textura de emahiamiento, en ambas se observa una textura fanerítica vitrofírica, en la muestra J04 con cristales de anfíbolos y plagioclasa, con borde de descomposición en anfíbola. Imágenes a nicolos paralelos (izquierda) y cruzados (derecha). Escala 1 mm.

3.3. Geoquímica

Este subcapítulo tiene por objeto mostrar los análisis geoquímicos de elementos mayores y elementos traza (tierras raras y otros). Estos análisis se realizaron en el laboratorio de geoquímica del Departamento de Geología de la Universidad de Chile, determinado con ICP-AES con el fin de caracterizar geoquímicamente a la fuente magmática y a los eventos volcánicos, además solucionar algunas dudas que no se pudieron resolver con la descripción de cortes transparentes y relacionar la composición química de las muestras enviadas a datación con muestras de material juvenil encontradas en los depósitos de flujos piroclásticos más recientes.

Se analizaron 5 muestras MG-2, J-05, J-10, J-103, J-111, todas dentro del área de estudio. De acuerdo a la descripción petrográfica se clasifican como: MG-2 dacita de biotita (muestra tomada del domo), J-05 y J-10 andesitas de anfíbola (lavas superiores), J-103 y J-111 como tobas de lapilli cristalina y vítrea respectivamente (depósitos de flujo piroclástico).

3.3.1. Resultados Elementos Mayores

Los resultados de la geoquímica de elementos mayores se muestran en la Tabla 2, se grafican álcalis totales vs sílice (Fig. 23) normalizados eliminando la pérdida por calcinación (PPC). A partir del gráfico se clasifican las muestras MG-2 que corresponde a traquiandesita, J-103 a andesita, J-10 y J-111 a dacitas, y la muestra J-05 corresponde a una traquidacita. La clasificación de la muestra MG-2 se debe a que el cuarzo presente sería residual por presentar la textura de embahíamiento, ie, sus indentaciones indican que el cristal ha incorporado, durante su crecimiento, algo del líquido silicatado que ha formado más tarde la matriz de la roca (Mackenzie *et al.*, 1982).

Estos resultados clarifican las dudas en las descripciones de cortes transparentes, y quedan como precedente para posteriores estudios geológicos en el área investigada.

Tabla 2. Resultados Geoquímica de Elementos Mayores, normalizado					
	MG-2	J-05	J-10	J-103	J-111
SiO ₂ %	59,1	68,3	63,7	61,0	63,9
TiO ₂	1,1	0,5	0,9	0,8	0,6
Al ₂ O ₃	15,6	15,4	15,7	17,3	16,6
Fe ₂ O ₃	4,6	1,0	3,1	2,9	2,8
FeO	3,3	2,2	2,2	3,0	1,8
MnO	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1
MgO	3,5	1,2	2,8	2,9	2,0
CaO	5,9	2,8	4,8	5,6	4,7
Na ₂ O	3,0	4,0	3,4	3,9	3,8
K ₂ O	3,4	4,5	3,1	2,2	3,3
P ₂ O ₅	0,4	0,2	0,3	0,2	0,3
TOTAL sin PPC	98,18	99,58	98,37	98,31	98,30
TOTAL normalizado	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

TAS (Middlemost 1994)

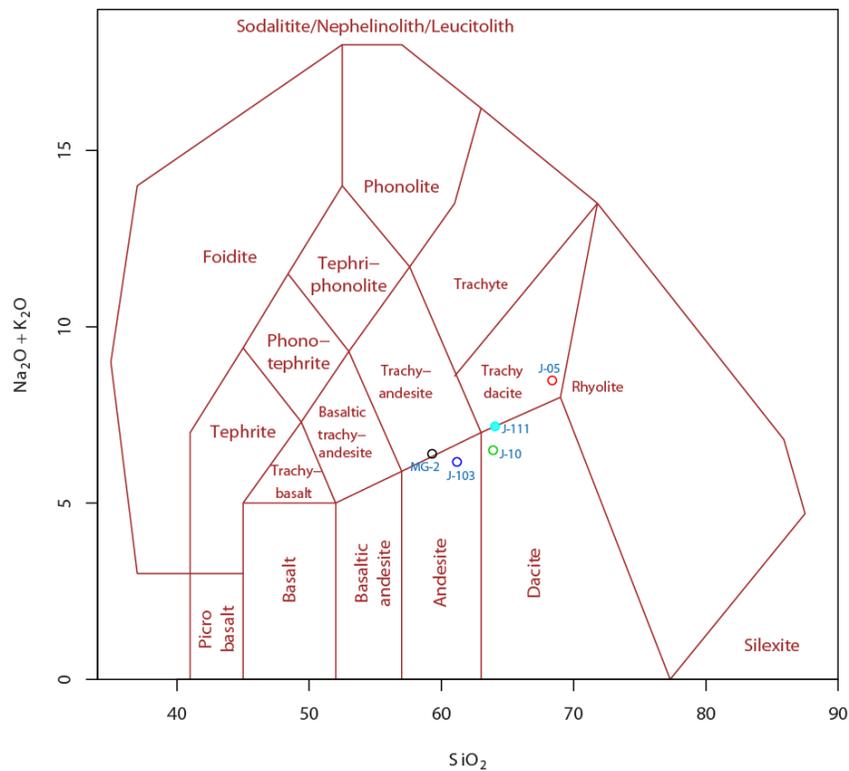


Figura 23. Diagrama de álcalis totales vs sílice con las 5 muestras analizadas. Sobrepuestas están los límites de las composiciones de los diferentes tipos de rocas volcánicas y plutónicas, los nombres plutónicos están dados entre paréntesis (Middlemost, 1994)

3.3.2. Resultados de Elementos Trazas: Tierras Raras

Los resultados obtenidos en la de la geoquímica de las tierras raras (Tabla 3) nos entregan información sobre la fuente magmática de los procesos volcánicos que originaron las muestras analizadas. Hay ciertas características que son interesantes de mencionar; las muestras J-10, J-103 y J-111 presentan similares valores y pendientes en el diagrama spider (Fig. 24); la muestra MG-2 presenta similar pendiente a las anteriores, pero con mayor cantidad en los elementos analizados y una clara anomalía negativa del Eu, no tan evidente en las otras muestras, en tanto que el ejemplar J-05 tiene una pendiente un poco más pronunciada. Para la razón La/Yb (Fig. 25) las muestras J-10 y J-111 presentan gran similitud en sus valores, 17,03 y 16,56 respectivamente, de las restantes, la J-103 ($La/Yb = 12.74$) es la que más se aproxima a estos valores, mientras que la MG-2 tiene el menor valor (6,27) y la J-05 el mayor valor (50,16) de las muestras analizadas.

Posiblemente una misma fuente magmática fue la que generó el o los procesos volcánicos que permitieron la formación de las muestras J-10, J-103, J-111 siendo más claro, para las muestras J-10 y J-111, por una mayor semejanza. Esto no indica que estén asociadas a una misma erupción, pero sí a una misma fuente magmática. De las muestras J-05 y MG-2, se infiere que las diferencias en su composición química pueden deberse a dos causas; un origen con diferentes procesos eruptivos o extrusivos (para el caso del domo) de distintas fuentes magmáticas y una diferenciación del magma en un mismo proceso eruptivo. Por último, la anomalía negativa en Eu indica que la fuente magmática presenta plagioclasas (Best, 2003).

Tabla 3. Resultados Geoquímica de tierras raras , normalizados al condrito

	MG-2	J-05	J-10	J-103	J-111
La ppm	148	224	152	105	148
Ce	123	158	113	82	106
Nd	88	81	71	54	64
Sm	54	36	39	28	33
Eu	25	18	23	17	19
Gd	36	18	23	18	19
Dy	24	6	11	9	10
Ho	21	4	8	8	8
Er	21	3	8	7	7
Yb	20	3	7	7	6
Lu	22	4	7	7	6
Y	24	4	9	8	9

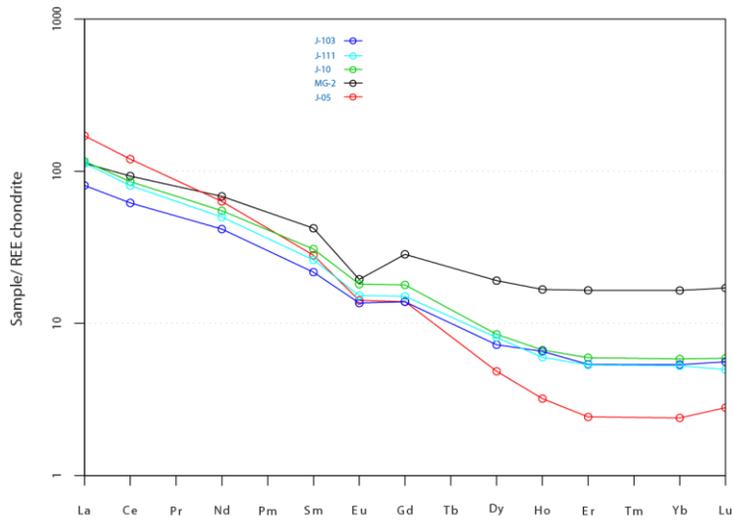


Figura 24. Diagrama Spider con muestras normalizadas al condrito.

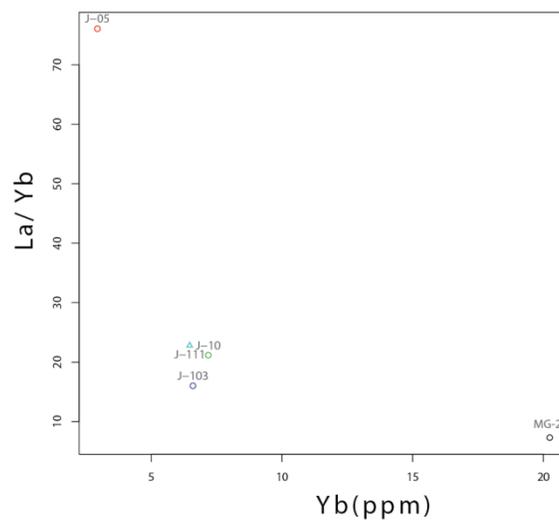


Figura 25. Razón La/Yb vs Yb (ppm), con valores normalizados al condrito

3.3.3. Resultados otros Elementos Trazas

Tanto los resultados de los elementos trazas (que no son clasificados como tierras raras) (Tabla 4), como los observados en las tierras raras, presentan una similitud en los valores de las muestras J-10, J-111 y J-103, como se observa en el gráfico Sr/Y vs Y (Fig. 26) y una gran diferencia de éstos con los resultados de las muestras J-05 y MG-2, que tampoco son similares entre ellos. Lo que permite inferir con mayor certeza que una misma fuente magmática diera origen al o a los procesos volcánicos formadores de estas muestras (J-10, J-111 y J-103).

Tabla 4. Resultados Geoquímica de elementos trazas, normalizados al condrito

	MG-2	J-05	J-10	J-103	J-111
Ba ppm	240,66	494,61	306,22	317,43	356,43
Sr	40,77	70,66	87,19	90,22	88,02
Zr	71,83	60,98	42,12	40,05	45,48

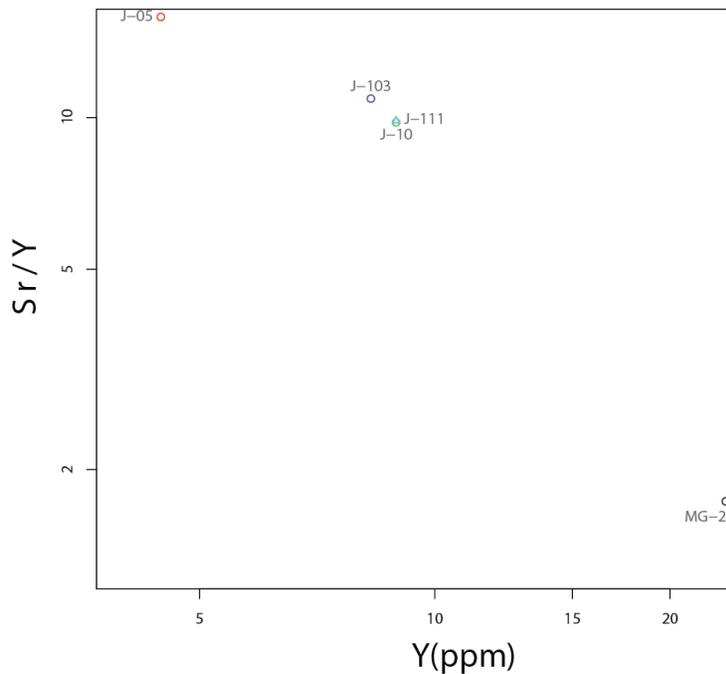


Figura 26. Razón Sr/Y vs Y (ppm), con valores normalizados al condrito

4. Resultados y análisis de dataciones

Los resultados se exponen a continuación en la siguiente tabla.

Tabla 5. Resultados entregados en de dataciones realizadas en el laboratorio de geocronología del SERNAGEOMIN. Detalles en Anexo D.

Muestra	Material	Análisis de step heating		Análisis Isocrona
		Edad Integrada	Edad Plateau	Edad Isócrona
M-G2	Biotita	390 ± 80 ka	340 ± 60 ka	380 ± 180 ka
J5	roca total sin anfíbolos	362 ± 12 ka	363 ± 7 ka	363 ± 8 ka
J10	Anfíbola	---	---	---

Comentarios:

Para las muestras J-5 y MG-2 datadas en masa fundamental (Fig. 27) y biotita (Fig. 28) respectivamente, se indica que los resultados son concordantes, no se aprecia exceso de Ar y se recomienda usar la edad obtenida en el *plateau*.

Para la muestra J-10 intentada datar en anfíbola (Fig. 29) se indica que se intentó realizar en dos oportunidades la datación, pero no fue posible obtener una edad confiable. Se presenta como posible causa el bajo contenido de K de la anfíbola, que puede estar asociado a una edad muy joven de la muestra (Anexo D). Este método presenta dificultades para datar muestras menores a los 20 ka. Para la selección de esta muestra se consideró su ubicación, porque puede relacionarse con los depósitos de flujos piroclásticos al NE del volcán (Fig. 9 y Anexo A). En primera instancia se intentó datar una muestra de estos depósitos, pero fue rechazada en la prueba de factibilidad puesto que presentó alteración, sin embargo, la prueba de factibilidad fue aprobada para la muestra J-10 (Anexo D), aunque no pudo ser datada.

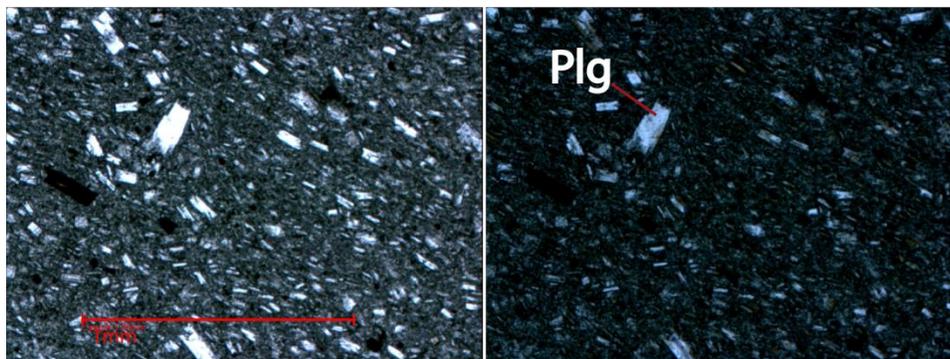


Figura 27. Fotomicrografía de sección transparente representativa de la muestra J-05. Se observa una textura afanítica a vitrofírica con microcristales de plagioclasa. Imágenes a nicoles paralelos (izquierda) y cruzados (derecha). Escala 1 mm.

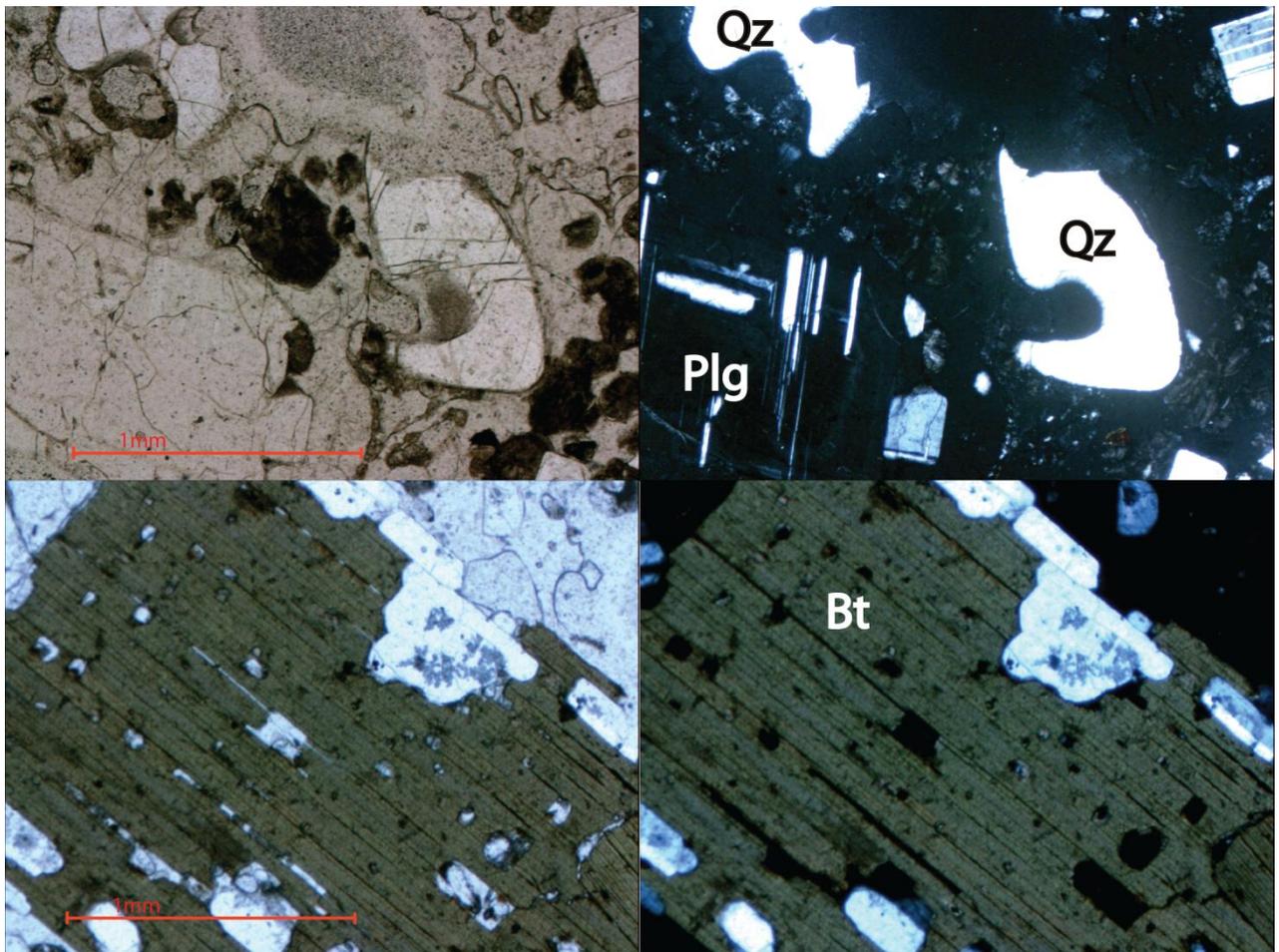


Figura 28. Fotomicrografía de sección transparente representativa de la muestra MG-2. En las fotografías superiores se observa textura de emahiamiento, en ambas se observa una textura fanerítica vitrofírica, en las fotografías inferiores con cristales de 2 mm de biotita y plagioclasa. Imágenes a nicoles paralelos (izquierda) y cruzados (derecha). Escala 1 mm.

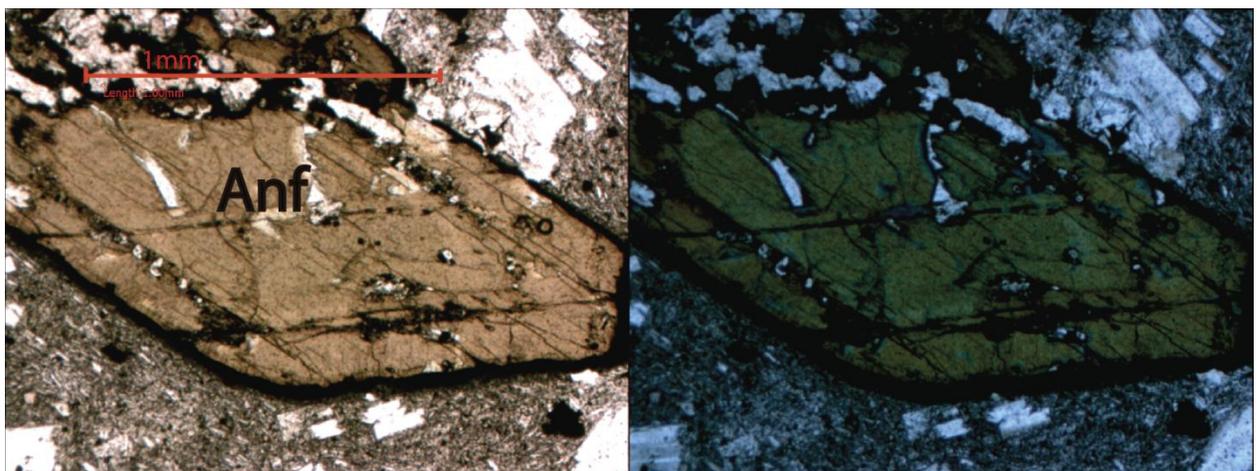


Figura 29. Fotomicrografía de sección transparente representativa de la muestra J10. Se observa una textura fanerítica vitrofírica con cristales de anfíbola y plagioclasa, con borde de descomposición en anfíbola. Imágenes a nicoles paralelos (izquierda) y cruzados (derecha). Escala 1 mm.

5. Modelación y resultados

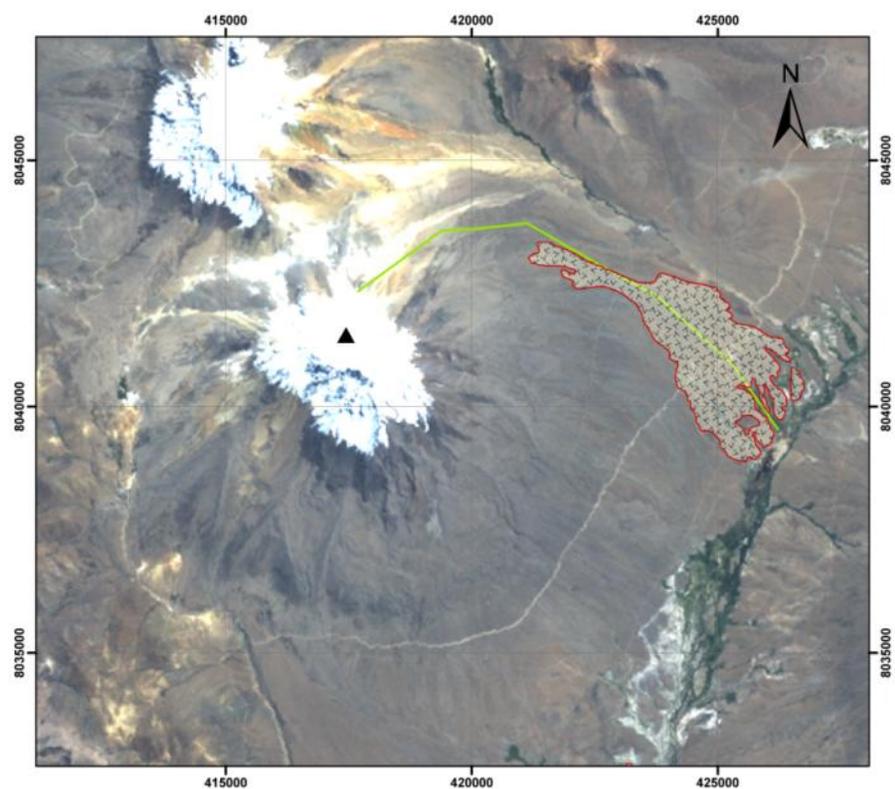
5.1. Modelación y resultados de flujos piroclásticos y avalanchas volcánicas

La modelación se realizó con el modelo computacional LAHARZ que permitió generar conos de energía, la metodología utilizada se explica los puntos 1.5.6. y 1.5.7..

5.1.1. Escenarios eruptivos para flujos piroclásticos

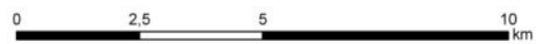
Para estimar escenarios eruptivos del volcán Tacora se toma como referencia al volcán Láscar ubicado a 660 km al Sur de este, cuya actividad es actualmente la mayor de la ZVC (Stern, 2004). Este volcán hizo erupción en 1993 (Gardeweg y Medina, 1994), en la que se produjeron flujos piroclásticos de 3-4 km y hasta 10 km de recorrido y 10 m de espesor máximo y pómez de composición andesíticas y en menor proporción dacíticas. Las lavas anteriores a esta erupción son de similar composición química que las pómez, características de procesos volcánicos similares a las encontradas en el volcán Tacora (Fig. 30). El área de los depósitos de ambos volcanes (15.8 km^2 Láscar, 7.1 km^2 Tacora) tienen un orden de magnitud de 10 km^2 (aproximadamente). Los depósitos del volcán Láscar son mayores en área por $8,7 \text{ km}^2$, si bien, la diferencia es significativa, las magnitudes son de un orden similar.

Sobre la base de lo antes señalado, con especial énfasis en la distancia de 3-4 km para flujos piroclásticos del Láscar, se elige el primer escenario para flujos piroclásticos de 3,5 km para el radio L del cono de energía en la modelación del volcán Tacora.

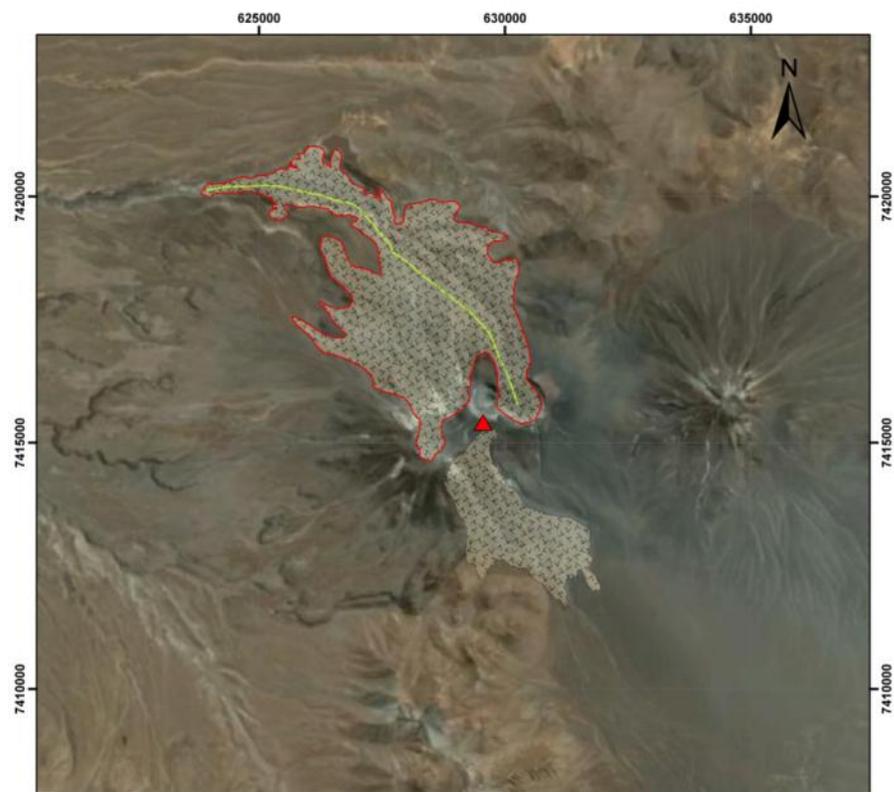


Simbología

- ▲ Volcán Tacora
- Depósitos de flujos piroclástico
- Área cubierta por depósitos de flujo piroclástico = 7,1 km²
- Camino recorrido de Flujos Piroclásticos, de largo L= 10.4 km



1:90.000



Simbología

- ▲ Volcán Láscar
- Depósitos de flujo piroclástico de erupción de 1993
- Área = 15.8 km²
- Largo máximo = 9.9 km



1:90.000

Figura 30. Comparación de depósitos de flujo piroclástico del volcán Tacora con los de la erupción del volcán Láscar de 1993.

En el volcán Tacora, según la información levantada en terreno se reconocieron depósitos de flujos piroclásticos de 9 km del posible punto de emisión distancia que se tomó como referencia para generar el segundo escenario. Para ambos escenarios se estimó la ubicación del conducto volcánico a una altura relativa de $H_{\text{relativa del vent}} = H_{\text{vent s.n.m}} - H_{\text{detención de flujos piroclásticos}} = (5.516 - 4.168 \text{ m s.n.m.}) = 1.348 \text{ m}$. La ubicación de este posible conducto, fue escogida dentro del cráter, en el lugar en que se observaron fumarolas con emisión de azufre y un afloramiento muy fracturado. Ambos escenarios eruptivos se resumen de la siguiente manera:

El primer escenario (S_1) considera una altura de colapso de columna de H_{conemax} de 100 m, con un coeficiente de Heim (H_{conemax}/L) = 0,255.

El segundo y mayor escenario S_2 la altura de colapso de columna es de 300 m. Luego el coeficiente de Heim (H_{conemax}/L) = 0,14.

Las alturas de 100 y 300 m sobre el posible conducto de salida corresponden a la altura de la región jet en la que se produce el colapso de plumas eruptivas, evaluadas en modelos termodinámicos para estas (Woods, 1988; Scandone y Giacomelli, 1998), para VEI 3 y 4 respectivamente (Alberico *et al.*, 2007).

5.1.2. Escenarios para la generación de avalanchas volcánicas

Una avalancha volcánica es una remoción en masa de gran envergadura que requiere un estímulo para generarse, este puede ser una erupción o un sismo, otro factor es la pendiente topográfica del material que puede ser removido, en función de este aspecto se realizó una clasificación de pendientes según Araya Vergara 1985, para estimar los puntos donde podrían originarse avalanchas (Fig. 31).

Para modelar el área de impacto de posibles avalanchas volcánicas se utiliza la misma metodología que para flujos piroclásticos en donde el radio del cono es $L = 12,8 \text{ km}$ y la altura $H = H_{\text{vent s.n.m}} - H_{\text{detención de avalanchas volcánicas}} = (5.380 - 4.010 \text{ m s.n.m.}) = 1.370 \text{ m}$, luego el coeficiente de Heim (H/L) = 0,11 (Fig. 32).

Mapa de Clasificación de Pendientes

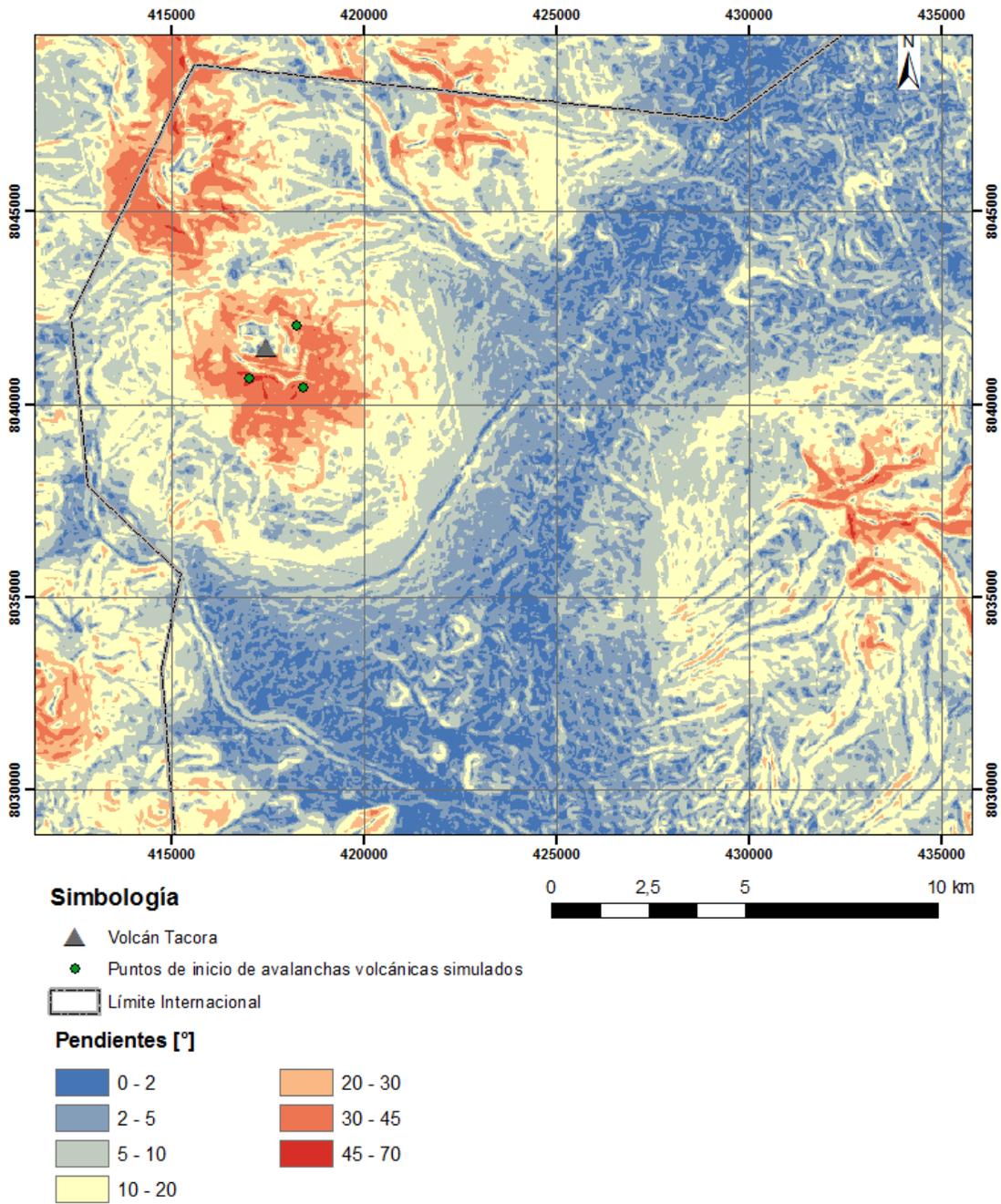
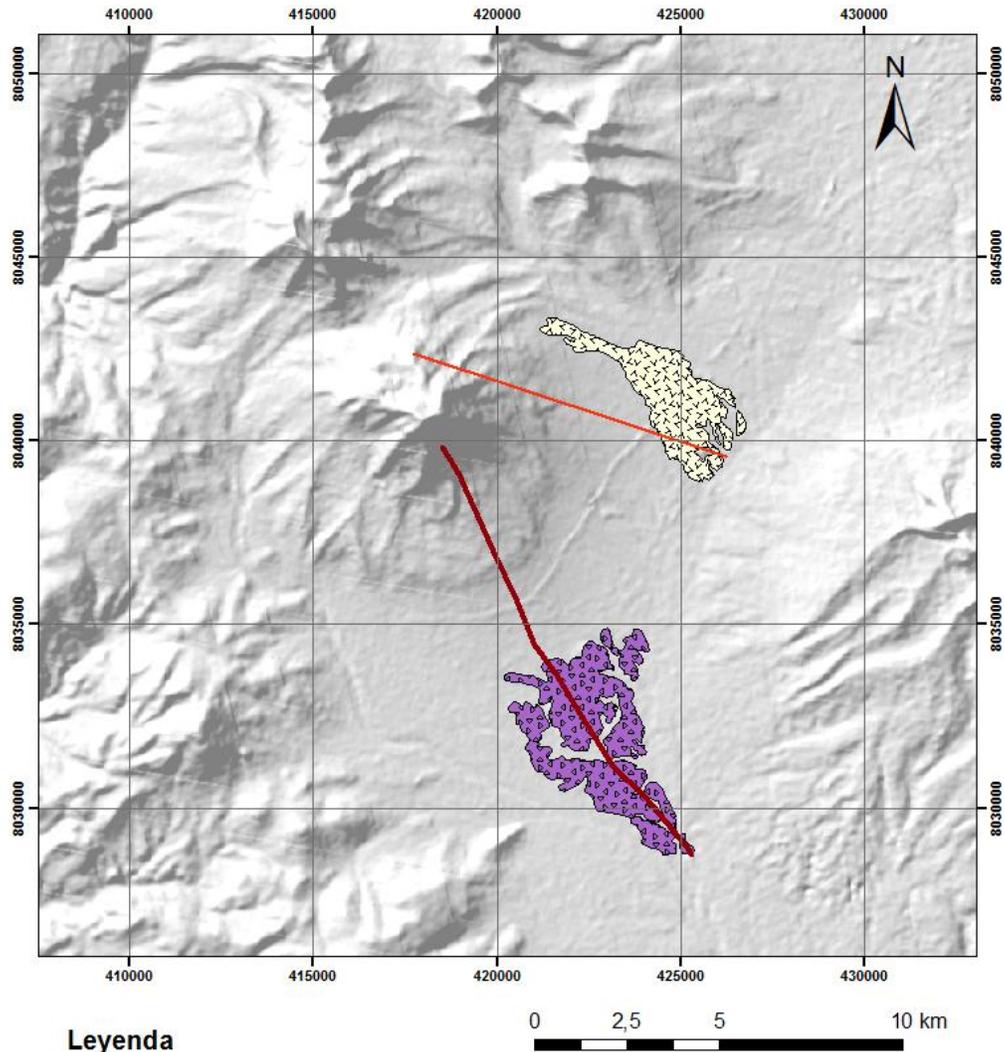


Figura 31. Mapa de clasificación de pendientes en el volcán Tacora (Araya y Vergara, 1985)



Leyenda

-  Depósitos de flujos piroclástico
-  Depósitos de avalancha volcánica con morfología tipo hummock

Simbología

-  Camino recorrido de Avalancha Volcánica de largo L= 12.811 m
-  Distancia máxima de alcance de depósitos de flujo piroclástico de largo L= 9.003 m

Figura 32. Depósito de flujo piroclástico NE, distancia recorrida, desde el vent escogido, hasta donde se encuentran depósitos de flujos piroclásticos L= 9 km y depósito de avalancha volcánica con el posible de lugar de origen hasta donde se encuentran estos depósitos L= 12.8 km.

5.1.3. Resultados de la modelación de flujos piroclásticos y avalanchas volcánicas

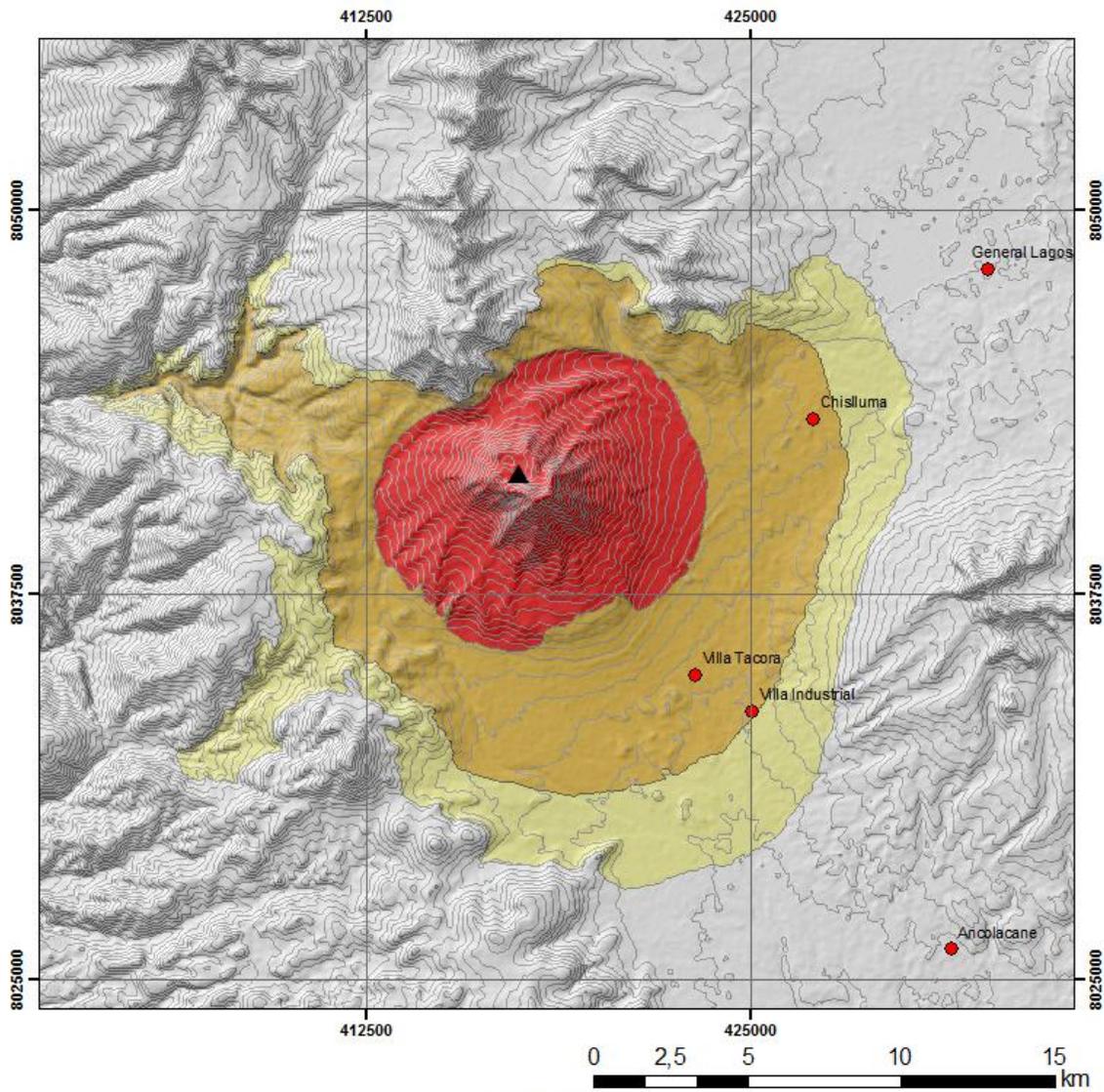
Los resultados de la modelación en LAHARZ de flujos piroclásticos y avalanchas volcánicas (Fig. 33) muestran 3 conos de energía dos corresponden a la zona simulada para los escenarios de flujos piroclásticos y uno para el de avalanchas volcánicas. Sobre la base de los depósitos de flujo piroclástico identificados en el volcán Tacora comparados (punto 5.1.1) con los depósitos originados en la erupción del volcán Lascar (Gardeweg y Medina, 1994) se asume un escenario eruptivo de VEI 3-4, o bien un VEI menor que pudiese generar un flujo de proporciones similares, como ocurre en un colapso de domo. El depósito encontrado en el volcán no tiene las características de un flujo de colapso de domos, pero en el volcán Tacora existen 2 domos identificados por lo que no se descarta la posibilidad de generación de un flujo de este tipo no obstante se estima una probabilidad menor de ocurrencia.

Mediante la modelación de conos de energía, ante la ocurrencia de una erupción explosiva, se estima que los flancos NE y NW que corresponden a una depresión topográfica, son los más susceptibles de ser afectados por flujos piroclásticos y además el lugar de salida de estos flujos se ubicaría con mayor probabilidad en el centro N del volcán, sector aledaño al cráter. De igual manera, en el sector SE se encuentran vestigios que podrían corresponder a depósitos de este tipo de flujo, es posible afirmar que este sector también es susceptible de ser impactado por este proceso volcánico pues corresponde a depresiones topográficas.

El volcán Tacora no está exento de ser afectado por sismos o erupciones, ya que es un volcán activo (Lara *et al.*, 2011) además por su morfología, existen pendientes clasificadas entre los rangos “muy fuerte” a “muy escarpada” (Araya Vergara, 1985) capaces de provocar deslizamientos y derrumbes. Otro factor incidente es la presencia de una falla inferida en las cercanías del volcán (Acevedo 2013) y en el volcán (Contreras 2012), por lo tanto la ocurrencia de avalanchas es posible.

El resultado de la modelación señala un área de 330 km² de radio variable entre 4 km y 13 km, podría ser afectado por avalanchas volcánicas, en todas las direcciones siendo el sector N y NNW el menos afectado, protegido por altos topográficos. Ante una reactivación del volcán Tacora las zonas simuladas para escenarios de flujos piroclásticos también pueden ser afectadas por avalanchas volcánicas.

Zonificación de peligros volcánicos de Flujos piroclásticos y Avalanchas Volcánicas



SIMBOLOGÍA

- Villas y Pueblos
- ▲ Volcán Tacora
- Curvas de Nivel cada 50m
- Zona posiblemente afectada por flujos de densidad piroclástica y avalanchas volcánicas, estimada con coeficiente de Heim $H/L=0.255$
- Zona posiblemente afectada por flujos de densidad piroclástica y avalanchas volcánicas, estimada con coeficiente de Heim $H/L=0.14$
- Zona posiblemente afectada por avalanchas volcánicas, estimada con coeficiente de Heim $H/L=0.11$

Figura 33. Mapas de zonificación de flujos piroclásticos y avalanchas volcánicas mediante conos de energía. Se utilizan diferentes coeficientes de Heim (H/L) detallados en la simbología.

5.2. Modelación de lahares

Para la modelación de lahares (metodología explicada en el punto 1.5.5.2.) el primer paso en la zonificación de peligros con el modelo computacional LAHARZ fue la determinación del agua disponible, estimando escenarios posibles para la generación de lahares.

5.2.1. Escenarios y simulaciones para los lahares

Para realizar la estimación de volúmenes a modelar, se consideraron el clima de tundra por efecto de altura (Instituto Geográfico Militar, 2003) o altiplánico con escasas precipitaciones, estas se presentan en invierno y en verano (Dirección General de Aguas, 2004) la topografía del área de estudio y la nieve presente en el volcán tanto en invierno como en verano por efecto del invierno Altiplánico. Dados estos escenarios se observaron imágenes satelitales en las que se identificaron áreas nevadas (Landsat junio 2004, Landsat enero 2006), se realizó un polígono delimitando el área nevada, posteriormente se identifican cuencas delimitadas mediante la observación de *DEM* y redes de drenaje, a partir de esto se establecieron 11 polígonos. Luego con los polígonos realizados se cortaron curvas de nivel (herramienta Clip de ArcGis), con estas curvas recortadas, se generan modelos *TIN* (*Triangular Irregular Network*), a cada polígono se calcula el área en 3D, es decir considerando la topografía y también el volumen que representa. A partir del área en 3D, se estima el volumen de nieve en cada cuenca, considerando 2 simulaciones:

- (1) Espesor de la nieve en promedio es de 0.1 m
- (2) Espesor de la nieve en promedio es de 1 m

Esta estimación (Fig.34) considera que el volumen total de la cuenca tiene que ser mayor al de la simulación (2), también la simulación (2) presenta volúmenes de un orden de magnitud menor al de simulaciones de lahares en el volcán Villarrica de 10^7 m³ (Castruccio, 2008). Sin embargo no considera que si hay un menor volumen debe haber un área menor, pero si puede considerarse que estos espesores simulan el material detrítico que puede ser arrastrado en el lahar. Se asume en ambas simulaciones que todo el volumen simulado es derretido, sin embargo esto no ocurre en

la realidad pues los espesores de nieve no son homogéneos y la simulación representa solo un promedio.

Tabla 6. Resultados de simulaciones de volúmenes iniciales de lahares, se estima el volumen a partir del área nevada, en 3D, las divisiones de cuencas se observan en la Fig. 34.

Cuencas con Nieve	Simulación 1	Simulación 2
	Volumen (m ³) de nieve estimado con espesor promedio = 0,1 m	Volumen (m ³) de nieve estimado con espesor promedio = 1 m
1	1,15E+05	1,15E+06
2	1,40E+05	1,40E+06
3	2,35E+05	2,35E+06
4	6,07E+04	6,07E+05
5	2,06E+05	2,06E+06
6	4,46E+04	4,46E+05
7	5,53E+04	5,53E+05
8	6,44E+04	6,44E+05
9	1,36E+05	1,36E+06
10	2,62E+05	2,62E+06
11	3,45E+04	3,45E+05

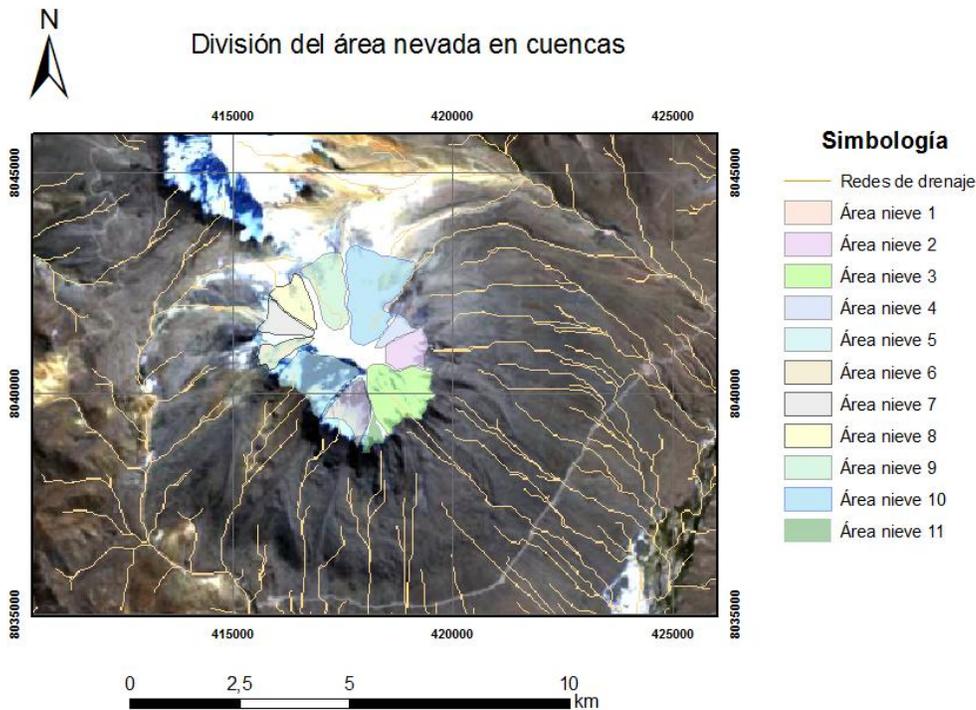


Figura 34. División del área nevada, observada en imagen satelital de Enero 2006, en cuencas para la estimación de volúmenes de lahares.

5.2.2. Resultados de la modelación de lahares

En la modelación de lahares se realizaron dos simulaciones (Fig. 35): una con mayor posibilidad de ocurrencia y menor volumen y la otra de mayor volumen y menor posibilidad de ocurrencia (Tilling 1989).

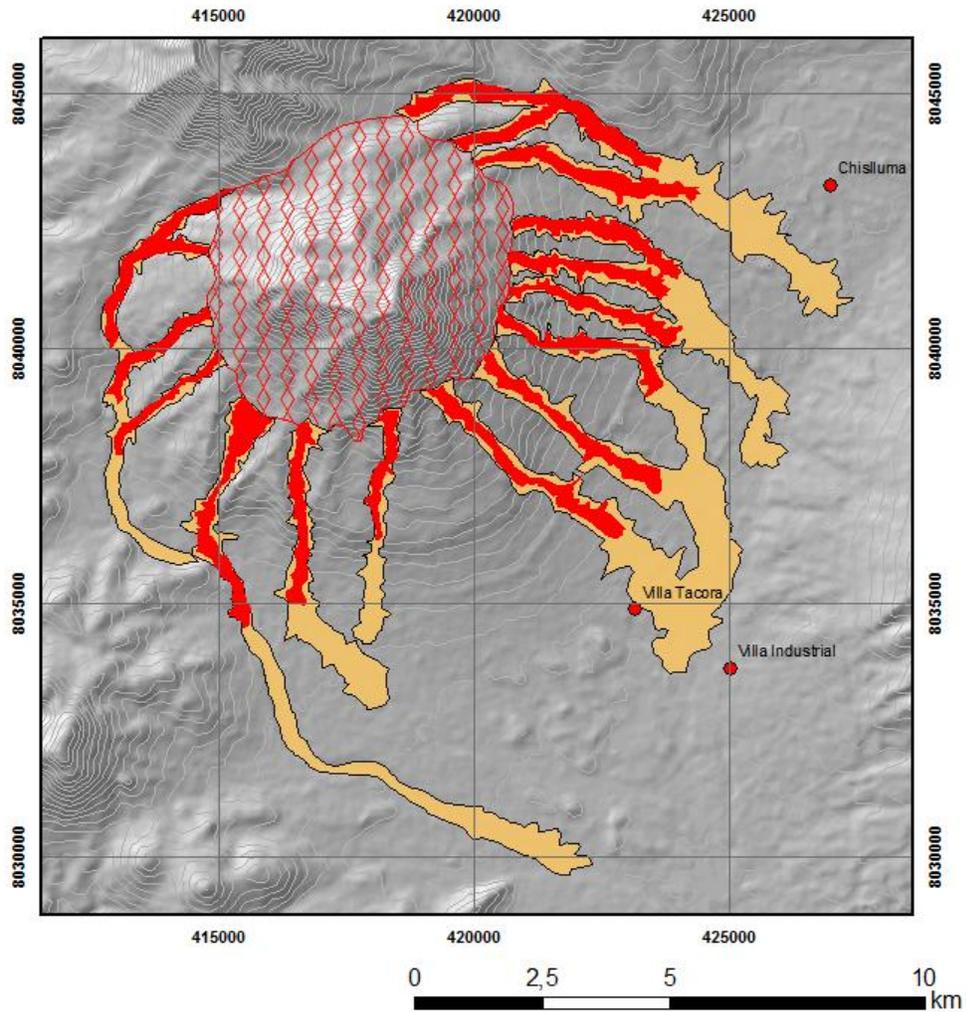
En la primera simulación se observaron lahares cuyas longitudes alcanzaron valores entre los 2,5 km y 5 km, áreas de inundación desde los 0,5 km² hasta 2 km², sin alcanzar zonas pobladas, pues la más susceptible de ser afectada (Villa Tacora) se encuentra a 1,8 km de distancia al Sur del lahar más cercano.

En la segunda simulación se observaron lahares cuyas longitudes alcanzaron valores entre los 4,5 km y 13 km, áreas de inundación desde los 1,6 km² hasta 12,3 km², alcanzando una zona poblada (Villa Tacora) y otras susceptibles de ser afectadas como Villa Industrial distante a 0,8 km del lahar más cercano y Chislluma distante a 1.3 km, de lahar más cercano. También se observa que en la zona W del volcán los lahares presentan un ancho menor, más encauzados que en la zona E.

En ambas simulaciones, considerando la topografía del lugar, se observó que el área menos afectada por los lahares se ubica en el flanco N y en dirección NW. Los más afectados serían los flancos W en dirección Sur y NE en dirección SE. Además en el sector S del volcán los lahares bordean parcialmente los depósitos de avalancha volcánica.



Áreas de posible inundación de Lahares



Simbología

- Villas y Pueblos
- Área de inundación con simulación de volúmenes 1
- Área de inundación con simulación de volúmenes 2
- ▨ Cono de Energía $H/L = 0.44$
- Curvas de nivel cada 50 m

Figura 35. Modelo a partir de resultados de simulación de lahares en el volcán Tacora, con el programa LAHARZ, los volúmenes utilizados en cada simulación aparecen en la tabla 4, y las divisiones de cuencas de dichos volúmenes en la Fig. 34.

5.3. Modelación de caída de piroclastos

La modelación de caída de piroclastos se realizó con el modelo Tephra2 (Bonadona *et al.*, 2005), luego los resultados de la modelación fueron procesados con Matlab y Global Mapper, en la metodología se detallan (1.5.5.3) los *inputs* necesarios, y *outputs* que arroja el programa.

5.3.1. Escenarios eruptivos

Para realizar la estimación de escenarios eruptivos se consideraron datos de terreno, y la información de diferentes erupciones, siendo la erupción del volcán Lascar en 1993, de VEI 3-4 (Amigo *et al.*, 2012) el punto de referencia utilizado, mejor descrita en el punto 5.1.1..

Con base en estos datos se consideraron dos escenarios eruptivos S_1 y S_2 . Siendo S_1 una erupción pequeña vulcaniana mayor y S_2 una erupción mayor, subpliniana tipo Lascar 1993 con alturas de columna entre 10 y 22,5 km s.n.m (Gardeweg y Medina., 1994). Con los siguientes parámetros:

Tabla 7. Escenarios eruptivos para la modelación de caída de piroclastos.

Escenarios	Masa total eruptada (kg)	Altura Columna Eruptiva (km s.n.m)	Diámetro del Grano				IEV (índice de explosividad volcánica)
			Mediana	Desviación estandar	Máximo	Mínimo	
S_1	$5 \cdot 10^{10}$	16	$-2\phi^*$	2ϕ	-6ϕ	2ϕ	2-3
S_2	$5 \cdot 10^{11}$	21	0ϕ	3ϕ	-6ϕ	5ϕ	3-4

* $\phi = -\log_2$ (Diámetro de partícula en mm)

5.3.2. Creación de mapas probabilísticos

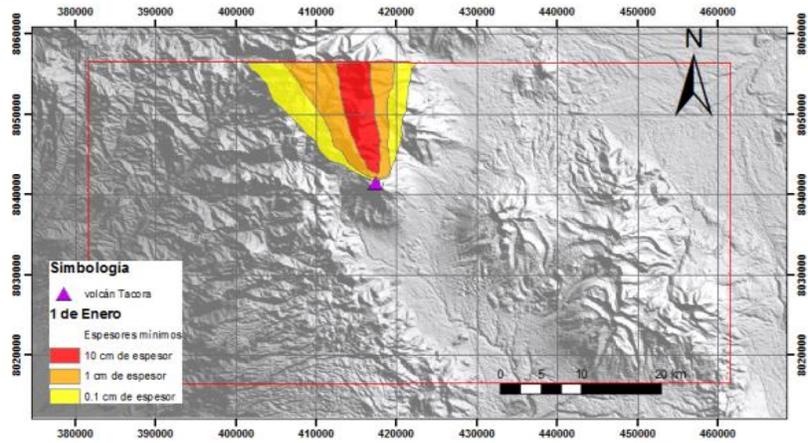
Al Tephra2 se ingresan los datos mencionados anteriormente (viento, topografía y escenarios eruptivos) y este, después de una modelación de 2 semanas realizado en computador del SERNAGEOMIN, genera 1460 (= 4·365, correspondiente a 4 simulaciones diarias, en 1 año de 365 días) vectores de datos por simulación, cada vector con 320.800 (800·401) datos de acumulación de caída de material piroclástico en unidades de masa por metro cuadrado (kg/m^2); lo que fácilmente se puede estimar como espesor, suponiendo una densidad de material piroclástico de $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$. Se presentan algunos de estos resultados en una grilla con coordenadas UTM, WGS 1984, 19S (Fig. 36). Estos fueron escogidos para observar direcciones de vientos en las estaciones con una tendencia marcada en el caso del invierno y con una gran variación en el caso del verano. En verano se presentan vientos en todas las direcciones, siendo hacia el Este y Oeste las predominantes. En invierno la dirección principal es hacia el Este, también se observan hacia el Sur y Norte, con menor intensidad. Lo que se presenta en las estaciones de otoño y primavera es similar a lo observado en invierno, los vientos principalmente en dirección Este, pero se observa una influencia en menor intensidad de vientos hacia el Oeste y Noroeste característico de lo que ocurre en verano.

Estos datos de viento divididos en las estaciones del año: primavera (364 vectores), verano (360 vectores), otoño (368 vectores), invierno (368 vectores). Se definen tres escenarios probabilísticos, que son los siguientes:

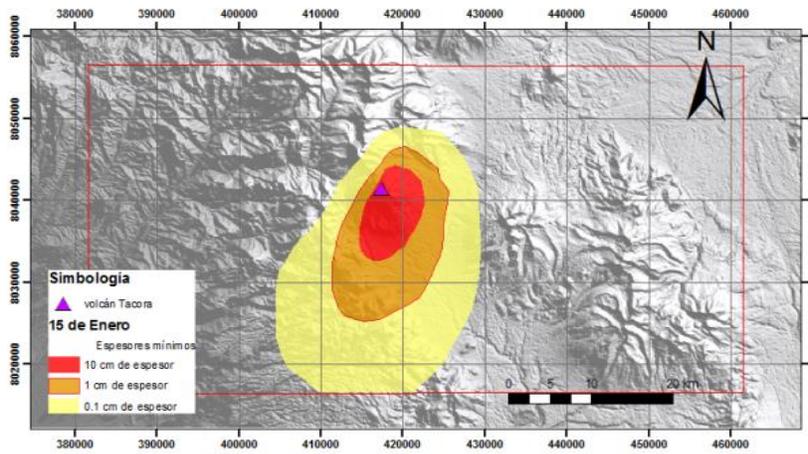
- (1) si la caída es mayor o igual a $10 \text{ kg}/\text{m}^2$ equivalente a 1 cm de espesor.
- (2) si la caída es mayor o igual a $50 \text{ kg}/\text{m}^2$ equivalente a 5 cm de espesor.
- (3) si la caída es mayor o igual a $100 \text{ kg}/\text{m}^2$ equivalente a 10 cm de espesor.

Luego de define una matriz de 800 por 401 de ceros, y se recorre con modelos numéricos utilizando dos pivotes, se suma 1 cada vez que se cumpla un escenario.

Dirección vientos Tacora 1 de Enero



Dirección vientos Tacora 15 de Enero



Dirección vientos Tacora 1 de Mayo

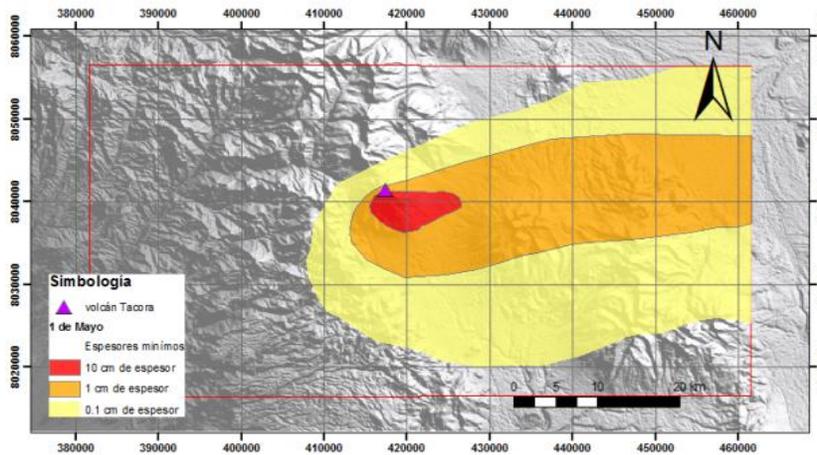


Figura 36. Muestra de resultados modelación en Tephra2, los días fueron escogidos para representar las direcciones de vientos.

5.3.3. Resultados de la modelación de caída de piroclastos

Considerando lo expuesto se obtienen 24 mapas probabilísticos (Anexo E), que integran las estaciones del año, los escenarios descritos anteriormente (S_1 y S_2), y niveles de espesores de caída de ceniza.

En relación a las estaciones del año, es preciso señalar que se utilizaron las de mayores fluctuaciones en los vientos, es decir, las estaciones de verano e invierno.

Referente a los espesores de ceniza, se consideraron 3 niveles mínimos de espesores y a cada espesor se le asignaron 2 probabilidades de ocurrencia (50% y 20% para el escenario S_1 y 50% y 30% para el escenario S_2).

A partir de la información de los 24 mapas probabilísticos se obtienen 8 mapas finales (Figs. 37 a 40); que, además de las 3 variables ya mencionadas (estaciones del año, escenarios y espesores), comprenden la zonificación de las posibles áreas afectadas por caída de ceniza, a diferencia de los mapas probabilísticos que sólo delimitan las zonas (Anexo 3). En los mapas finales estas zonas están diferenciadas por color.

Se observó en gran parte del año (otoño, invierno, primavera) que la zona con mayor probabilidad de ser afectada sería el sector Este del volcán Tacora, con cierta influencia hacia el Sur. En verano por la variación en la dirección de viento, la caída de piroclastos podría producirse en cualquier sector aledaño al volcán, con un área elíptica con centro en el volcán y eje mayor en sentido Este-Oeste.

En invierno, para el escenario S_1 (Fig. 38), las zonas que pueden ser afectadas con un 20% de probabilidad por caída de ceniza de más de 10 cm de espesor, tienen un alcance de 17,5 km, cubriendo un área de 100 km², afectando a la localidad de Chislluma y con un alcance de 45 km la caída de piroclastos de 1 cm de espesor abarca 685 km² afectando, además, al poblado de Chapoco. La zona con mayor probabilidad (50%) de ser afectada en invierno por caída de piroclastos tiene un alcance de 8,3 km, cubriendo un área entre los 12 km² con más de 10 cm de espesor y con un alcance de 20 km, abarcando un área de 88 km² con más de 1 cm de espesor, sin afectar a ningún poblado cercano al volcán, con ambos espesores.

En verano, para el escenario S_1 (Fig. 38), la zona con menor probabilidad (20%) de ser afectada en por este fenómeno, tiene un área elíptica cuyo eje mayor alcanza 11 km, cubriendo 75 km² con caída de piroclastos de más de 10 cm de espesor sin afectar

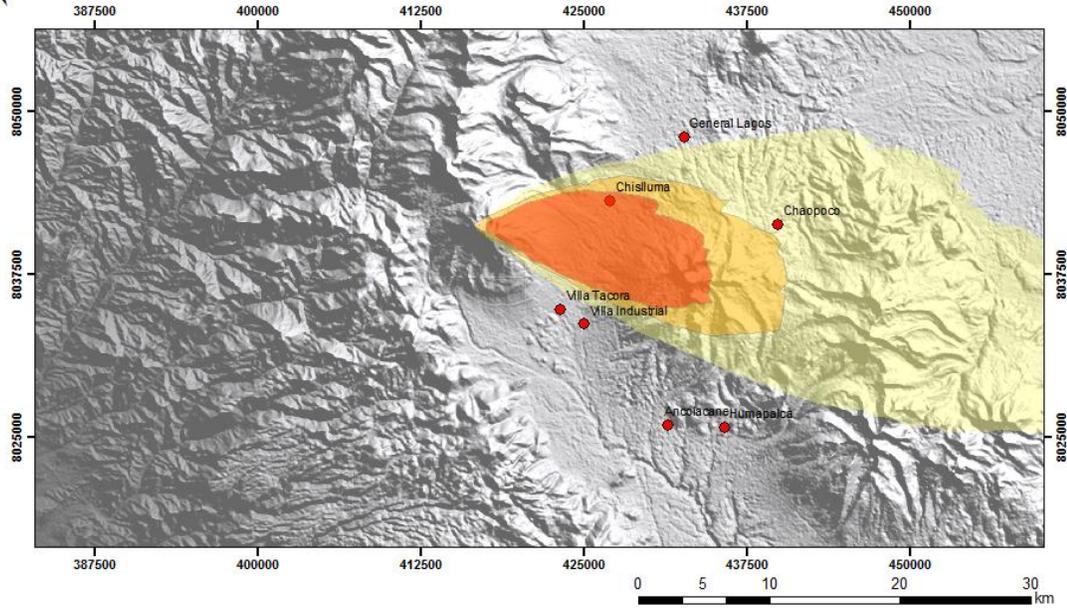
ninguna localidad y un con eje mayor de 26 km, cubriendo 387 km² con más de 1 cm de espesor y afectando a los poblados de Villa Tacora, Villa Industrial y Chislluma. En tanto que la zona con mayor probabilidad (50%) de ser afectada en verano por caída de piroclastos por más de 10 cm de espesor, tiene un área cuyo eje mayor tiene 5,2 km, cubriendo entre los 17 km²; y con más de 1 cm de espesor cuyo eje mayor es de 11 km, cubriendo 68 km², sin afectar a ningún poblado aledaño al volcán.

En invierno, para el escenario S₂ (Fig. 39), la zona con menor probabilidad (30%) de ser afectada por este fenómeno con más de 10 cm de espesor, tiene un área cuyo alcance es de 45 km, cubriendo 417 km², afectando a los poblados de Chislluma y Chapoco; con más de 1 cm de espesor y un alcance de más de 45 km, cubriendo un área de 857 km² como mínimo, afecta las mismas localidades. La zona con mayor probabilidad (50%) de ser afectada por caída de piroclastos, con más de 10 cm de espesor tiene un alcance de 28 km y cubre un área de 115 km² sin afectar localidades; con más de 1 cm de espesor y con un alcance de más de 45 km abarcando un área de 508 km² como mínimo, afecta las localidades de Chislluma y Chapoco

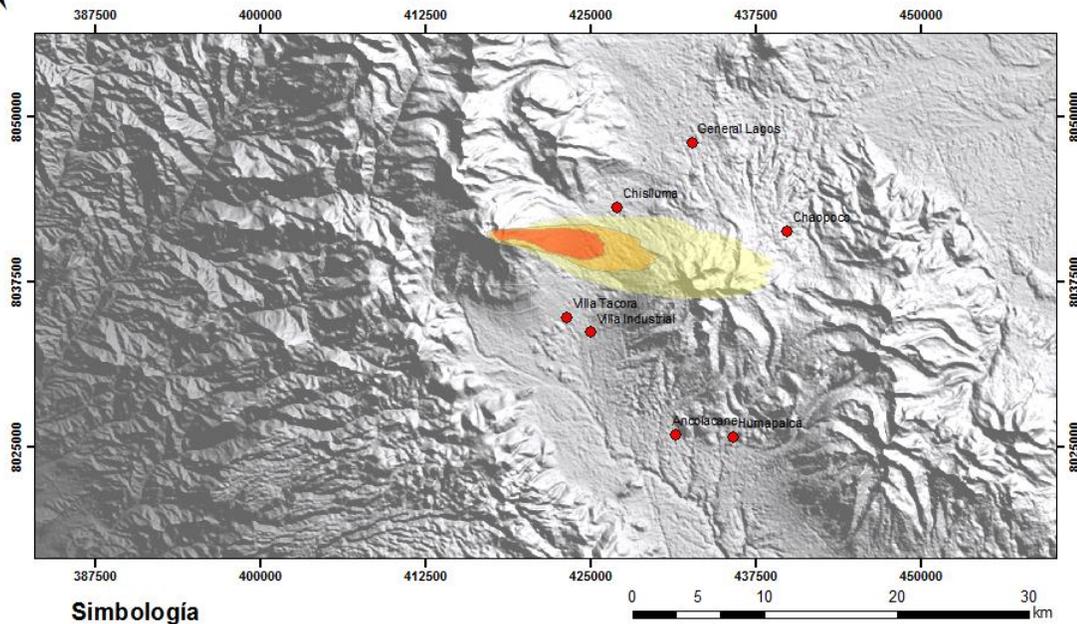
En verano, para el escenario S₂ (Fig. 40), la zona con menor probabilidad (30%) de ser afectada en por la caída de piroclastos de más de 10 cm de espesor, tiene un área elíptica cuyo eje mayor alcanza 30 km, cubriendo 435 km², afecta las localidades de Chislluma y Villa Tacora y Villa Industrial; con más de 1 cm de espesor y un eje mayor de más de 80 km, cubriendo 2980 km², afecta además a los poblados de Ancolacane, Chapoco, General Lagos y Humapalca. En tanto que la zona con mayor probabilidad (50%) de ser afectada en verano por caída de piroclastos de más de 10 cm de espesor, tiene un área cuyo eje mayor es de 16 km, cubriendo 119 km², sin afectar localidades; con más de 1 cm de espesor y un eje mayor de 43 km, cubriendo 851 km², afectando a Chislluma, Villa Tacora y Villa Industrial.



Modelo espesores depósitos de caída, Invierno, Escenario 1, con una probabilidad del 20%



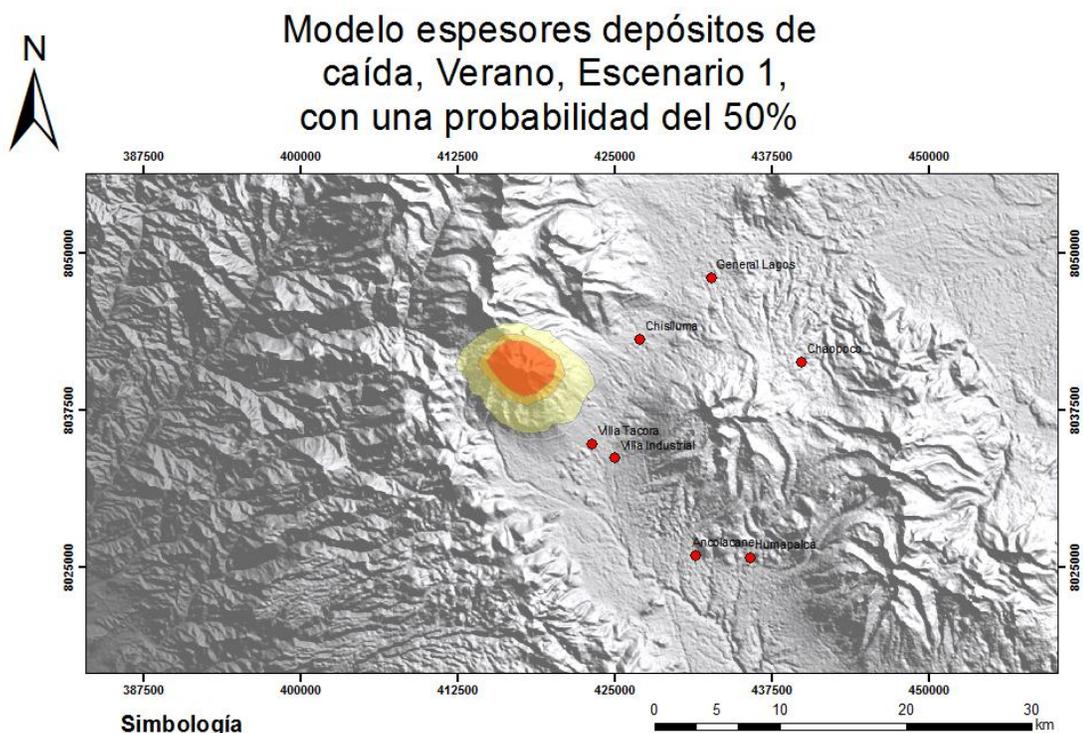
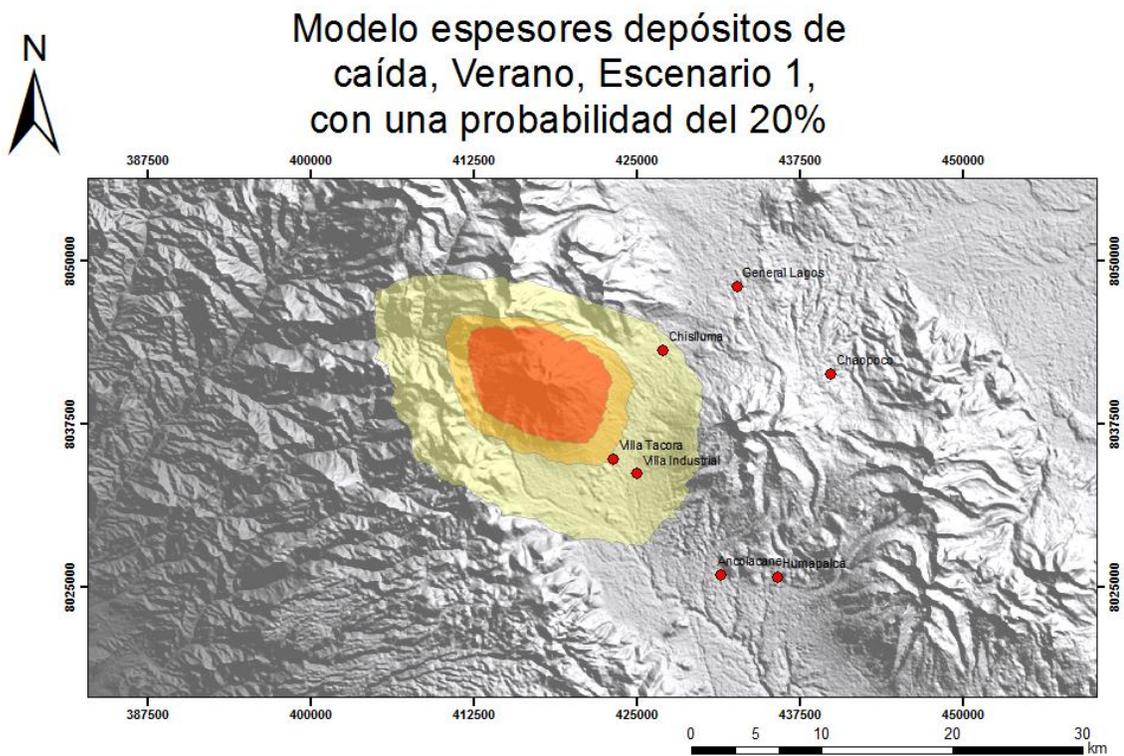
Modelo espesores depósitos de caída, Invierno, Escenario 1, con una probabilidad del 50%



Simbología

- Villas y Pueblos
- Zona que puede ser afectada por caída de ceniza de más de 10 cm de espesor
- Zona que puede ser afectada por caída de ceniza de más de 5 cm de espesor
- Zona que puede ser afectada por caída de ceniza de más de 1 cm de espesor

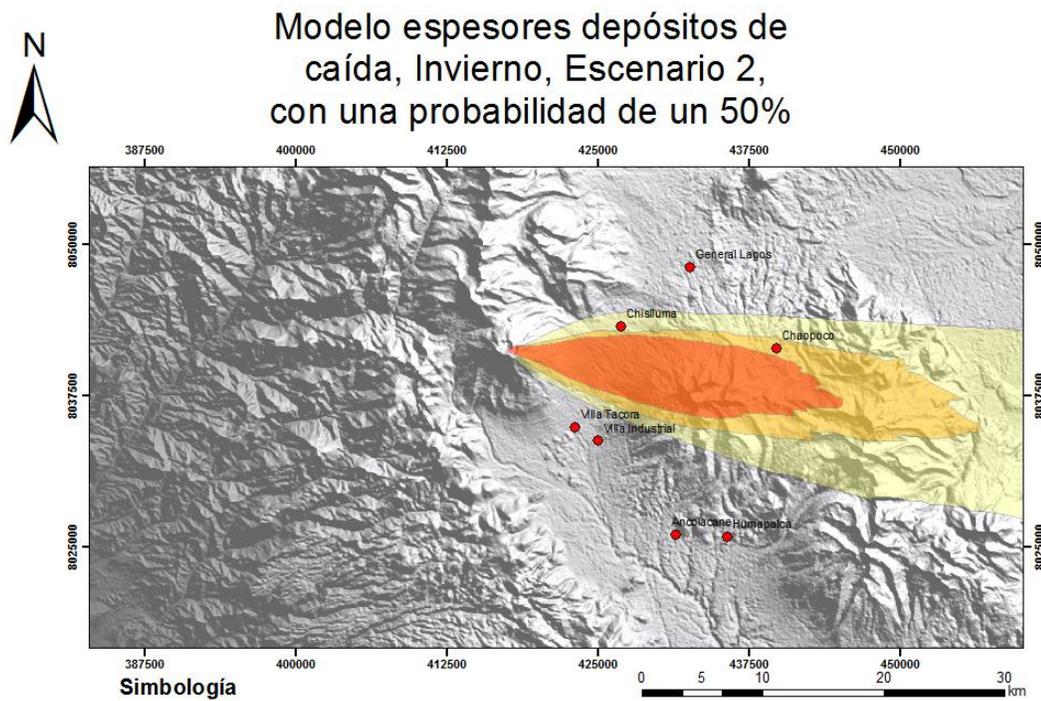
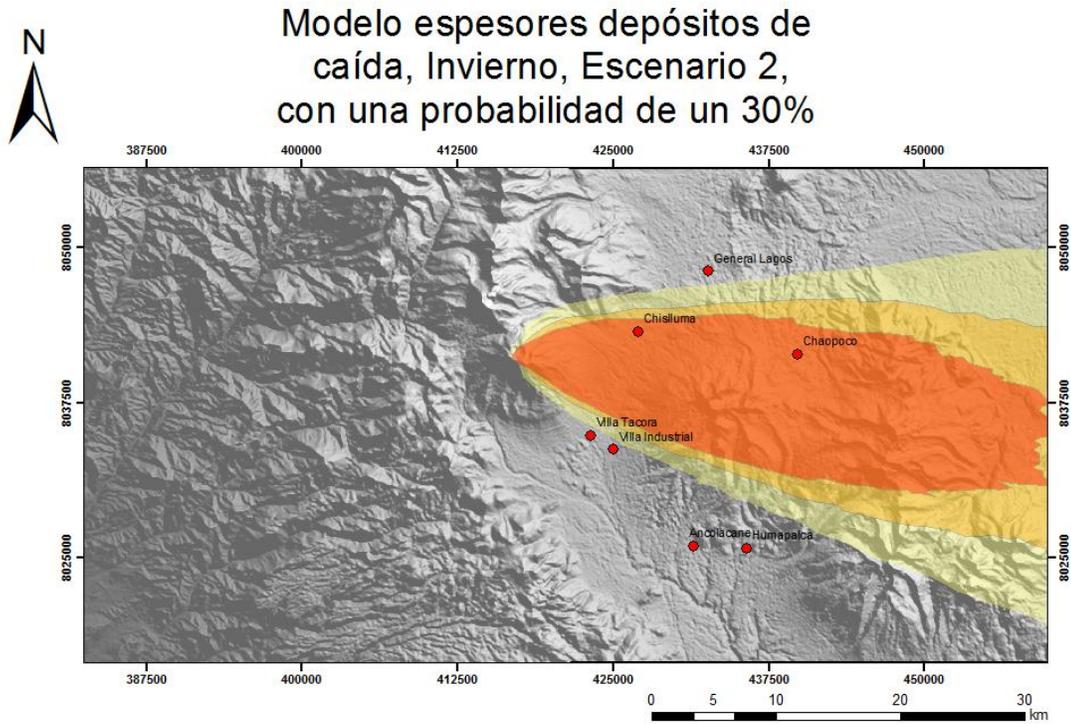
Figura 37. Modelos de espesores de depósitos de caída, en Invierno, en el escenario 1 (VEI 2-3), en la figura superior con una probabilidad de un 20% y en la inferior con una probabilidad de un 50%.



Simbología

- Villas y Pueblos
- Zona que puede ser afectada por caída de ceniza de más de 10 cm de espesor
- Zona que puede ser afectada por caída de ceniza de más de 5 cm de espesor
- Zona que puede ser afectada por caída de ceniza de más de 1 cm de espesor

Figura 38. Modelos de espesores de depósitos de caída, en Verano, en el escenario 1 (VEI 2-3), en la figura superior con una probabilidad de un 20% y en la inferior con una probabilidad de un 50%.

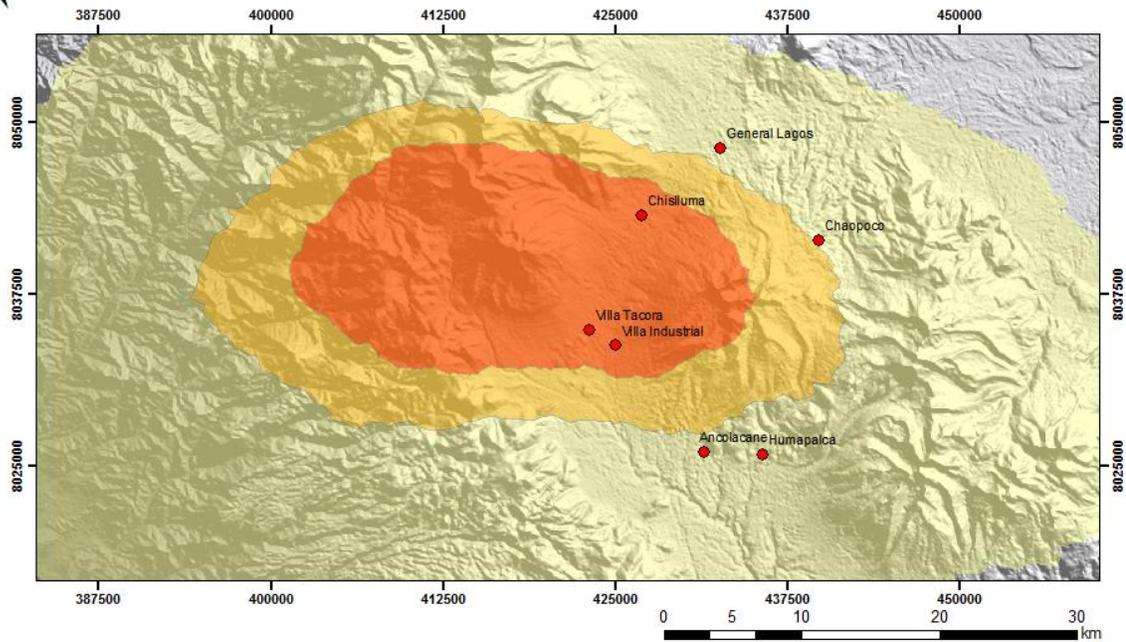


- Simbología**
- Villas y Pueblos
 - Zona que puede ser afectada por caída de ceniza de más de 10 cm de espesor
 - Zona que puede ser afectada por caída de ceniza de más de 5 cm de espesor
 - Zona que puede ser afectada por caída de ceniza de más de 1 cm de espesor

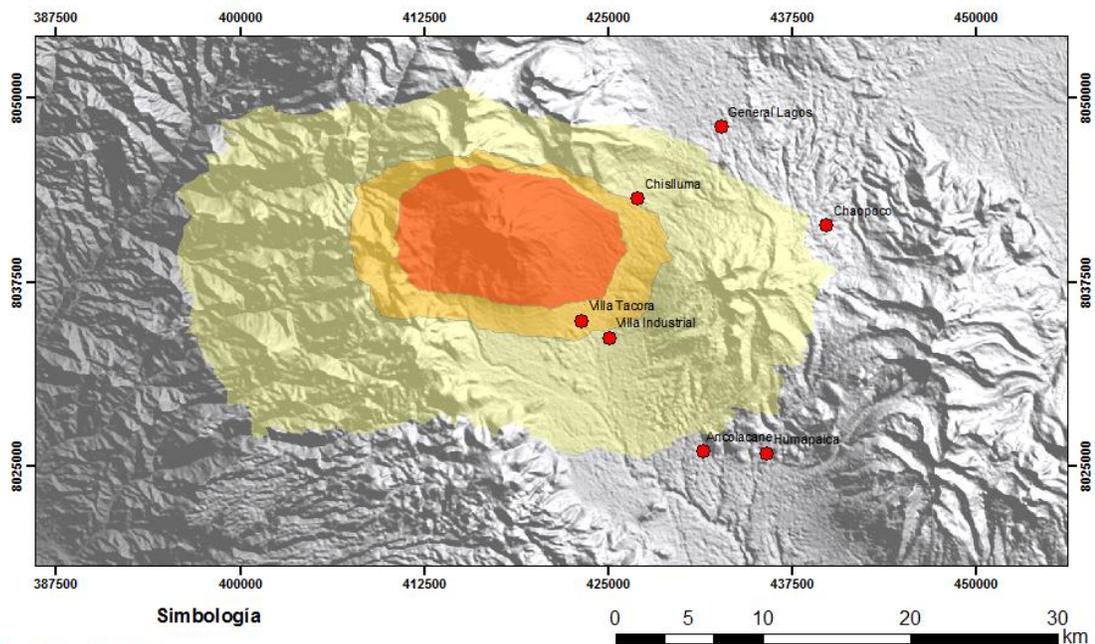
Figura 39. Modelos de espesores de depósitos de caída, en Invierno, en el escenario 2 (VEI 3-4), en la figura superior con una probabilidad de un 30% y en la inferior con una probabilidad de un 50%.



Modelo espesores depósitos de caída, Verano, Escenario 2, con una probabilidad de un 30%



Modelo espesores depósitos de caída, Verano, Escenario 2, con una probabilidad del 50%



- Simbología**
- Villas y Pueblos
 - Zona que puede ser afectada por caída de ceniza de más de 10 cm de espesor
 - Zona que puede ser afectada por caída de ceniza de más de 5 cm de espesor
 - Zona que puede ser afectada por caída de ceniza de más de 1 cm de espesor

Figura 40. Modelos de espesores de depósitos de caída, en Verano, en el escenario 2 (VEI 3-4), en la figura superior con una probabilidad de un 30% y en la inferior con una probabilidad de un 50%.

6. DISCUSIÓN

6.1. Eventos eruptivos del volcán Tacora

A partir de la realización de la cartografía escala 1:25.000 (Mapa Anexo A) y la obtención de edades se reconocen diferentes eventos eruptivos del volcán Tacora. Es posible decir que el volcán tuvo actividad eruptiva al menos en el Pleistoceno Medio, generando lavas (superiores) andesíticas a dacíticas (362 ± 7 ka), extrusión del domo (en el centro norte del volcán) (340 ± 60 ka) y flujos piroclásticos no datados, este último proceso volcánico se ubica al W del volcán. De las avalanchas volcánicas suponemos un origen de similar edad o de máxima edad, pues las descripciones de muestras de mano y de cortes transparentes se acercan o se correlacionan a las realizadas en lavas de esa edad, aunque los bloques presentes en los depósitos de avalanchas pudieron tener una formación anterior a la extrusión de estas lavas, la opción de que la avalancha volcánica del Sur del Tacora sea de época Pleistoceno aún es válida, pues esta pudo arrastrar material del edificio volcánico más antiguo.

Las avalanchas volcánicas pueden ser generadas por erupciones magmáticas (tipo Benzymianny, Rusia), por erupciones freáticas (tipo Bandai, Japón) o en ausencia de erupciones (tipo Unzen, Japón), en el caso del Tacora de haberse producido este último tipo de avalancha solo podemos suponer que la edad de esta tiene como data máxima el Pleistoceno Medio.

Otro evento eruptivo que podemos mencionar es el que generó una lava dacítica observada en un afloramiento pequeño ($0,015 \text{ km}^2$) en la parte centro norte del volcán (Mapa Anexo A.), esta erupción posiblemente es de una magnitud menor que las anteriores, esta muestra fue datada (García *et al.*, 2012) en biotita obteniendo una edad de 50 ± 20 ka.

La unidad de depósitos de flujos piroclásticos (Qvpf) se encuentra en gran parte, sobre la formación Visviri (Plioceno Pleistoceno) (Plpa) y en menor medida sobre los depósitos glaciares de morrenas (Qg), posteriores a 21 ka (máximo glaciar), a esto se suma que la muestra J10 (Figs. 27 y 30 y punto 4.1) no se haya podido datar, por lo tanto es posible que sea menor a 20 ka, apoyado en las características físicas del

depósito (Puntos 3.1.1, y 3.2.1.1) y en la relación geoquímica, tanto en los elementos mayores y los trazas, principalmente en las tierras raras, entre la muestra J-10 (lava) y la J-111 (perteneciente al depósito de flujo piroclástico). Esto nos hace pensar que se generó en una erupción menor a 21 ka (antes del presente), o incluso menor, pues el periodo de glaciación terminó hace 14 ka (Ammand *et al.*, 2001, García *et al.*, 2012).

6.2. Aplicabilidad y limitaciones de modelos

La utilización de modelos computacionales en volcanes con ausencia o escasez de estudios, es el primer paso para la zonificación de peligro. En esta investigación se utilizaron dos tipos de modelos computacionales que permitieron establecer zonas de peligro en un volcán poco estudiado como lo es el volcán Tacora.

6.2.1. LAHARZ

En esta investigación se utilizó un módulo del LAHARZ para simular el área que podría verse afectada ante un eventual flujo piroclástico y/o avalancha volcánica. El modelo fue utilizado a cabalidad para estimar el área que puede verse afectada por lahares.

Para los flujos piroclásticos se utilizó el método del cono de energía y se aplicó al volcán Tacora considerando posibles valores de la altura del lugar de salida de los flujos piroclásticos (H) y la proyección de la distancia que podrían alcanzar estos flujos (L). El lugar de salida de los flujos piroclásticos pudo ser estimado en base a la ubicación de fumarolas y fracturas en el cráter, la estimación puede ser mejorada a través del monitoreo de gases en fumarolas, monitoreo sísmico o evidencias geofísicas (Malin y Sheridan, 1983), sin embargo, estas condiciones se localizan solo en el flanco centro norte del volcán, por lo que las variaciones deberían estar en este sector.

Se utilizaron dos distancias L: 3,5 km y 9 km, la primera se estimó utilizando como referencia las distancias promedios que alcanzaron los flujos piroclásticos encontradas en la erupción del volcán Láscar (Gardeweg y Medina, 1994) como se especifica en la Tabla 8. El segundo parámetro de la distancia L, se estimó considerando la distancia máxima entre el posible lugar de origen y los depósitos de flujo piroclásticos identificados en terreno. Este parámetro es discutible pues la erosión, transporte y/o degradación los afecta en alguna medida. Para mejorar esta

aproximación se podrían hacer estudios acerca de la degradación o erosión de estos depósitos en la zona.

Tabla 8. Comparación del volcán Tacora con volcán Lászar (Gardeweg y Medina 1994; Gardeweg *et al.*, 2004).

		volcán Tacora	volcán Lászar
Composición y tipos de lavas		Lavas de bloque andesíticas (principalmente) porfíricas y vítrofíricas y dacíticas (en menor medida)	Lavas de bloque andesíticas (principalmente) porfíricas y vítrofíricas y dacíticas (en menor medida)
Presencia de domos		si	si
Depósitos de flujos piroclásticos	Distancia recorrida desde la fuente (en promedio y máxima)	-- y 10,4 km	3-4 y 10 km
	Espesores máximo y promedio	6 y 2 m	10 y 3m
	Área	7,1 km ²	15,8 km ² *
	Facies	Vítreas escoriacia	Pumicea (Vítrea) y Lítica
	Composición	Andesítica	Andesítica
Altura		5.980 m.s.n.m (1700 m desde su base).	5.592 m s.n.m. (1600 m desde su base)
*Esta área corresponde al mayor depósito de flujos piroclásticos del volcán Lászar de la erupción de 1993			

En ausencia de depósitos de flujo piroclásticos otros autores han utilizado un coeficiente de Heim (H/L) de 0,1 (Alberico, *et al.*, 2008) correspondiente a la tangente de la pendiente del cono de energía de 6°, que sería menor, pero similar al coeficiente de Heim obtenido (0,14), el área afectada es menor con este último valor, pero en el contexto de la Zona Volcánica Central, en base a lo observado en los depósitos de la erupción del volcán Lászar de 1993, se estima que esta aproximación es mejor.

Para las avalanchas volcánicas también se utilizó el método del cono de energía implementado con un módulo de LAHARZ, además se consideró el criterio de clasificación de pendientes para remociones en masa para estimar los puntos que referencian las zonas de origen. Para modelar el comportamiento físico de las avalanchas volcánicas existen múltiples propuestas, sin embargo empíricamente se ha observado una buena correlación entre el desnivel (H) y el alcance final que logran (L) (Dade y Huppert, 1998), justificación que explica la aplicación de este método.

El parámetro H hace referencia a lugares que presentan pendientes

escarpadas, la ubicación de los puntos que representan las zonas de posibles inicios de avalanchas volcánicas podría conocerse mejor determinando la fisonomía y vergencia de una falla en el volcán Tacora por medio de estudios pertinentes. La distancia L, puede discutirse de similar manera que para los depósitos de flujos piroclásticos, no obstante se estima que presenta menor grado de erosión y degradación que los flujos piroclásticos por su composición de clastos y bloques de lava de mayor densidad y dureza que las pómez.

Para la generación de lahares el primer paso en la zonificación de peligros con el modelo computacional LAHARZ fue la determinación del agua disponible. El volcán Tacora está asociado a periodos de ocurrencia de precipitaciones que son invierno y verano (Dirección General de Aguas, 2004), estaciones en las que se acumula nieve en el volcán. Basado en esta información, se determinaron las posibles áreas de generación de lahares, se consideraron laderas altas (10-30°), zonas cubiertas de nieve y presencia de sedimentos no consolidados. Con las fuentes de agua identificadas se pudo realizar una estimación de volúmenes, considerando el área cubierta por nieve, la topografía, la identificación de cuencas y se limitó, comparándose con volúmenes de lahares del volcán Misti y del volcán Villarrica. Fue necesario estimar el punto de inicio de inundación de lahares que correspondería al límite de la zona nevada, lugar que presenta sedimento no consolidado

Si comparamos el mapa de peligro del volcán Misti (Mariño *et al.*, 2007) considerando que presenta lahares cuyas longitudes son del orden de los 25 km desde la fuente y volúmenes simulados de $1.5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ y $4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (Vargas Franco *et al.*, 2010) y que este volcán se encuentra en la ZVC (16°17'40"S, 71°24'32"O, 5.822 m s.n.m.) a 232 km al NW del volcán Tacora, su clima es catalogado como tropical y con historia eruptiva mayor (de Pablo, 2011), con el mapa de peligro del volcán Tacora, cuyo clima es clasificado como tundra con precipitación estival o altiplánico con escasa precipitación, los lahares deberían ser de menor envergadura con longitudes máximas de 13 km hacia SSE (Fig. 36) y volúmenes entre $3,45 \cdot 10^4 \text{ m}^3$ a $2,06 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (Tabla 6), como lo demuestran las simulaciones.

Todos los procedimientos utilizados en lahares permiten aplicar estos modelos sin mayores estudios geológicos presentando las siguientes limitaciones:

- Se utilizan simplificaciones, como por ejemplo el uso de un volumen constante, la determinación arbitraria del punto a partir del cual se comienza a depositar

el flujo lahárico (Castruccio, 2008).

- El calibrado del modelo fue realizado con depósitos y flujos laháricos y no laháricos, ocurridos en otros lugares que pueden tener un comportamiento distinto al de los volcanes de Chile de la Zona Volcánica Central de Los Andes.

- La determinación del límite *nival* a través de la observación de imágenes satelitales, dista de ser un dato estadístico porque solo en dos oportunidades se observó presencia de nieve (junio 2004 y enero 2006), por lo que un monitoreo de imágenes satelitales más acabado podría mejorar la determinación de este límite.

6.2.2. Tephra2

Un aspecto positivo de la utilización del modelo Tephra2 es que permite realizar estudios de peligro probabilístico, con diferentes escenarios y estimarlos con escasos datos geológicos, de hecho para este estudio no se encontraron depósitos de caída piroclástica que se atribuyeron, al volcán Tacora, sin embargo se pudo estimar dos escenarios eruptivos generando un modelo probabilístico de impacto.

La dificultad para encontrar depósitos de caída cercanos al volcán Tacora puede deberse a la acción de diversos agentes naturales, las condiciones de viento, clima y escasa vegetación, como se ha observado en los depósitos de caída de la erupción del Lascar en 1993, que han disminuido considerablemente aun siendo recientes. Otros factores podrían corresponder a que los depósitos originales no fueron de un espesor importante facilitando su erosión o degradación.

6.3. Ocurrencia de lahares

Lahar es un término general para clasificar una mezcla compuesta por barro y detritos que fluye rápidamente, de origen restrictivo en volcanes y que no sean de un caudal normal (Smith y Fritz, 1989). La génesis de los lahares está ligada a: actividad volcánica, actividad sísmica, deformación volcánica, fuertes lluvias, derretimiento de nieve o hielo, erupciones en lagos cratericos (*crater lake*) y deforestación (Lockwood y Hazlett, 2010).

Asociado al sismo Mw 8.4 de Junio 2001 en Arequipa se produjo un flujo de barro y detrito por el colapso de un bofedal en las laderas de los volcanes Chopiquiña y Tacora (Naranjo y Clavero, 2005). Este puede clasificarse como un lahar por el lugar de origen

y su composición detrítica de material volcánico, no obstante se compone también de material orgánico, característica que lo hace peculiar.

La presencia en el volcán Tacora de algunos factores como: sismicidad (Clavero *et al.*, 2005), lluvias, zonas nevadas (en invierno y verano), y laderas con material detrítico no consolidado, altas pendientes (Fig. 31) y escasa vegetación, permite inferir que los lahares son el proceso volcánico con mayor posibilidad de ocurrencia en el sector de estudio .

6.4. Ocurrencia de flujos de lavas

La mayor parte del edificio volcánico observado en superficie, está compuesto por lavas de bloque, la más joven datada presenta una edad de 50 ± 20 ka, por lo que de producirse un evento eruptivo, es probable que existan flujos de lava, no obstante, en tiempos históricos, este proceso volcánico es el que menos muertes ha provocado en comparación con otros procesos (Tilling, 1989), es por esto que no fueron modelados (Tabla 1). Pero por otro lado es el proceso más común del volcán Tacora y pueden, eventualmente, dañar o destruir una planta geotérmica.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El volcán Tacora, es un volcán activo, por la presencia de campos fumarólicos y de microsismicidad (Lara *et al.*, 2011), pese a no haber registros confiables de su actividad eruptiva en los últimos 10.000 años.

Los procesos volcánicos que ha tenido el Tacora, según el mapa geológico de las cartas Visviri – Villa Industrial (García *et al.*, 2011) y según el levantamiento geológico realizado en esta memoria corresponden a flujos piroclásticos, extrusión de domos, avalanchas volcánicas y extrusión de lavas de bloque y lahares.

Este estudio muestra que el volcán Tacora tiene una historia eruptiva explosiva más reciente a la documentada, afirmación que se sustenta en la unidad de depósitos de flujo piroclástico encontrada en el flanco NE del volcán, cuya data se estima menor a 20 mil años y que no corresponden a depósitos de flujo piroclástico asociado a colapso de domo, sino que parecen estar ligados a un colapso de una columna eruptiva. El depósito se estima se originó en el sector centro norte del volcán, desde el cráter, debido a que en él hay signos de actividad (fumarolas) y la topografía no sería impedimento de que así fuera. Por lo tanto el flanco NE en conjunto con el sector NW son más susceptibles de ser afectados por este tipo de proceso volcánico.

El volcán presenta lavas de bloque superiores y basales de diferentes edades. Las lavas superiores se encuentran en todos los flancos del volcán, se presentan muy fracturados, estos podrían desprenderse y generar avalanchas ante un estímulo como la intrusión de magma, una explosión freática o un sismo. Las lavas basales no constituyen mayores peligros para la generación de una avalancha.

En el sector NE del volcán al N de los depósitos de flujos piroclásticos antes descritos, se encuentra un depósito que podría ser clasificado como un lahar por su ubicación y material detrítico de origen volcánico. Su origen no está asociado a una erupción, si no que al colapso de un bofedal a causa del sismo de Mw 8.4 de Arequipa del año 2001. Sin embargo podría no corresponder a un lahar por la abundante cantidad de material orgánico que presenta.

No se encontraron depósitos de caída asociados al volcán Tacora, esto podría

explicarse por 3 razones: (1) no se produjeron, (2) su potencia o espesor fue baja, lo que facilitó su erosión y/o degradación (3) están cubiertos por depósitos más jóvenes. Esta condición permite afirmar que el volcán presenta bajo peligro de tener un evento explosivo de VEI > 4 si lo comparamos con volcanes que tienen depósitos de caída de grandes magnitudes, como por ejemplo los asociados al volcán Parinacota.

De la modelación de conos de energía se ratifica que los flancos NE y NW son susceptibles de ser afectados por flujos piroclásticos dado que corresponden a una depresión topográfica y el lugar de salida de estos estaría con una mayor probabilidad en el sector aledaño al cráter en sector centro N del volcán. De igual manera, en el sector SE se encuentran vestigios que podrían corresponder a depósitos de este tipo de flujo, es posible afirmar que este sector también es susceptible de ser impactado por este proceso volcánico pues corresponde a depresiones topográficas.

Según la modelación realizada en esta memoria nos señala un área de 330 km² de radio variable entre 4 km y 13 km, que podría ser afectado por colapso del edificio volcánico en todas las direcciones siendo el sector N y NNW el menos afectado, protegido por altos topográficos.

La modelación de lahares señala que ante la eventual ocurrencia de este proceso volcánico asociado a las estaciones de mayor acumulación de nieve invierno y verano (considerando de baja probabilidad en el Tacora, pues solo hay registro de un posible lahar), es posible deducir que si este se origina asociado a una erupción escurrirían debido a la topografía del sector, en dirección SSE respecto al volcán desviándose hacia el E y W rodeando parcialmente los depósitos de avalancha volcánica. Si solo se produce un aumento de temperatura en los flancos del volcán debido a la presencia de campos fumarólicos los sectores más afectados por el calor serían el centro N y NW del volcán generando derretimiento súbito de nieves, por lo que los lahares escurrirían en el sector basal NE y SW del volcán.

La caída de piroclastos, dependiente de la dirección y velocidad del viento, afectarían claramente el área Este en invierno igual que en otoño y primavera, aunque no de forma tan clara en estas dos últimas estaciones. En verano podrían verse afectada toda el área aledaña al volcán, pues la dirección y velocidad del viento no sigue un patrón determinado, haciendo imprecisa la predicción del área susceptible a la

caída de material piroclástico. Para el escenario S_1 y escenario S_2 el mayor área impacto (1 cm de espesor) y mayor probabilidad (50%) es del orden de 100 km² y 800 km², respectivamente.

El aporte de esta investigación radica en la estimación de escenarios eruptivos probables y máximos delimitando las áreas que serían afectadas por los procesos volcánicos considerados de mayor peligro: flujos piroclásticos, avalanchas volcánicas, caída de piroclastos y lahares, además, la información generada contribuye para la prevención de los peligros volcánicos a los que se expone un proyecto de construcción de una planta geotérmica en el sector estudiado.

En consecuencia, para un proyecto de instalación de una planta geotérmica se recomienda:

- (1) La realización de monitoreo de composición de gases en fumarolas y de microsismicidad con el objeto de generar un sistema de alerta temprana orientado a la mitigación de los efectos derivados de erupciones volcánicas. La razón CO_2/SO_2 de gases en fumarolas puede permitir la detección de la desgasificación pre-eruptiva generada por el ascenso de magma (Aiuppa *et al.*, 2007, Vaselli *et al.*, 2010). Los gases de fumarolas presentan variaciones en su composición con corta diferencia de tiempo a los movimientos en la fuente magmática, también incrementan su periodicidad en tiempos previos a una erupción. Aplicada a la geotermia se utilizan en la generación de modelos conceptuales de las temperaturas del reservorio (Capaccioni *et al.*, 2011). Paralelamente la actividad sísmica aumenta en un período previo a la erupción, además sirve para determinar la permeabilidad del reservorio geotérmico útil en la extracción de vapor o reinyección de fluidos (Deflandre, 1998). Si bien, existen otras técnicas para el monitoreo volcánico como la para determinar deformación superficial mediante monitoreo de estaciones con GPS (Global Positioning System), la observación e interpretación de imágenes satelitales y de video en tiempo real, no se les ha encontrado aplicabilidad relacionados con la exploración y explotación geotermia, por lo tanto sigue siendo el monitoreo de gases y de microsismicidad las técnicas más recomendadas para esta acción.
- (2) La construcción de barreras y canales que bloqueen y desvíen la trayectoria de posibles lahares, minimizando sus efectos. Sobre este punto se sugiere la

adquisición de un modelo de elevación digital de mayor precisión (5 mts), para optimizar la efectividad de las barreras y canales a partir un modelo más cercano a la realidad.

- (3) La construcción de campamentos a una distancia mayor a 15 a 20 km del volcán, sugiriéndose el poblado de Ancolacane o a General Lagos (Fig. 7), sobre la base de los mapas de peligros realizados (Figs. 33, 35, 37 a 40), estos poblados serían los más cercanos a fuente termal y con menos probabilidad de ser afectados por los procesos volcánicos evaluados. También señalar vías de escape y mejorar las vías de acceso.

REFERENCIAS

- ACEVEDO, P., 2013. Estudio estratigráfico y sedimentológico de la formación Putani y su posible relación espacial con el basamento del volcán Tacora, xv región de Arica y Parinacota, Chile. Memoria para optar al título de geólogo, U. de Chile, P 17.
- ADAMS, N.K, DE SILVA, S.L., SELF, S., SALAS, G., SCHUBRING, S., PERMENTER, J.L., ARBESMAN, K. 2001. The physical volcanology of the 1600 eruption of Huaynaputina, southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, Vol. 62, No. 8, p. 493-518.
- AGUILERA, F., 2008. 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. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias mención Geología, UCN. P 16, 17, 61.
- AIUPPA, A., MORETTI, R., FEDERICO, C., GIUDICE, G., GURRIERI, S., LIUZZO, M., PAPAIE, P., SHINOHARA H., AND MARIANO VALENZA, 2007. Forecasting Etna eruptions by real-time observation of volcanic gas composition. *Geology*, 35, 1115-1118.
- ALBERICO, I., LIER, L., PETROSINO P. & SCANDONE R., 2007. Volcanic hazard and risk assesment from piroclastic flows at Ishcia island (southern Italy), *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 171 (2008) 118–136.
- AMIGO, A., OROZCO, G., BERTIN, D. 2012. Peligros Volcánicos de la zona norte de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental, No.17, 2 mapas escala 1:250.000 y 1:3.000.000. Santiago.
- 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*, Vol. 172, p. 313-326.
- ARAYA VERGARA, J. 1985. Análisis de la carta Geomorfológica de la cuenca del Mapocho. *Informaciones Geográficas* N°32. Pág: 31 –47. Santiago de Chile.
- AVARIA, S. CARRASCO, J. RUTLLANT, J. y YÁÑEZ. E., (eds.). 2004. El Niño-La Niña 1997-2000. Sus Efectos en Chile. CONA, Chile, Valparaíso. pp. 13-27.
- 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*, Vol. 172, p. 313-326.
- BEST, M., 2003. *Igneous and Metamorphic petrology* Second edition. Blackwell Science Ltd, London.
- BLONG, R.J., 1984. *Volcanic Hazards: A Sourcebook on the Effects of Eruptions*, 424 pp., Academic Press, Orlando, Florida.
- BONADONNA, C., CONNOR C.B, HOUGHTON, B., CONNOR, L., BYRNE, M., LAING, A., AND HINCKS, T., 2005. Probabilistic modeling of tephra dispersion: hazard assessment of a multi-phase eruption at Tarawera, New Zealand, *Journal of Geophysical Research*, 110 (B03203)
- CAPACCIONI, B., AGUILERA, F., TASSI, F., DARRAH, T., POREDA, R.J., 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* 208(3-4): 77-85.
- CASTRUCCIO, C., 2008. Comparación y modelación numérica de lahares calientes en el volcán Calbuco (41,3°S) y lahares fríos en el volcán Villarrica (39,5°S), Andes del Sur. Tesis para optar al grado de magíster en ciencias, mención geología, U. de Chile.

CHARRIER, R., CHÁVEZ, A., ELGUETA, S. , HÉRAIL, G., FLYNN, J., CROFT D., WYSS, A., RIQUELME, R., Y GARCÍA, M., 2005. Rapid tectonic and paleogeographic evolution associated with the development of the Chucal Anticline and the Chucal–Lauca Basin in the Altiplano of Arica, northern Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 19, 35–54.

CLAVERO, J., SPARKS, R., HUPPERT, H., DADE, W., 2002. Geological constraints on the emplacement mechanism of the Parinacota debris avalanche, northern Chile. *Bull Volcanol* 64:40–54. DOI 10.1007/s00445-001-0183-0

CLAVERO, J., SOLER, V., AMIGO, A., 2006. Caracterización preliminar de la actividad sísmica y de desgasificación pasiva de volcanes activos en los Andes Centrales del norte de Chile. XI Congreso Geológico Chileno, Antofagasta, 443-446.

CONTRERAS, A., 2012. Caracterización de la mineralogía de alteración en superficie de Volcan Tacora y sus alrededores, Región de Arica y Parinacota. Memorua para optar al título de geólogo, U. de Chile.

DADE, W., HUPPERT, H., 1998. Long run-out rockfalls. *Geology* 26:803–806.

DAVIDSON, J. DE SILVA, S. Composite Volcanoes- Encyclopedia of Volcanoes. Academic Press. 663 – 681.

DE PABLO, N., 2011. Técnicas de información geográfica aplicadas al estudio del origen de los lahares y su experimentación en estratovolcanes tropicales. Memoria para optar al grado de doctor, Universidad Complutense de Madrid.

DE SILVA, S., FRANCIS, P. 1991. Volcanoes of Central Andes. Ediciones Springer-Verlag, 216 p. Berlín

DE SILVA, S.L., ZIELINSKI, G.A. 1998. Global influence of the AD 1600 eruption of Huaynaputina, Peru. *Nature*, Vol. 393, p. 455-458.

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS, 2004. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad, cuenca del rio Lluta. Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. P 19.

DEFLANDRE, J., 1998. Method for seismic monitoring of an underground zone allowing better identification of significant events. U.S. Patent Documents: 09/206,208.

EWART E. 1982. The mineralogy and petrology of Tertiary recent orogenic volcanic rocks with special reference to the andesite–basaltic composition range. In: Thorpe RS, ed. *Andesites*. New York, John Wiley and Sons: 25–87.

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*, 24, TC4001. DOI: 10. TC001667.

FERRES D., 2008. Estudios sobre la estratigrafía, geología y evolución del Volcán de San Salvador (El Salvador, CA), Simposio IPGH: "Riesgos y Prevención de Desastres ante Eventos Volcánicos".

FOURNIER D' ALBE, E.M. 1979. Objectives of volcanic monitoring and prediction. *J. Geol. Soc. London*, 136, 321-326.

VARGAS FRANCO R., THOURET, J., DELAITE, G., VAN WESTERN, C., SHERIDAN, M.F., SIEBE, C., MARIÑO, J., SOURIOT, T., STINTON, A., 2010. Mapping and assessing volcanic and flood hazards and risks, with emphasis on lahars, in Arequipa, Peru. *Geological Society of America Special Papers* 464; 265-280.

GARCÍA, M., 1996. Geología y estructura del borde del Altiplano occidental, en el área de Belén (Chile). Tesis de Magister y Memoria de Título. Depto. de Geología, U. de Chile, 111 p.

- GARCÍA, M., 2002. Evolution oligo-néogène de l'Altiplano occidental (arc et avant-arc du Nord du Chili, Arica). Tectonique, volcanisme, sédimentation, géomorphologie et bilan érosion-sédimentation. *Geologie Alpine*, Mémoire H. S. N° 40 (thèse de doctorat), Université Joseph Fourier (Grenoble, France). 118 p. (*)
- GARCÍA, M., GARDEWEG, M., CLAVERO, J., HERAIL, G., 2004. Hoja Arica. Región de Tarapacá. Escala 1:250.000. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Mp Básica, N° 84.
- GARCÍA, M. y HÉRAIL, G. 2005. Fault-related folding, drainage network evolution and valley incision during the Neogene in the Andean Precordillera of Northern Chile. *Geomorphology*, 65: 279–300.
- GARCÍA, M. 2011. Reconocimiento geológico preliminar del área del volcán Tacora, Región de Arica y Parinacota. Informe técnico. ServilandMinergy S.A., p 3-12.
- GARCIA, M., CLAVERO, J. & GARDEWEG, M., 2012. Cartas Visviri y Villa Industrial, SERNAGEOMIN.
- GARDEWEG, M., MEDINA, E., 1994. La erupción subpliniana del 19-20 de abril de 1993 del volcán Lascar, N de Chile. *Acta 7° Congreso Geológico Chileno*, Vol I, p 299-304.
- GARDEWEG, M., SPARKS, R., & MATTHEWS, S., 2004. Evolution of Lascar Volcano, Northern Chile. *Journal of the Geological Society*, London, Vol. 155, pp. 89–104.
- 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*, V. 151, p. 79-100.
- GONZÁLEZ- FERRÁN O., 1995. Volcanes de Chile. Instituto Geográfico Militar, Chile.
- HARTLEY, A. J. 2003. Andean uplift and climate change. *Journal of the Geological Society of London*, Vol. 160, p. 7-10.
- HANTKE, G. PARODI, A., 1966. Catalogue of the Active Volcanoes of the World, Part XIX. International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior (IAVCEI). Rome.
- HENRIQUEZ, H., 1963. Reconocimiento geológico en el extremo Norte del Departamento de Arica. Memoria de Título, Dpto. de Geología, U. de Chile, 56 p.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR, 2003. Atlas geográfico de Chile. Instituto Geográfico Militar, Santiago, Chile.
- IVERSON, R., SCHILLING, S., VALLANCE, J., 1998. Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 110, p. 972-984.
- KÖTT, A., GAUPP, R., WÖRNER, G., 1995. Miocene to Recent history of the Western Altiplano in Northern Chile revealed by lacustrine sediments of the Lauca Basin (18°15'- 18°40'S / 69°30'- 69°05' W). *Geol. Rundsch.*, V. 84, p. 770-780.
- LARA, L.E., OROZCO, G., AMIGO, A., SILVA, C. 2011. Peligros Volcánicos de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental, No.13, 34 p, 1 mapa escala 1:2.000.000. Santiago.
- LE MAITRE R.W., 1989. A classification of igneous rocks and glossary of terms. Oxford, Blackwell Scientific. *Igneous and Metamorphic Petrology* Second edition, p 32.
- LOCKWOOD, J. P., HAZLETT, R. W., 2010. Volcanoes, Global Perspectives. Wiley – Blackwell.
- MACDONALD, G. A., 1972. Volcanoes. Englewood Cliffs, Prentice-Hall.

- MACKENZIE, W. S., DONALDSON, C., H. GUILFORD C., 1982. Atlas of igneous rocks and their textures. Nature p 148.
- MALIN, M., SHERIDAN, M. 1982. *Computer- assisted mapping of pyroclastic surges*. Science 217, 637-640.
- MALIN, M., SHERIDAN, M. 1983. Application of computer-assisted mapping to volcanic hazard evaluation of surge eruption: vulcano, Lipari, and Vesuvius. Journal of Volcanology and Geothermal Research. Elsevier Science Publications B.V. Amsterdam. 17 187-202.
- MARIÑO, J., RIVERA, M., CACYA, L., THOURET, J. C., MACEDO, L., SALAS, G., SIEBE, C., TILLING, R., SHERIDAN, M., CHAVEZ, A., ZUÑIGA, S. 2007, Mapa de peligros del volcán Mitsi, escala 1:50.000, INGEMET, p 1.
- MIDDLEMOST, K. 1994. Naming materials in the magma/igneous system. Earth-Science Reviews 37, 215–224.
- MONTECINOS, F., 1963. Observaciones de Geología en el Cuadrángulo de Campanani, Departamento de Arica, Provincia de Tarapacá. Memoria de Título, Dpto. de Geología, U. de Chile, 109 p.
- MUÑOZ, N. 1988b. Estratigrafía y Paleontología de la Formación Blanco (Aptiano) y Formación Lauca (Mioceno), I Región. Informe inédito, 10 p. ENAP, Proyectos de exploración fuera de Magallanes, Santiago.
- MUÑOZ, N., CHARRIER, R., 1996. Uplift of the western border of the Altiplano on a west-vergent thrust system, Northern Chile. J. South Amer. Earth Sci., 9, p. 171-181.
- NARANJO, J.A. & PASKOFF, R. 1985. Evolución Cenozoica del piedemonte andino en la Pampa del Tamarugal, norte de Chile (188–218S). Actas IV Congreso Geológico Chileno, Antofagasta, 5, 149–164.
- NARANJO, J. A. & CLAVERO, J., 2005. A rare case of grass flow induced by the M8.4 Arequipa earthquake, June 2001, in the Altiplano of Northern Chile, Quaternary Research 64 242 – 248.
- NEWHALL, C., SELF, S., 1982."The volcanic explosivity index (VEI): An estimate of explosive magnitude for historical volcanism". Journal of Geophysical Research 87 (C2): 1231–1238.
- O'KEEFE, P., & WESTGATE, K. N.,1976. Some definitions of disaster. Disaster Research Unit, University of Bradford, Ocasional Paper 4, Bradford, England.
- PETIT-BREUILH, M.E. 2004. La historia eruptiva de los volcanes hispanoamericanos (Siglos XVI al XX). Servicio de Publicaciones del Exmo. Cabildo Insular de Lanzarote-Casa de los volcanes: 283, 375, 376 p.
- RENNE, P., SWISHERA, C., DEINOA, A., KARNERB, D., OWENSB, T., DEPAOLO, D., 1998. Intercalibration of standards, absolute ages and uncertainties in 40Ar/39Ar dating. Chemical Geology, 145: 117-152.
- RIQUELME, R., 1998. Evolución tectonosedimentaria post-oligocénica del borde occidental del Altiplano, entre Tignámar y el Salar de Surire, I Región, Chile. Tesis de Magister y Memoria de Título, U. de Chile, 123 p.
- SALAS, R., KAST, R., MONTECINOS, F., SALAS, I., 1966. Geología y recursos minerales del Departamento de Arica, Provincia de Tarapacá, Bol. 21, 130 pp., Inst. de Invest. Geol., Santiago, Chile.
- SCANDONE, R., GIACOMELLI, L., 1998. Vulcanologia: principi fisici e metodi di indagine. Liguori Ed., Napoli. 641 pp.

- SCHRÖDER, W., WÖRNER, G., 1996. Widespread Cenozoic ignimbrites in N-Chile, W-Bolivia and S-Peru (17 ° – 20°S/71°- 68°E): Stratigraphy, extension, correlation and origin. 3rd ISAG, St. Malo, France. Andean Geodynamics, ORSTOM Editions, Paris, Collection Colloques Séminaires, pp. 645 – 648.
- SCHILLING, S., 1998. LAHARZ: GIS programs for automated mapping of lahar-inundations hazard zones: U.S. Geological Survey Open-File Report 98-638, 80 p.
- SIMKIN T., SIEBERT L., MCCLELLAND L., BRIDGE D., NEWHALL C., LATTER J.H., 1981. Volcanoes of the World: A regional Directory, Gazetteer, and Chronology of Volcanism During the last 10.000 years. Stroudsburg PA: Hutchinson Ross Publ Co, 240 pp.
- SIMKIN T. & SIEBERT L., 1994. Volcanoes of the World: a Regional Directory, Gazetteer, and Chronology of Volcanism During the Last 10,000 Years. (second edition) Geoscience Press, Tucson, 368 pp.
- SMITH, G. A. AND FRITZ, W. J., 1989. "Volcanic influences on terrestrial sedimentation." *Geology*, 17, 375–6.
- SPARKS, R., GARDEWEG, M., CALDER, E., 1997. Erosion by pyroclastic flows on Lascar Volcano, Chile. *Bull Volcanol* 58: 557- 565.
- STERN, C. 2004. Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. *Revista Geológica de Chile*, Vol. 31, 161 – 206
- TILLING R., 1989. Apuntes para un curso breve sobre Los Peligros Volcánicos, World Organization of Volcano Observatories (WOVO).
- THORNBURG, T., KULM, L.D. 1987. Sedimentation in the Chile Trench: Depositional morphologies, lithofacies, and stratigraphy. *Geological Society of America, Bulletin*, Vol. 98, p. 33-52.
- UHLIG, D., SEYFRIED, H., WÖRNER, G., KOHLER, I., SCHRÖDER, W., 1996. Landscape evolution in Northernmost Chile (18.58–19.58): its implication in the tectonic, sedimentary and magmatism history of the Central Andes. Third International Symposium on Andean Geodynamics. Institut Francais de Recherche pour le Développement en Coopération (ORSTOM), Saint Malo, France, pp. 745 – 748
- VASSELLI, O., TASSI, F., DUARTE, E., FERNANDEZ, E., POREDA, R., DELGADO HUERTAS, A., 2010. Evolution of fluid geochemistry at the Turrialba volcano (Costa Rica) from 1998 to 2008. *Bull Volcanol* 72:397–410
- VITERI, E., 1974. Cuadrángulos Villa Industrial y Río Azufre. Instituto de Investigaciones Geológicas (Arica), Informe inédito, 20 p., 1 mapa escala 1:50.000.
- WILSON, J., GARCIA, W., 1962. Geología de los cuadrángulos de Pachía y Palca. Com. Carta Geol. Nac., Boletín N° 4, 82 p. Escala 1:100.000. Lima, Perú.
- WOODS, A.W., 1988. The Fluid Dynamics and Thermodynamics of Eruption Columns. *Bull. Volcanol.* 50, 169–193.
- WÖRNER, G., HAMMERSCHMIDT, K., HENJES-KUNST, F., LEZAUM, J. & WILKE, H. 2000. Geochronology (Ar–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*, 27, 205–240.

ANEXO A: Mapa Geológico

ANEXO B: DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA DE MUESTRAS DE MANO

LEYENDA DE PORCENTAJES:

Ves.= Vesícula, Plg= Plagioclasa, Anf= Anfíbola de Hornlenda, Bt = Biotita, Fld K= Feldespato Potásico (Sanidina y Microclina), Qz= Cuarzo, Px = Piroxeno, Vidrio= Vidrio intersticial, Alt.= Porcentaje de minerales de alteración.

MG-2

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Bt [%]	Fld K [%]	Qz [%]	Vidrio [%]	Alt [%]
5	25	15	20	10	2	20	3

Dacita de biotita. La muestra presenta una matriz felsosídica, con presencia de vesículas, una textura porfírica vitrofírica caracterizada por fenocristales de grano grueso de biotita y anfíbola.

J-04

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Bt [%]	Fld K [%]	Qz [%]	Vidrio [%]	Alt [%]
5	25	15	20	10	2	20	3

Andesita cuarcífera (o Dacita) de biotita. La muestra presenta una matriz felsosídica, con presencia de vesículas, una textura porfírica vitrofírica caracterizada por fenocristales de grano grueso de biotita y anfíbola. No presenta cuarzo cristalino, se asocia, la presencia de biotita y a la masa fundamental felsosídica, al contenido de cuarzo en la masa fundamental. Se recomienda análisis químico.

J-05

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Bt [%]	Fld K [%]	Qz [%]	Vidrio [%]	Alt [%]
0	10	5	0	5	0	75	0

Andesita vitrofírica de grano fino. La muestra de color negro, presenta principalmente una textura hipocristalina a holohialina vitrofírica, con cristales de grano fino <1mm de diámetro. Estructura homogénea, fábrica isótropa.

J-07

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Bt [%]	Fld K [%]	Qz [%]	Vidrio [%]	Alt [%]
5	10	10	0	5	0	70	0

Andesita Traquita de anfíbola. La muestra presenta una textura principalmente porfírica vitrofírica caracterizada por anfíbolos de entre 2 y 5mm de largo, inmersas en una matriz vítrea de color grisácea (mesocrática) y estructura homogénea.

J-08

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Bt [%]	Fld K [%]	Qz [%]	Vidrio [%]	Alt [%]
0	35	0	0	10	0	50	5

Andesita de grano fino. La muestra se presenta con textura hipocrystalina vitrofírica, caracterizada por la presencia de fenocristales equigranulares de grano fino de plagioclasa y feldespato con alteración superficial de óxidos de hierro, color negro grisáceo.

J-10

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Bt [%]	Fld K [%]	Qz [%]	Vidrio [%]	Alt [%]
0	25	30	0	15	0	30	0

Andesita traquítica de Anfíbola. La muestra presenta una textura porfírica caracterizada por cristales de anfíbola, plagioclasa de tamaño fino a medio inmersos en una masa fundamental de plagioclasa, feldespato potásico de grano fino y vidrio, de color grisácea mesocrática. Se observa una fábrica linear, caracterizada por un lineamiento de los cristales.

J-11

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Bt [%]	Fld K [%]	Qz [%]	Vidrio [%]	Alt [%]
0	25	25	0	15	0	30	5

Andesita de anfíbola. La muestra presenta una textura porfírica vitrofírica caracterizada por fenocristales de anfíbola, plagioclasa de tamaño fino a medio inmersos en una masa fundamental de plagioclasa, feldespato potásico de grano fino y vidrio, de color grisácea mesocrática. Se observa una fábrica isotrópica, estructura homogénea y alteración superficial de óxidos de hierro

J-12

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Fld K [%]	Bt [%]	Juv. [%]	Líticos [%]	Matriz [%]	Alt [%]
0	10	2	5	15	5	15	40	3

Toba litocrystalina de lapilli. Compuesta principalmente por cristales de biotita, plagioclasa y anfíbola de grano medio a fino. Presenta juveniles, de pómez tamaño ceniza gruesa a lapilli fino, angulosos de color blanco. Líticos accidentales, lavas grises andesíticas angulosos y de baja esfericidad. Matriz blanca con alteración argílica, dureza 2-3, tamaño grano ceniza fina.

J-13

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Fld K [%]	Juv. [%]	Líticos [%]	Matriz [%]	Alt [%]
0	10	20	0	5	10	50	5

Toba Cristalina de lapilli. Compuesta principalmente por cristales de anfíbola y plagioclasas, luego por líticos tamaño ceniza gruesa lapilli fino (entre 2mm y 3cm) andesíticos color grisáceo, negros con alteración de óxidos de hierro superficial. La matriz tamaño ceniza compuesta por vidrio y cristales, se encuentra con una alteración moderada de óxidos de hierro.

J-14

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Bt [%]	Fld K [%]	Px [%]	Vidrio [%]	Alt [%]
10	30	20	0	5	5	25	5

Andesita de anfíbola. La muestra se presenta una textura vitrofírica porfírica caracterizada por un grano fino en cristales de anfíbola y plagioclasa. Se observan vesículas, una fabrica planar y estructura homogénea. Destaca la presencia de magnetismo.

J-15

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Bt [%]	Fld K [%]	Px [%]	Vidrio [%]	Alt [%]
15	20	10	0	5	5	40	5

Andesita de anfíbola. La muestra se presenta una textura vitrofírica porfírica caracterizada por un grano fino en cristales de anfíbola y plagioclasa. Se observan vesículas, una fabrica planar y estructura homogénea. Destaca la presencia de magnetismo.

J-16

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Bt [%]	Fld K [%]	Qz [%]	Vidrio [%]	Alt [%]
<5	20	20	0	5	0	50	0

Andesita de anfíbola, grano fino. La muestra se presenta una textura vitrofírica porfírica caracterizada por un grano fino en cristales de anfíbola y plagioclasa. Se observan vesículas en un porcentaje menor, una fábrica planar y estructura homogénea.

J-20

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Bt [%]	Fld K [%]	Qz [%]	Vidrio [%]	Alt [%]
<5	15	20	0	10	0	50	0

Andesita de anfíbola. La muestra se observa con una textura hipocristalina (masa fundamental microcristalina o vítrea). Los cristales de anfíbola son equigranulares, de tamaño 2 mm y de plg de menor tamaño <0,5 mm de largo. Hipidiomorfica, en donde las anfíbolas presentan mayor cantidad de caras propias. Matriz mesocrática gris clara.

J-22

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Bt [%]	Fld K [%]	Qz [%]	Vidrio [%]	Alt [%]
<5	30	5	0	15	1	50	0

Andesita de grano fino. Se observa una textura vitrofírica caracterizada por cristales de grano fino de plagioclasas inmersos en una matriz vítrea o microcristalina, holohialina, isótropa.

J-23

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Bt [%]	Fld K [%]	Qz [%]	Vidrio [%]	Alt [%]
0	8	0	0	2	0	90	0

Andesita de grano fino. La muestra presenta una textura vitrofírica caracterizada por plagioclasa y feldespato inmerso en una matriz negra de vidrio, lo que la lleva a una textura holohialina.

J-25

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Bt [%]	Fld K [%]	Qz [%]	Vidrio [%]	Alt [%]
10	8	0	0	2	0	70	10

Andesita de grano fino. La muestra presenta una textura hipocristalina en límite con holohialina, Esta se caracteriza por una matriz vítrea, con presencia de cristales de grano fino de plagioclasa y feldespato también amígdalas. Se observa alteración de óxidos de hierro de color morado. Las vesículas son de tamaño grano fino <2mm

J-28

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Fld K [%]	Juv. [%]	Líticos [%]	Matriz [%]	Alt [%]
30	8	0	0	60			

Escoria andesítica. La muestra de material juvenil predominantemente vítreo, caracterizado por un color grisáceo y la presencia de vesículas de tamaño entre 1 -3mm. También se observan cristales de plagioclasa.

J-30

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Fld K [%]	Juv. [%]	Líticos [%]	Matriz [%]	Alt [%]
0	8	0	0	5	30	40	10

Toba lítica brechoza. Inmadura composicional y texturalmente. Presencia de Líticos andesíticos de tamaño 1 a 4cm's, angulosos, baja esfericidad, mala selección forma irregular de color gris claro y oscuro. Presenta alteración superficial de óxidos de hierro.

J-31

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Fld K [%]	Juv. [%]	Líticos [%]	Matriz [%]	Alt [%]
0	8	0	0	5	30	40	10

Toba lítica brecha piroclástica. Inmadura composicional y texturalmente. Presencia de Líticos andesíticos vitrofíricos de tamaño lapilli fino 1,5 a bomba o bloque 6cm's, angulosos, baja esfericidad, mala selección forma irregular de color gris claro y oscuro. Presenta alteración superficial de óxidos de hierro.

J-32

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Bt [%]	Fld K [%]	Qz [%]	Vidrio [%]	Alt [%]
0	15	20	0	10	10	40	>5

Dacita de anfíbola. La muestra presenta una textura hipocristalina, inequigranular, vitrofírica, caracterizada por una masa fundamental melanocrática vítrea y fenocristales de grano medio de anfíbola, y cuarzo. Y plagioclasas de grano fino. Presenta una anisotropía planar y estructura homogénea.

J-33

Riolita de grano medio. La muestra presenta una textura porfírica caracterizada principalmente por cristales de cuarzo, anfíbola de grano medio, en una masa fundamental microcristalina o vítrea. Presenta baja alteración a clorita epidota. Fabrica isótropa, estructura homogénea.

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Bt [%]	Fld K [%]	Qz [%]	Vidrio [%]	Alt [%]
0	10	20	0	20	30	20	>5

J-33 alt

Riolita de grano medio. La muestra presenta una textura porfírica caracterizada principalmente por cristales de cuarzo, anfíbola de grano medio, en una masa fundamental microcristalina o vítrea. Presenta media alteración a clorita epidota. Fabrica isótropa, estructura homogénea.

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Bt [%]	Fld K [%]	Qz [%]	Vidrio [%]	Alt [%]
0	10	10	0	15	25	30	>10

J-34

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Bt [%]	Fld K [%]	Qz [%]	Vidrio [%]	Alt [%]
0	10	5	0	5	0	60	10

Andesita de anfíbola de grano fino. La muestra presenta una textura hipocristalina, vitrofírica, caracterizada por cristales de anfíbola y plagioclasa de grano inmersos en una matriz vítrea. Se observa una estructura homogénea, una fábrica planar y una alteración de cristales y de la masa fundamental a clorita y epidota.

J-35

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Bt [%]	Fld K [%]	Qz [%]	Vidrio [%]	Alt [%]
0	25	20	0	10	0	45	>2

Andesita traquita de anfíbola. La muestra presenta una textura hipocristalina vitrofírica caracterizada por una matriz vítrea y cristales de anfíbola, plagioclasa y feldespato de grano fino. Estructura homogénea y fábrica isótropa.

J-37

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Bt [%]	Fld K [%]	Qz [%]	Vidrio [%]	Alt [%]
0	25	15	0	10	0	50	>2

Andesita de anfíbola. La muestra presenta una textura hipocristalina, vitrofírica, equigranular. Caracterizada por tamaños de grano fino de cristales de anfíbola, plagioclasa y feldespato, insertos en una masa fundamental vítrea de color gris claro, mesocrática. Estructura homogénea y fábrica isótropa.

J-38

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Bt [%]	Fld K [%]	Qz [%]	Vidrio [%]	Alt [%]
0	25	15	0	10	0	50	>2

Andesita de anfíbola. La muestra presenta una textura hipocristalina, vitrofírica, equigranular. Caracterizada por tamaños de grano fino de cristales de anfíbola, plagioclasa y feldespato, insertos en una masa fundamental vítrea de color gris claro, mesocrática. Estructura homogénea y fábrica isótropa.

J-39

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Bt [%]	Fld K [%]	Qz [%]	Vidrio [%]	Alt [%]
0	25	15	0	10	0	50	>2

Andesita de anfíbola. La muestra presenta una textura hipocristalina, vitrofírica, equigranular (tamaño variable dentro del rango de grano fino <2mm). Caracterizada por tamaños de grano fino de cristales de anfíbola, plagioclasa y feldespato, insertos en una masa fundamental vítrea de color gris claro, mesocrática. Estructura homogénea y fábrica isótropa.

J-40

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Bt [%]	Fld K [%]	Qz [%]	Vidrio [%]	Alt [%]
5	40	3	0	15	0	50	>2

Andesita. La muestra presenta una textura hipocristalina, vitrofírica, equigranular (tamaño variable dentro del rango de grano fino <2mm). Caracterizada por tamaños de grano fino de cristales de anfíbola, plagioclasa y feldespato, insertos en una masa fundamental vítrea de color gris claro, mesocrática. Presenta vesículas de tamaño <2mm. Estructura homogénea y fábrica isótropa.

J-41

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Bt [%]	Fld K [%]	Qz [%]	Vidrio [%]	Alt [%]
3	25	15	0	10	0	30	>2

Andesita de anfíbola. La muestra presenta una textura hipocristalina, vitrofírica, inequigranular, caracterizada por tamaños de cristales, fino y medio de anfíbola, plagioclasa y feldespato, en una masa fundamental vítrea o bien microcristalina, indiferenciable a vista con lupa. Una fábrica isótropa y estructura homogénea con leve bandeamiento, se observan vesículas de tamaño menor a 2mm en baja proporción.

J-43

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Fld K[%]	Juv. [%]	Líticos[%]	Matriz [%]	Alt [%]
5	10	20	5	5	20	30	5

Toba cristalina de ceniza. Matriz de tamaño ceniza fina a grueso compuesta por vidrio cristales de anfíbola y plagioclasa, color café claro en el centro a anaranjado en los bordes. Líticos y juveniles de tamaño ceniza fina a gruesa.

J-44

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Fld K[%]	Juv. [%]	Líticos[%]	Matriz [%]	Alt [%]
5	10	5	0	15	30	30	5

Toba de lapilli fino. La muestra presenta una matriz de tamaño ceniza fina a grueso compuesta por vidrio cristales de anfíbola y plagioclasa de color café claro en el centro a anaranjado en los bordes. Líticos angulosos y juveniles.

J-45

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Bt [%]	Fld K [%]	Qz [%]	Vidrio [%]	Alt [%]
10	30	15	0	10	0	30	>5

Andesita de anfíbola. La muestra presenta una textura hipocristalina, porfírica vitrofírica, inequigraunlar seriada de grano fino y medio. Caracterizada por fenocristales de plagioclasa, anfíbola, presencia de vesículas y alteración hidrotermal rellenando las mismas.

J-46

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Bt [%]	Fld K [%]	Qz [%]	Vidrio [%]	Alt [%]
10	30	0	0	15	0	40	>5

Andesita. La muestra presenta una textura hipocristalina, porfírica vitrofírica, inequigraunlar seriada de grano fino y medio. Caracterizada por fenocristales de plagioclasa, anfíbola, presencia de vesículas y alteración hidrotermal diseminada de pirita y azufre.

J-47

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Fld K[%]	Juv. [%]	Líticos[%]	Matriz [%]	Alt [%]
15	10	0	0	0	5	30	50

Muestra obliterada con alto grado de alteración argílica avanzada.

J-48

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Fld K[%]	Juv. [%]	Líticos[%]	Matriz [%]	Alt [%]
5	5	2	2	5	40	35	5

Toba lítica de lapilli brechoza. La muestra presenta textura piroclástica, caracterizada por piroclastos compuestos por clastos juveniles de pómez de tamaño ceniza gruesa a lapilli fino, bien redondeados, color café claro blanco. Líticos de fragmentos sub-redondeados andesíticos, de tamaño lapilli medio.

J-50

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Bt [%]	Fld K [%]	Qz [%]	Vidrio [%]	Alt [%]
5	25	15	20	10	2	20	3

Andesita cuarcífera (o Dacita) de biotita. La muestra presenta una matriz felsosídica, con presencia de vesículas, una textura porfírica vitrofírica caracterizada por fenocristales de grano grueso de biotita y anfíbola.

J-51

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Fld K[%]	Juv. [%]	Líticos[%]	Matriz [%]	Alt [%]
5	5	5	0	15	25	40	5

Toba de lapilli lítica. La muestra presenta textura piroclástica, caracterizada por piroclastos compuestos por clastos juveniles de pómez de tamaño ceniza gruesa a lapilli fino, bien redondeados, color café claro blanco. Líticos de fragmentos sub-redondeados andesíticos, de tamaño lapilli medio.

J-52

Roca obliterada, alteración argílica avanzada se observa arcillas caolinita, alunita.

J-53

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Fld K[%]	Juv. [%]	Líticos[%]	Matriz [%]	Alt [%]
5	5	2	0	5	40	35	8

Toba Lítica de lapilli brechoza. La muestra se caracteriza por la abundante (40%) presencia de líticos de tamaño lapilli fino a lapilli grueso, de composición andesítica. La matriz de color gris claro, tamaño ceniza fina. Juveniles en baja proporción, tamaño lapilli fino, color blanco composición intermedia. Se observa alteración parcial de óxidos de hierro y arcillas.

J-54

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Fld K[%]	Juv. [%]	Líticos[%]	Matriz [%]	Alt [%]
5	2	8	0	5	40	35	5

Toba Lítica. La muestra presenta una textura piroclástica con una predominancia de líticos andesíticos de bajo redondeamiento y forma irregular, tamaño ceniza gruesa, color grisáceo. Una matriz de ceniza, alterada a arcilla, tamaño ceniza fina y presencia de cristales de anfíbolos. Se observan juveniles alterados de tamaño ceniza gruesa, alargados color gris blanco.

J-57

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Bt [%]	Fld K [%]	Qz [%]	Vidrio [%]	Alt [%]
0	7	0	0	0	0	90	3

Andesita. La muestra presenta una textura holohialina, vítrea, o bien afanítica de grano muy fino, de plagioclasa, estos se distinguen vagamente, color melanocrático. Estructura homogénea y fábrica planar

J-58

Ves. [%]	Plg [%]	Qz [%]	Fld K[%]	Juv. [%]	Líticos[%]	Matriz [%]	Alt [%]
5	10	5	10	50	15	0	5

Toba vítrea de lapilli? o Pómez. La muestra presenta una textura piroclástica caracterizada por la presencia vesículas una masa fundamental vítrea correspondiente a juveniles pómez, con inclusiones líticas en baja proporción.

J-62

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Bt [%]	Fld K [%]	Qz [%]	Vidrio [%]	Alt [%]
3	25	5	5	10	0	40	>2

Andesita de anfíbola. La muestra se presenta una textura hipocristalina, inequigranular (principalmente en feldespatos, equigranular las anfíbolos), hipidiomórfica, caracterizada por cristales de plagioclasa, anfíbola y feldespato de grano medio y fino. Isótropa, estructura homogénea y un color grisáceo melanocrática.

J-63

Ves. [%]	Plg [%]	Anf [%]	Bt [%]	Fld K [%]	Qz [%]	Vidrio [%]	Alt [%]
3	25	5	5	10	0	30	>2

Andesita de anfíbola. La muestra se presenta una textura hipocristalina, inequigranular, hipidiomórfica, caracterizada por cristales de plagioclasa, anfíbola y feldespato de grano fino. Anisotropía planar, estructura homogénea.

J-103

Ves. [%]	Bt [%]	Anf [%]	Fld K[%]	Juv. [%]	Líticos[%]	Matriz [%]	Alt [%]
5	10	2	0	10	20	40	8

Toba de lapilli cristalina. Presenta textura piroclástica. Los piroclásticos se conforman por, un 10% de Juveniles alterados de color blanco tamaño lapilli fino a medio, un 20% de líticos de tamaño lapilli fino a lapilli medio, de andesita afanítica color gris y rojizos, 30% de cristales 10% juveniles de biotita y 20% de cuarzo proveniente de rocas pre-existentes. 40% de Matriz de color blanco tamaño ceniza fina, presenta alteración a arcillas.

J-111

Ves. [%]	Bt [%]	Anf [%]	Fld K[%]	Juv. [%]	Líticos[%]	Matriz [%]	Alt [%]
10	5	5	0	30	15	30	5

Toba de lapilli vítrea o pumita. Presenta textura piroclástica. Los piroclásticos se conforman por, un bloque compuesto 50% de Juveniles alterados de color blanco tamaño lapilli fino a medio, un 10% de líticos de tamaño lapilli fino a lapilli medio, de andesita afanítica color gris y rojizos, 10% de cristales 5% juveniles de biotita y 5% de anfíbola. 30% de Matriz vítrea de color amarillo rojizo tamaño ceniza fina, presenta alteración a arcillas.

J-112

Ves. [%]	Bt [%]	Anf [%]	Fld K[%]	Juv. [%]	Líticos[%]	Matriz [%]	Alt [%]
10	5	5	0	40	10	25	5

Toba de lapilli vítrea .Presenta textura piroclástica. Los piroclásticos se conforman por, un 50% de Juveniles alterados de color blanco tamaño lapilli fino a medio, un 10% de líticos de tamaño lapilli fino a lapilli medio, de andesita afanítica color gris y rojizos, 10% de cristales 5% juveniles de biotita y 5% de anfíbola. 30% de Matriz de color amarillo rojizo tamaño ceniza fina, presenta alteración a arcillas.

J-113

Ves. [%]	Bt [%]	Anf [%]	Fld K[%]	Juv. [%]	Líticos[%]	Matriz [%]	Alt [%]
5	5	0	0	30	30	25	5

Presenta textura piroclástica. Los piroclásticos se conforman por, un 30% de Juveniles alterados de color blanco tamaño lapilli fino, un 30% de líticos de tamaño lapilli fino a lapilli medio, de andesita afanítica color gris y rojizos, tamaño lapilli fino a grueso. 5% de cristales juveniles de biotita. 60% de Matriz de color amarillo rojizo tamaño ceniza fina, presenta alteración a arcillas.

Clasificación Toba de lapilli vítrea

ANEXO C: DESCRIPCIÓN DE CORTES TRANSPARENTES

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA

N° Muestra	Coord. Norte	Coord. Este
MG2	8042470	417588

Clasificación Modal Andesita Cuarcifera de Anfibola

DESCRIPCIÓN GENERAL

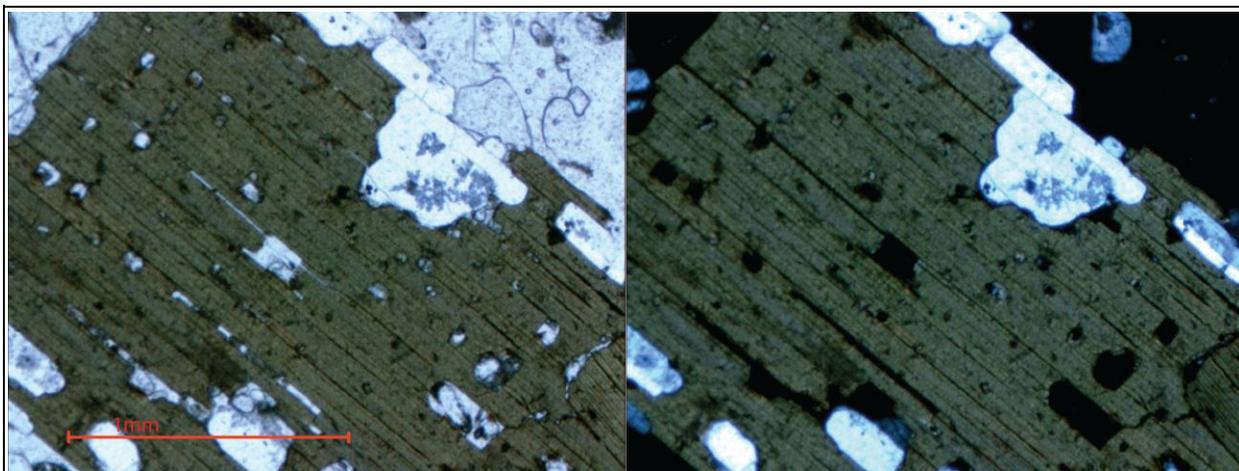
Texturas	Mineral	Observaciones
Vitrofirica	Plg, Anf	
Zonación oscilatoria	Plg,	
Felsítica	Qz y Fld K	
Eferulítica	vidrio	masa fundamental vítrea, con esferulitas de 0,2mm de radio

a) Mineralogía primaria	%	Diametro (mm)	Características
Plagioclasa	40	2-3	en masa fundamental, se distinguen en forma tabular
Cuarzo	10	0,5-1	en matriz
Feldespato Potásico	5	0,05	Sanidina, forma subhedral
Anfibola	8	2-3	hornblenda, presenta borde de reacción. Se observa tabular y de forma pseudo rombica alterada y fracturada con forma de tabilla con clivaje en direccion del largo
Biotita	5	0,3	
	68		

b) Mineralogía secundaria	%	Características
Cuarzo		
Opacota	5	con morfología similar a la de las plagioclasas, tabulares
Epidota		
Clorita		
Oxi-hidroxidos de Fe	5	

c) Observaciones Algunos cristales tienen inclusiones y otros están algo oxidados

FOTOMICROGRAFÍA



Fotomicrografía de sección transparente representativa de la muestra MG-2. Se observa una textura fanerítica vitrofirica, con cristales de 2 mm de biotita y plagioclasa. Imágenes a nicoles paralelos (izquierda) y cruzados (derecha). Escala 1 mm.

Nota: no se fotografían todas la muestras, solo se consideran las más representativas

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA

N° Muestra	Coord. Norte	Coord. Este
J02	8011584	433222

Clasificación Modal ignimbrita, toba cristalina soldada de ceniza

DESCRIPCIÓN GENERAL

Texturas	Mineral o tipo	%	Observaciones
Piroclástica	Líticos	3	andesíticos y dacíticos con ox de hierro tamaño <2mm
	Juveniles	30	Fiammes , pomez alargadas <2mm de largo, vesciculas subesfericas ligeramente elongadas
	Matriz	30	se observan framgementsos de trizas vitreas, matriz vitrea muy fina (<0,1mm)
Borde de reabsorción	Qz y Fld K		
		63	

a) Mineralogía primaria	%	Diametro (mm)	Características
Plagioclasa	5	0,3-0,5	se encuentra alterada, se distinguen solo algunas
Cuarzo	5	0,2-0,5	txt borde de reabsorcion
Feldespató Potásico	10	0,5 - 1	ortoclasa , forma en escalera, macla carlsband
Anfibola			
Biotita	5		
	25		

b) Mineralogía secundaria	%	Características
Opacos	2	0,1 mm de diametro
Epidota		
Clorita		
Oxi-hidroxidos de Fe		
	2	

c) Observaciones

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA

N° Muestra	Coord. Norte	Coord. Este
J04	8042502	416241

Clasificación Modal Andesita de anfíbola

DESCRIPCIÓN GENERAL

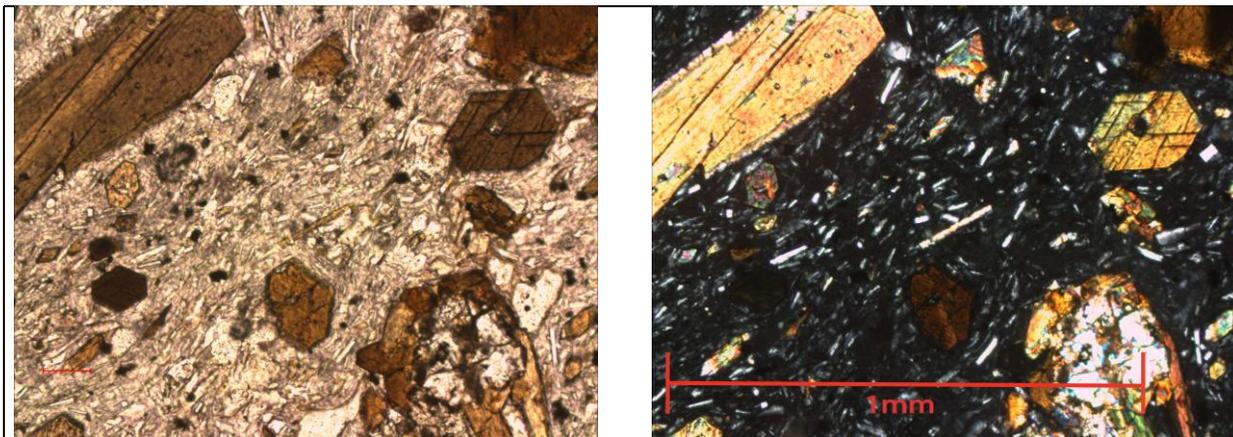
Texturas	Mineral	Observaciones
Vitrofirica	Plg, Anf	
Zonación oscilatoria	Plg,	
Felsítica	Qz y Fld K	

a) Mineralogía primaria	%	Diametro (mm)	Características
Plagioclasa	50	0,05	en masa fundamental
Cuarzo	2	0,05	en matriz
Feldespató Potásico	5	1	Sanidina, forma subhedral
Anfibola	8	0,3	hornblenda, presenta borde de reacción. Se observa tabular y de forma pseudo rombica, con seis lados
Biotita	5	0,3	alterada y fracturada con forma de tablilla con clivaje en dirección del largo
	70		

b) Mineralogía secundaria	%	Características
Cuarzo		
Opacos	5	
Epidota		
Clorita		
Oxi-hidroxidos de Fe		
	5	

c) Observaciones 30% de Vidrio

FOTOMICROGRAFÍA



Fotomicrografía de sección transparente representativa de la muestra. Se observa una textura fanerítica vitrofirica con cristales de anfíbolos, plagioclasa, . Imágenes a nicolos paralelos (izquierda) y cruzados (derecha). Escala 1 mm.

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA

N° Muestra	Coord. Norte	Coord. Este
J05	8041173	414967

Clasificación Modal Dacita

DESCRIPCIÓN GENERAL

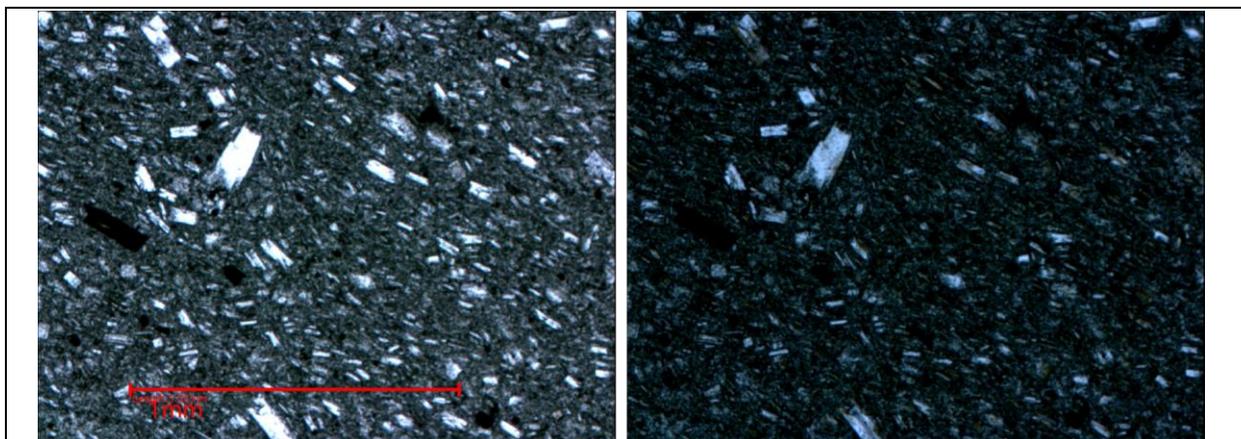
Texturas	Mineral	Observaciones
Afanítica		1% de Fenocristales
Vitrofirica	Plg, Anf	
Felsítica	Qz y Fld K	

a) Mineralogía primaria	%	Diametro (mm)	Características
Plagioclasa	10	0,05	en masa fundamental compuesta de microlitos, se distinguen en forma tabular, fenocristales cribados
Cuarzo	10	0,05	intersticial
Feldespato Potásico	5	0,05	Sanidina, forma subhedral en intersticios
Anfibola	10	0,3	hornblenda, presenta borde de reacción (oxidado). Se observa tabular y de forma pseudo rombica, con seis lados alterada y fracturada con forma de tablilla con clivaje en direccion del largo
Biotita	5	0,3	
	40		

b) Mineralogía secundaria	%	Características
Cuarzo		
Opacos	5	con morfología similar a la de las plagioclasas, tabulares
Epidota		
Clorita		
Oxi-hidroxiidos de Fe	5	

c) Observaciones 55% de Vidrio

FOTOMICROGRAFÍA



Fotomicrografía de sección transparente representativa de la muestra J-05. Se observa una textura afanítica a vitrofirica con microcristales de plagioclasa. Imágenes a nicoles paralelos (izquierda) y cruzados (derecha). Escala 1 mm.

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA

N° Muestra	Coord. Norte	Coord. Este
J06	8042709	418894

Clasificación Modal Andesita de anfíbola

DESCRIPCIÓN GENERAL

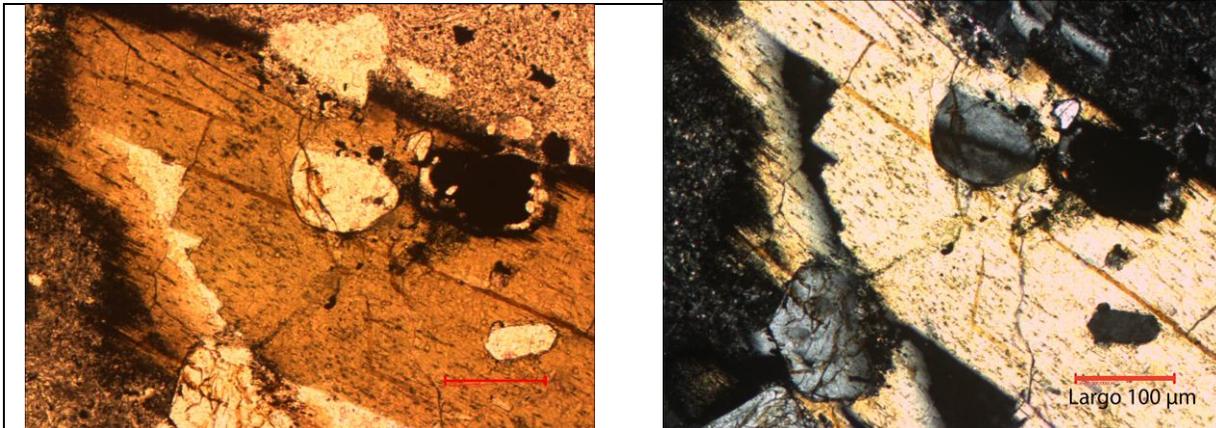
Texturas	Mineral	Observaciones
Vitrofirica	Plg, Anf	
Zonación oscilatoria	Plg,	

a) Mineralogía primaria	%	Diametro (mm)	Características
Plagioclasa	55	0,05-1	en matriz (microcristalina) y cxs
Cuarzo	2	0,05	en matriz felsosídica
Feldespató Potásico	10	0,05- 1	Sanidina, forma subhedral, presenta borde de reacción y macla de carlsband y en matriz felsosídica
Anfíbola	15	0,3	forma tabular y pseudo hexagonal, se observa foliación en 60 y 120°, presenta inclusiones de plg*
Biotita	8	0,3	alterada y fracturada con forma de tabilla con clivaje en dirección del largo
	90		

b) Mineralogía secundaria	%	Características
Opacos	10	0,1 mm formas cúbicas rombicas euhedrales
Epidota		
Clorita		
Oxi-hidroxidos de Fe		
	10	

c) Observaciones

FOTOMICROGRAFÍA



Fotomicrografía de sección transparente representativa de la muestra. Se observa una textura fanerítica vitrofirica con cristales de anfíbolos, plagioclasa, . Imágenes a nicolas paralelos (izquierda) y cruzados (derecha). Escala 100 µm..

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA

N° Muestra	Coord. Norte	Coord. Este
J10	8043167	419495

Clasificación Modal Andesita Cuarcifera de Anfibola

DESCRIPCIÓN GENERAL

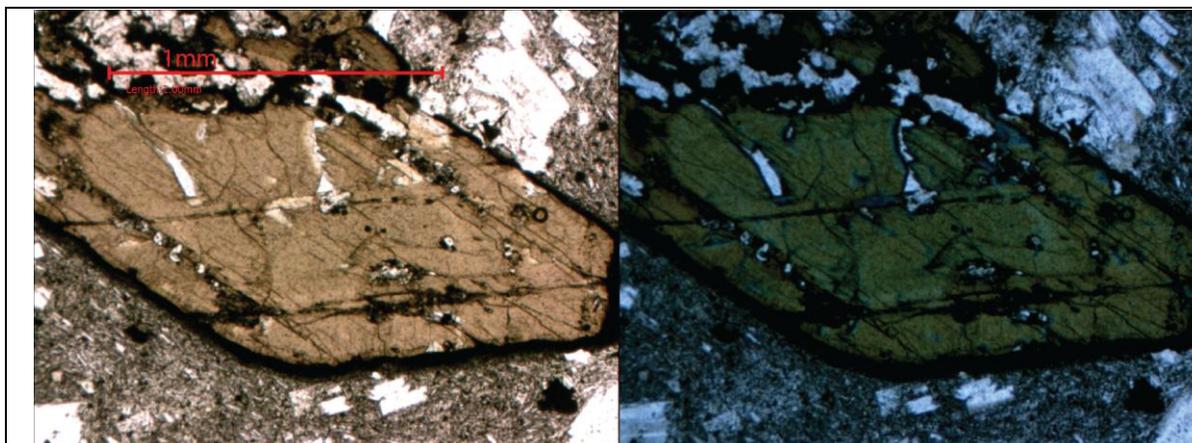
Texturas	Mineral	Observaciones
Vitrofirica	Plg, Anf	
Zonación oscilatoria	Plg,	
Felsítica	Qz y Fld K	

a) Mineralogía primaria	%	Diametro (mm)	Características
Plagioclasa	40	0,05	en masa fundamental, se distinguen en forma tabular
Cuarzo	10	0,05	en matriz
Feldespato Potásico	5	0,05	Sanidina, forma subhedral
Anfibola	8	0,3	hornblenda, presenta borde de reacción. Se observa tabular y de forma pseudo rombica, alterada y fracturada con forma de tabilla con clivaje en direccion del largo
Biotita	5	0,3	
	68		

b) Mineralogía secundaria	%	Características
Cuarzo		
Opacos	5	en masa fundamental con morfología similar a la de las plagioclasas, tabulares
Epidota		
Clorita		
Oxi-hidroxidos de Fe		
	2	

c) Observaciones 30% de Vidrio

FOTOMICROGRAFÍA



Fotomicrografía de sección transparente representativa de la muestra J10. Se observa una textura fanerítica vitrofirica con cristales de anfibola y plagioclasa, con borde de descomposición en anfibola. Imágenes a nicoles paralelos (izquierda) y cruzados (derecha). Escala 1 mm.

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA

N° Muestra	Coord. Norte	Coord. Este
J11	8042422	414088

Clasificación Modal	Andesita de anfibola
---------------------	----------------------

DESCRIPCIÓN GENERAL

Texturas	Mineral	Observaciones
Glomeroporfirica	plg y anf	(o cumuloformica) en plg y anf de 1mm de diam
Zonación oscilatoria	Plg,	en baja medida(1%)
Borde de	Anf	rodeado por oxidos negros y/o feld's

a) Mineralogía primaria	%	Diametro (mm)	Características
Plagioclasa	50	0,1-0,5	principalmente en masa fundamental microcristalina , presentan silueta de cola colombrina
Cuarzo			
Feldespato Potásico	15	0,1-1	rodeando anf y en fenocxs y en matriz
Anfibola	15	1	fracturada con clivaje en 60 y 120°, colores de interferencia de 2do orden , con alteracion leve de óxidos de hierro
Biotita	5	0,5-2	alterada y fracturada con forma de tablilla con clivaje en direccion del largo
	85		

b) Mineralogía secundaria	%	Características
Opacos	5	con algunas caras propias en tablillas y fragmentos irregulares cubicos y triangulares
Epidota		
Clorita		
Oxi-hidroxidos de Fe	5	rellenando cavidades
	10	

c) Observaciones	Presenta 5% vesiculas de grano fino <1mm. Rellenas con alteración
------------------	---

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA

N° Muestra	Coord. Norte	Coord. Este
J13	8041310	425113

Clasificación Modal Toba andesítica Cristalina

DESCRIPCIÓN GENERAL

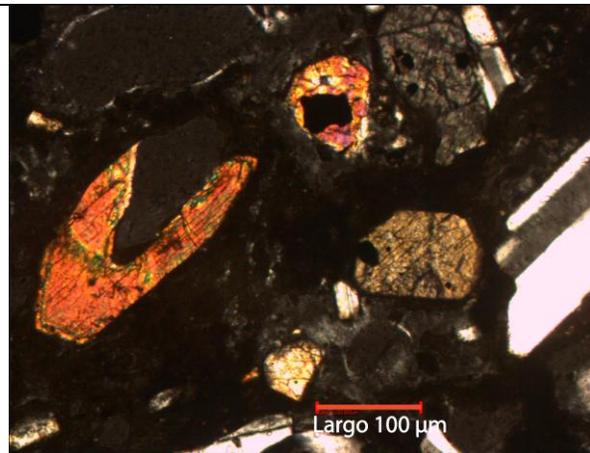
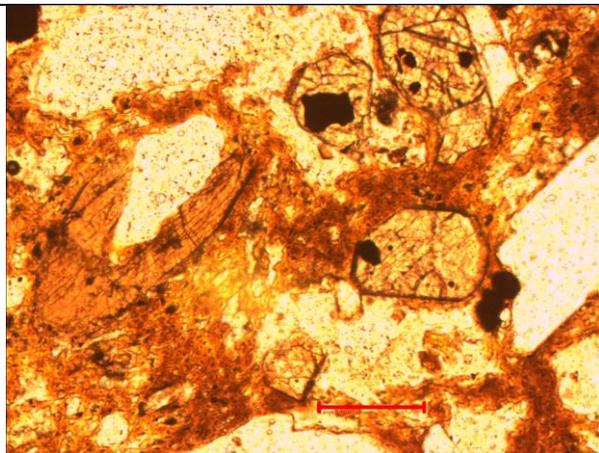
Texturas	Mineral	Observaciones
Vitrofirica	Plg, Anf	
Zonación oscilatoria	Plg,	

a) Mineralogía primaria	%	Diametro (mm)	Características
Plagioclasa	45	0,5-1	se observa euhedral con maclas polisitéticas y de carlsband
Cuarzo			
Feldespató Potásico	10		rodeando anf y en fenocxs y en matriz
Anfibola	15		
Piroxeno	15	1	Se observa maclado y de forma pseudocúbica, se distingue su exfoliación en 87° aprox
	85		

b) Mineralogía secundaria	%	Características
Opacos	10	
Epidota		
Clorita		
Oxi-hidroxiidos de Fe	5	en masa Fundamental
	15	

c) Observaciones Masa fundamental vítrea, con alteración de óxidos de hierro

FOTOMICROGRAFÍA



Fotomicrografía de sección transparente representativa de la muestra. Se observa una textura fanerítica vitrofirica con cristales de anfíbolos, plagioclasa, . Imágenes a nicoles paralelos (izquierda) y cruzados (derecha). Escala 100 µm..

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA

N° Muestra	Coord. Norte	Coord. Este
J14	8034217	422734

Clasificación Modal	Andesita de anfibola
---------------------	----------------------

DESCRIPCIÓN GENERAL

Texturas	Mineral	Observaciones
Vitrofirica, seriada	Plg, Anf	tamaño varia de 0,1 a 1 mm en plg y anf
Borde de descomposición	Plg, Anf	oxidos de hierro en Anf y Plg

a) Mineralogía primaria	%	Diametro (mm)	Características
Plagioclasa	40	0,05-1	masa fundamental de microlitos , algunos presentan una silueta de cola colombrina resultado de un enfriamiento rápido
Cuarzo			
Feldespató Potásico	5		Se presenta rodeando anfibolas, en fenocristales y en matriz
Anfibola	15	0,1-1,5	Con borde de descomposición
Biotita	3	0,2-0,5	Con borde de descomposición
Piroxeno	2	1	Se observa maclado y de forma pseudocúbica, forma de octagono, clivaje claro en 1 dirección
	65		
b) Mineralogía secundaria	%	Características	
Opacos	10	Se observan dentro de las anfibolas y con hábito prismático, se asocia al magnetita por la forma y el magnetismo observado en la muestra de mano	
Epidota			
Clorita			
Oxi-hidroxiidos de Fe	5	en masa Fundamental	
	15		

c) Observaciones	Masa fundamental vítrea, con alteración de oxidos de hierro
------------------	---

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA

N° Muestra	Coord. Norte	Coord. Este
J16	8037897	420131

Clasificación Modal Andesita de Anfibola

DESCRIPCIÓN GENERAL

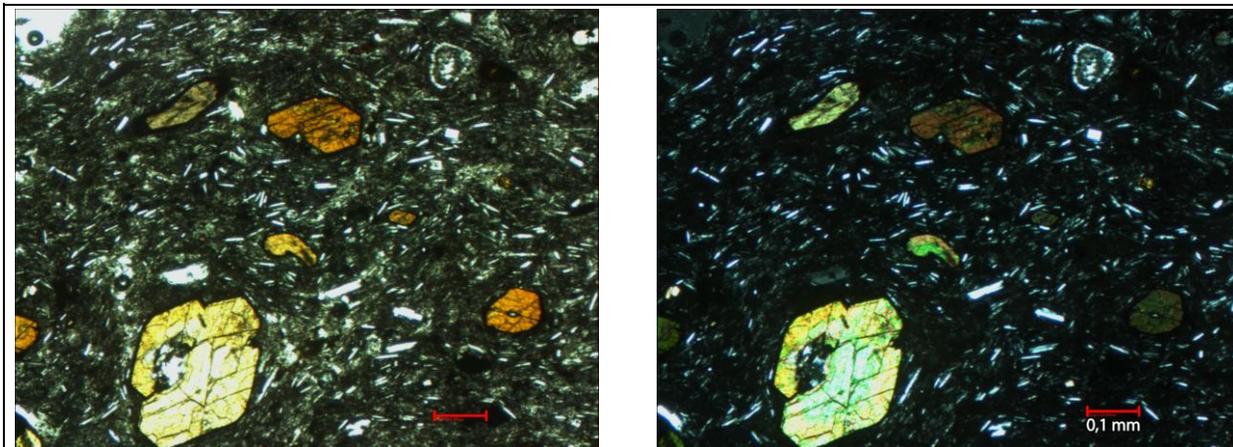
Texturas	Mineral	Observaciones
Vitrofirica	Plg, Anf	
Zonación oscilatoria	Plg,	

a) Mineralogía primaria	%	Diametro (mm)	Características
Plagioclasa	50	0,1-1	en matriz microcristalina y con maclas polisintéticas y de carlsband
Cuarzo			
Feldespato Potásico	15	0,05-1	microclina (macla polisintética) y sanidina (macla carlsband)
Anfibola	15	0,5-1	Hbl, pleocroismo, café-amarillo
Piroxeno			
	80		

b) Mineralogía secundaria	%	Características
Opacos	15	
Epidota		
Clorita		
Oxi-hidroxidos de Fe	5	en masa Fundamental
	20	

c) Observaciones 20 % de vidrio, adicional al 20% de plg ~ de 0,1mm de largo

FOTOMICROGRAFÍA



Fotomicrografía de sección transparente representativa de la muestra. Se observa una textura fanerítica vitrofirica con cristales de anfibolas, plagioclasa, . Imágenes a nicoles paralelos (izquierda) y cruzados (derecha). Escala 0,1mm.

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA

N° Muestra	Coord. Norte	Coord. Este
J17	8038099	419107

Clasificación Modal	Andesita de Anfíbola
----------------------------	----------------------

DESCRIPCIÓN GENERAL

Texturas	Mineral	Observaciones
Vitrofirica, seriada	Plg, Anf	Tamaño varia de 0,1 a 2 mm en plg y anf
Zonación oscilatoria	Plg.	
Pilotaxítica	Plg.	microlitos de plg con una orientacion preferencial
Borde de	Plg	

a) Mineralogía primaria	%	Diametro (mm)	Características
Plagioclasa	25	0,1-2	presentan una silueta de cola colombrina resultado de un enfriamiento rápido
Cuarzo			
Feldespato Potásico	5	0,05-1	Ortoclasa y sanidina (macla carlsband)
Anfíbola	15	0,5-1	Con borde de descomposición
Biotita	3	0,2-0,5	Con borde de descomposición, extincion paralela al clivaje, clivaje en 1 direccion
Piroxeno			forma irregular, clivaje claro en 2 direcciones 85 a 90° (foto) ,
	48		

b) Mineralogía secundaria	%	Características
Opacos	7	Se observa dentro de las anfíbolas y con hábito prismático, se asocia al magnetita por la forma y el magnetismo observado en la muestra de mano
Epidota		
Clorita		
Oxi-hidroxidos de Fe		
	7	

c) Observaciones	A los porcentajes estimados se le debe agregar 30 % de vidrio y 15% de Vesículas.
-------------------------	---

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA

N° Muestra	Coord. Norte	Coord. Este
J22	8040987	415508

Clasificación Modal	Andesita de Anfibola
---------------------	----------------------

DESCRIPCIÓN GENERAL

Texturas	Mineral	Observaciones
Vitrofirica, seriada	Plg, Anf	
Zonación oscilatoria	Plg	
Amigdaloidal	Plg	

a) Mineralogía primaria	%	Diametro (mm)	Características
Plagioclasa	50		algunos microlitos presentan una silueta de cola colombrina resultado de un enfriamiento rápido
Cuarzo			
Feldespato Potásico	20		en matriz felsosidídica y en cristales de sanidina y ortoclasa
Anfibola	10	0,1-0,5	tablillas y hexagonos
Piroxeno	15		octahedros
	95		

b) Mineralogía secundaria	%	Características
Opacos	5	triangulos y cuadrados irregulares
Epidota		
Clorita		
Oxi-hidroxiidos de Fe		en masa Fundamental
	5	

c) Observaciones	presenta además un 15% de Vesículas y un 30% de vidrio.
------------------	---

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA

N° Muestra	Coord. Norte	Coord. Este
J23	8040987	415508

Clasificación Modal	Andesita de Anfíbola
---------------------	----------------------

DESCRIPCIÓN GENERAL

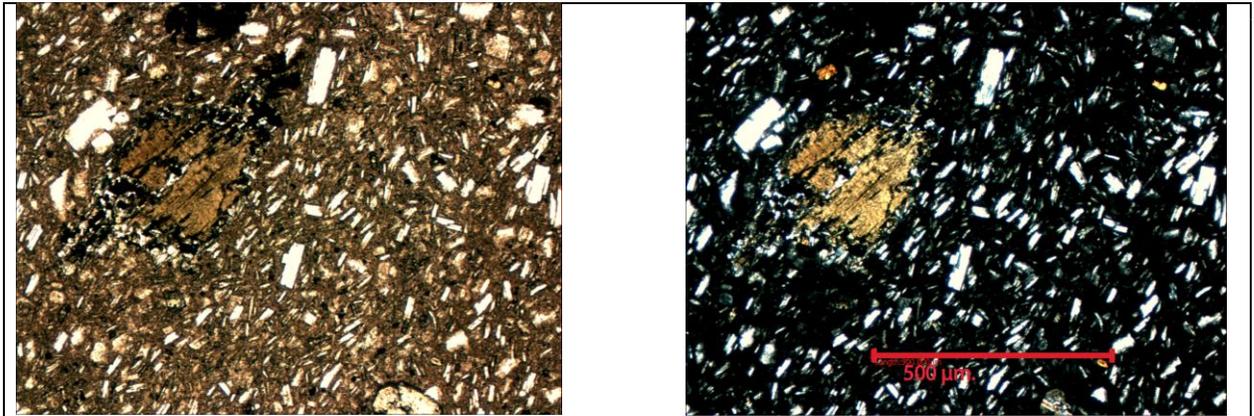
Texturas	Mineral	Observaciones
Vitrofirica	Plg, Anf	afanítica microcristalina, cristales distinguibles en microscopio, no a simple vista
Zonación oscilatoria	Plg,	
Borde de descomposición		

a) Mineralogía primaria	%	Diametro (mm)	Características
Plagioclasa	50	0,1-0,3	en matriz microcristalina, algunos microlitos presentan una silueta de cola colombrina resultado de un enfriamiento rápido
Cuarzo			
Feldespató Potásico	25	0,1-0,3	Sanidina y ortoclasas en masa fundamental microcristalina, algunos microlitos presentan silueta de cola colombrina
Anfíbola	10	0,5	Hbl, pleocroismo, café-amarillo, hexagono con clivaje marcado de 60° y 120°
Biotita	10	0,3	Con borde de descomposición, anherdral
	95		

b) Mineralogía secundaria	%	Características
Opacos	5	
Epidota		
Clorita		
Oxi-hidroxidos de Fe	5	

c) Observaciones	A simple vista se observa afanítica, pero se distinguen microcristales
------------------	--

FOTOMICROGRAFÍA



Fotomicrografía de sección transparente representativa de la muestra. Se observa una textura fanerítica vitrofirica con cristales de anfíbolos, plagioclasa, . Imágenes a nicoles paralelos (izquierda) y cruzados (derecha). Escala 0,1mm.

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA

N° Muestra	Coord. Norte	Coord. Este
J35		

Clasificación Modal	Andesita de Anfibola
----------------------------	----------------------

DESCRIPCIÓN GENERAL

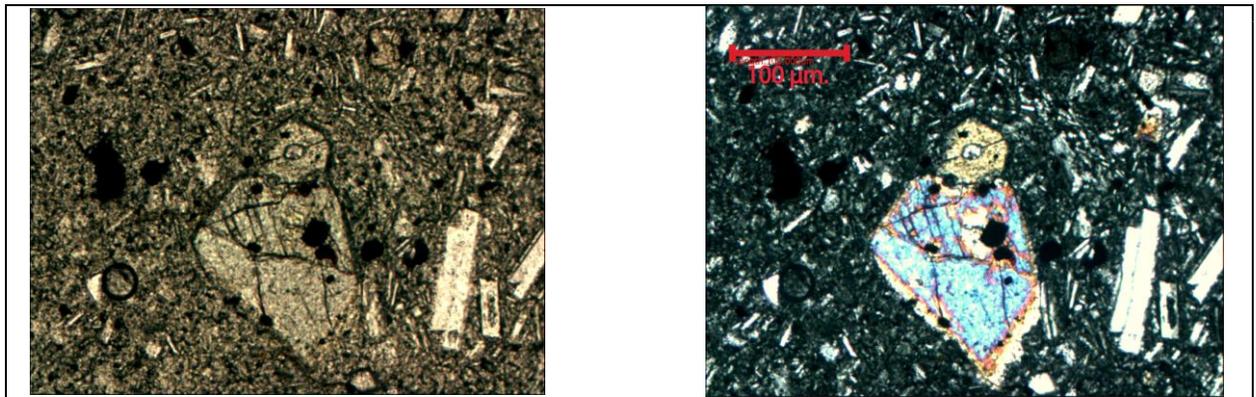
Texturas	Mineral	Observaciones
Vitrofirica	Plg, Anf	masa fundamental compuesta por microlitos de plg y fld k sin una orientacion preferencial en algunos (20%) cristales, se observa un borde negro
Traquítica pilotaxítica	Fld K , Anf	
Borde de descomposición	Anf	

a) Mineralogía primaria	%	Diametro (mm)	Características
Plagioclasa	50	0,1-1	en matriz microcristalina, algunos microlitos presentan una silueta de cola colombrina resultado de un enfriamiento rápido
Cuarzo			
Feldespató Potásico	30	0,1-1	Sanidina y ortoclasas en masa fundamental microcristalina, algunos microlitos presentan silueta de cola colombrina
Anfibola	10	0,2-1	Hbl, pleocroismo, café- amarillo, hexagono con clivaje marcado de 60° y 120°
Piroxeno	5	0,05-0,2	forma irregular, clivaje claro en 2 direcciones 85 a 90° (foto) ,
	95		

b) Mineralogía secundaria	%	Características
Opacos	5	diametro (mm) 0,2-0,5, formas cúbicas irregulares
Epidota		
Clorita		
Oxi-hidroxidos de Fe	5	

c) Observaciones	presenta un 5% de vesiculas respecto a la roca total
-------------------------	--

FOTOMICROGRAFÍA



Fotomicrografía de sección transparente representativa de la muestra. Se observa una textura fanerítica vitrofirica con cristales de anfíbolos, plagioclasa, en la anfibola en la parte central se observa un borde de reacción y un cristal de piroxeno en contacto con esta. Imágenes a nicoles paralelos (izquierda) y cruzados (derecha). Escala 0,1mm.

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA

N° Muestra	Coord. Norte	Coord. Este
J41	8033430	422378

Clasificación Modal	Andesita de Anfíbola
---------------------	----------------------

DESCRIPCIÓN GENERAL

Texturas	Mineral	Observaciones
Vitrofirica	Plg, Anf	
Zonacion oscilatoria	Plg	
Borde de descomposición	Anf	en algunos (20%) cristales, se observa un borde negro
Glomeroporfirica	Plg, Anf y Pirox	se observan cumulos (5%) de plg, anf y px, de 1-2mm de diametro del cumulo

a) Mineralogía primaria	%	Diametro (mm)	Características
Plagioclasa	50	0,1-2	en matriz microcristalina y en fenocristales
Cuarzo			
Feldespató Potásico	15	0,1-1	Sanidina y ortoclasas en masa fundamental microcristalina y en fenocristales
Anfíbola	10	0,2-1	en cristales y en cumulos de cristales, algunas se observan con oxidos de hierro (color anaranjado y borde de reaccion). Se distinguen los hexagonos y su clivaje en 60 y 120°
Piroxeno	15	0,05-0,5	forma octahedrica, pleocroismo incoloro a verdoso, clivaje -90°, se observa maclado en 1 direccion
	90		

b) Mineralogía secundaria	%	Características
Opacos	10	diametro (mm) 0,2-0,5, formas cúbicas irregulares
Epidota		
Clorita		
Oxi-hidroxidos de Fe		
	10	

c) Observaciones	
------------------	--

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA

N° Muestra	Coord. Norte	Coord. Este
J43	8033742	423271

Clasificación Modal	Toba de ceniza cristalina.
---------------------	----------------------------

DESCRIPCIÓN GENERAL

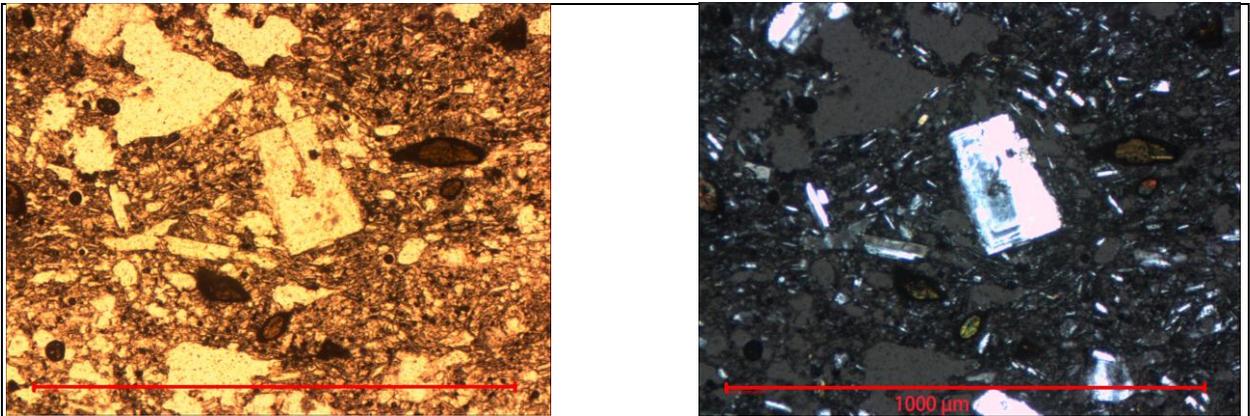
Texturas	Mineral	Observaciones
Vitrofirica	Plg, Anf	
Zonación Oscilatoria	Plg	

a) Mineralogía primaria	%	Diametro (mm)	Características
Plagioclasa	30	0,1-1	en matriz microcristalina, algunos microlitos presentan una silueta de cola colombrina resultado de un enfriamiento rápido
Cuarzo			
Feldespató Potásico	30	0,2 -1	Sanidina y ortoclasas en masa fundamental microcristalina y en fenocristales
Anfibola	30	0,2-0,5	Se distinguen los hexagonos y su clivaje en 60 y 120°
Biotita	10		clivaje en 1 dirección colores de interf, 2do orden calipso rosado naranja, pleocroismo alto café verde
	100		

b) Mineralogía secundaria	%	Características
Opacos	5	diametro (mm) 0,2-0,5, formas cúbicas irregulares
Epidota		
Clorita		
Oxi-hidroxiidos de Fe		
	5	

c) Observaciones	20% de Vesciculas de 0,1 a 1mm, 30% de escoria de 3 mm , incolora, amorfa bajo redondeamiento y esfericidad
------------------	---

FOTOMICROGRAFÍA



Fotomicrografía de sección transparente representativa de la muestra. Se observa una textura fanerítica vitrofirica con cristales de anfíbolos, plagioclasa y biotita. En la plagioclasa en la parte central se observa con textura de zonación oscilatoria, también algunas vesciculas. Imágenes a nicoles paralelos (izquierda) y cruzados (derecha). Escala 1mm.

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA

N° Muestra	Coord. Norte	Coord. Este
J44	8033742	423271

Clasificación Modal	Toba de ceniza cristalina.
----------------------------	----------------------------

DESCRIPCIÓN GENERAL

Texturas	Mineral	Observaciones
Vitrofirica	Plg, Anf	
Zonación Oscilatoria	Plg	
Piroclástica		

a) Mineralogía primaria	%	Diametro (mm)	Características
Plagioclasa	20	0,1-0,5	en matriz microcristalina, algunos microlitos presentan una silueta de cola colombrina resultado de un enfriamiento rápido
Cuarzo	10	0,5	
Feldespato Potásico	10	0,1-1	Alterada y fracturada con forma de tablilla con clivaje en direccion del largo
Anfibola	15	1	Fracturada con clivaje en 60 y 120°, colores de interferencia de 2do orden
Biotita	10	0,5-2	clivaje en 1 direccion colores de interf, 2do orden calipso rosado naranjo, pleocroismo alto café verde
	65		

b) Mineralogía secundaria	%	Características
Opacos	5	diametro (mm) 0,2-0,5, con algunas caras propias en tabilllas y fragmentos irregulares cubicos y triangulares
Epidota		
Clorita		
Oxi-hidroxicos de Fe	5	

c) Observaciones	15% de vesciculas y 15% de vidrio
-------------------------	-----------------------------------

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA

N° Muestra	Coord. Norte	Coord. Este
J45	8034262	423642

Clasificación Modal	Andesita de Anfibola
----------------------------	----------------------

DESCRIPCIÓN GENERAL

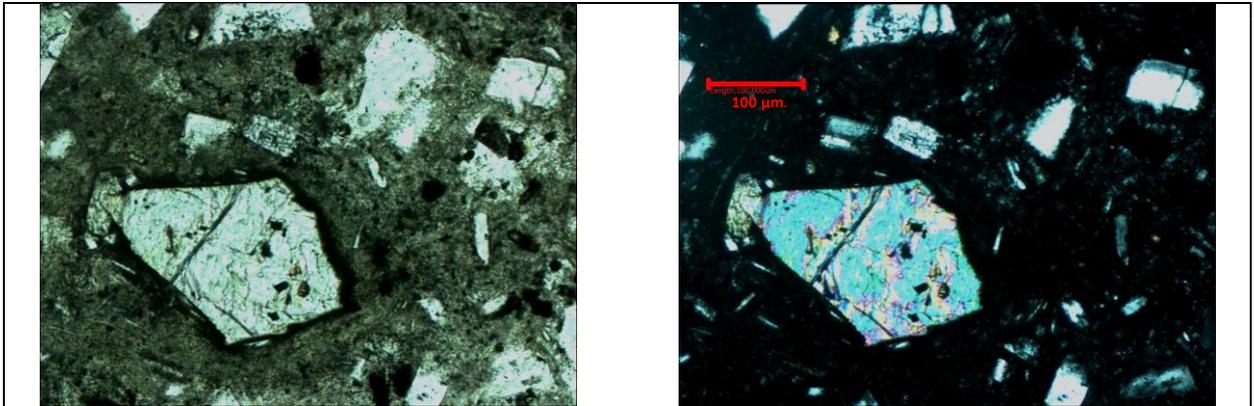
Texturas	Mineral	Observaciones
Vitrofirica	Plg, Anf	
Zonación Oscilatoria	Plg	
Glomeroporfirica	Plg, Anf, Px	se observan cumulos (5%) de plg, anf y px, de 1-2mm de diametro del cumulo
Borde de descomposición	Anf y Bt	en algunas anf y bt. Se observa un borde negro que rodea estos cxs

a) Mineralogía primaria	%	Diametro (mm)	Características
Plagioclasa	30	0,1-3	en microlitos y en fenocristales
Cuarzo			
Feldespató Potásico	15	0,1-3	Alterado y fracturado con forma de tablilla con clivaje en direccion del largo
Piroxeno	5	0,1-0,2	Fracturado con clivaje en 90°, colores de interferencia de 1er orden
Anfibola	10	0,1-0,3	Fracturado con clivaje en 60° y 120°, colores de interferencia de 2do orden
Biotita	5	0,2-0,5	Tablillas alargadas con cierta alteración de óx de hierro
	65		

b) Mineralogía secundaria	%	Características
Opacos	10	Formas de Anf, Bt y Plg
Epidota		
Clorita		
Oxi-hidroxidos de Fe		
	10	

c) Observaciones	15% de vidrio
-------------------------	---------------

FOTOMICROGRAFÍA



Fotomicrografia de sección transparente representativa de la muestra. Se observa una textura fanerítica vitrofirica con cristales de anfibolas y plagioclasa, con borde de descomposición en anfibola. Imágenes a nicoles paralelos (izquierda) y cruzados (derecha). Escala 100 μm.

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA

N° Muestra	Coord. Norte	Coord. Este
J51	8041956	413462

Clasificación Modal	Toba lito vítrica de lapilli
----------------------------	------------------------------

DESCRIPCIÓN GENERAL

Texturas	Tipos	%	Observaciones
Piroclástica	Juveniles	30	pómez de grano medio a fino <5mm, se observan cxs de plg alterados, se distinguen por su contenido de vesículas
	Líticos	20	
	Cristales	10	fragmentos de andesita de grano fino, argilizados
	Matriz	40	
		100	

a) Mineralogía primaria	%	Diametro (mm)	Características
Plagioclasa	30	0,1-3	
Cuarzo			
Feldespato Potásico	15	0,1-3	
Anfibola	5	0,2-0,5	
	50		

b) Mineralogía secundaria	%	Características
Opacos	15	
Arcillas	30	No se identifican con claridad, requieren mayor análisis, se encuentran alterando juveniles, cristales, líticos y rellenando espacios
Clorita		
Oxi-hidroxiidos de Fe		
	45	

c) Observaciones	Alteración argílica
-------------------------	---------------------

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA

N° Muestra	Coord. Norte	Coord. Este
J53		

Clasificación Modal	Toba cristalina lítica de andesita de anfibola
---------------------	--

DESCRIPCIÓN GENERAL

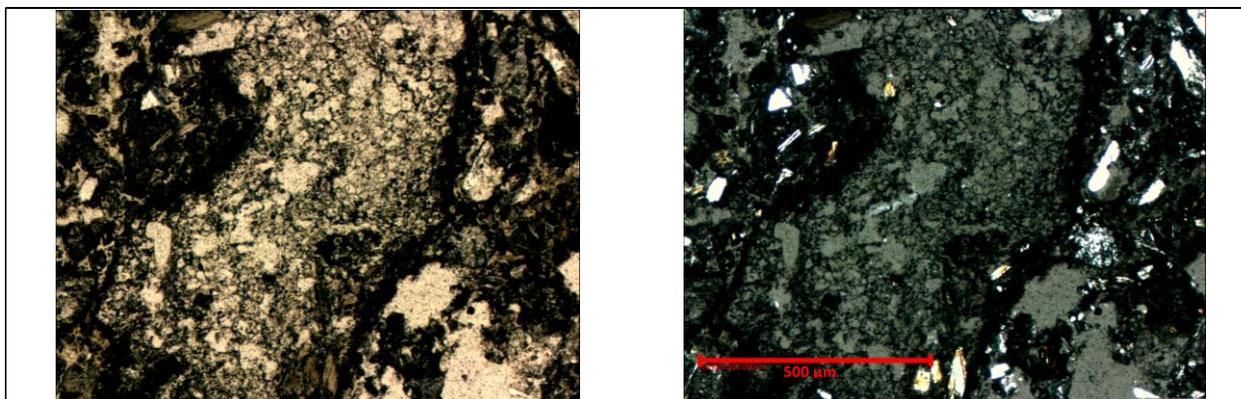
Texturas	Tipos o minerales	%	Observaciones
Piroclástica	Juveniles	5	pómez de grano medio a fino <5mm, se observan cxs de plg alterados, se distinguen por su contenido de vesículas fragmentos de andesita de grano fino, argilizados presentan en la matriz y en liticos descritos en el cuadro con contenido de cristales de grano fino, microcristalinos y vidrio u criptocristales en un 10 de los cristales aprox.
	Líticos	25	
	Cristales	50	
	Matriz	20	
zonacion oscilatoria	Plagioclasa		
		100	

a) Mineralogía primaria	%	Diametro (mm)	Características
Plagioclasa	20	0,2-2	en matriz y en líticos de un tamaño entre 0,2 y 2 mm
biotita	5	0,2-2	alterada y fracturada con forma de tablilla con clivaje en dirección del largo
Feldespató Potásico	10	0,1-3	sanidina y ortoclasas en masa fundamental microcristalina, algunos microlitos presentan una silueta de cola colombina
Anfibola	10	0,2-0,5	con borde de reacción alterada y fracturada con clivaje en 60 y 120°, colores de interferencia de 2do orden
			45

b) Mineralogía secundaria	%	Características
Opacos	5	con algunas caras propias en tablillas y fragmentos irregulares
Arcillas		
Clorita		
Oxi-hidroxiidos de Fe		
	5	

c) Observaciones	
------------------	--

FOTOMICROGRAFÍA



Fotomicrografía de sección transparente representativa de la muestra. Se observa una textura piroclástica con abundante vidrio y vesículas, se logran distinguir con cristales de plagioclasa, . Imágenes a nicotes paralelos (izquierda) y cruzados (derecha). Escala 500 μm.

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA

N° Muestra	Coord. Norte	Coord. Este
J61	8042088	415296

Clasificación Modal Andesita de Anfíbola

DESCRIPCIÓN GENERAL

Texturas	Mineral	Observaciones
Vitrofirica	Plg, Anf	
Zonación Oscilatoria	Plg	
Glomeroporfirica	Plg, Anf	se observan cumulos (5%) de plg y anf , de 1-2mm de diametro del cumulo
Borde de descomposición	Anf	en algunas anf. Se observa un borde negro que rodea estos cxs

a) Mineralogía primaria	%	Diametro (mm)	Características
Plagioclasa	10	0,1-3	en microlitos en cumulis
Cuarzo			
Feldespató Potásico	5	0,1-3	Alterado y fracturado con forma de tablilla con clivaje en direccion del largo
Piroxeno			
Anfíbola	5	0,1-0,3	Alterada, Fracturado con clivaje en 60° y 120°, colores de interferencia de 2do orden
Biotita			
	20		

b) Mineralogía secundaria	%	Características
Opacos	10	Formas de Anf y Plg, tambien presenta boxwork de minerales con caras propias
Epidota		
Clorita		
Oxi-hidroxidos de Fe	30	rellenando espacios y reemplazando minerales primarios parcialmente, color rojo
	40	

c) Observaciones 20% de vidrio, 20% de Vesciculas

ANEXO D: Geocronología

Informe Ar/Ar 63/2012

Solicitante: Jose Barrientos C.
INFINERGEOS SPA.

Muestra : ***M-G2***
Material : biotita
N° interno : 12843-02

Análisis de step heating

Edad integrada: 390 ± 80 ka
Edad Plateau: **340 ± 60 ka**
Pasos en el plateau: 4/7 (77.3% en el plateau)
MSWD Plateau: 0.54

Análisis de Isócrona

Edad Isócrona: 380 ± 180 ka
Pasos: 5/7 (Sin los pasos A y C)
Intercepto 40/36: 290 ± 12
MSWD Isócrona: 0.61

Comentarios:

Todos los resultados obtenidos son concordantes, no se aprecia exceso de Ar, todos los pasos tienen un bajo contenido de Ar radiogénico. Se recomienda usar la edad obtenida con el plateau.

Muestra : **J5**
Material : roca total sin anfíbolas
N° interno : 12840-01

Análisis de step heating

Edad integrada: 362 ± 12 ka
Edad Plateau: **363 ± 7 ka**
Pasos en el plateau: 7/7 (100% en el plateau)
MSWD Plateau: 0.18

Análisis de Isócrona

Edad Isócrona: 363 ± 8 ka
Pasos: 7/7 (Todos los pasos)
Intercepto 40/36: 295 ± 3
MSWD Isócrona: 0.22

Comentarios:

Todos los resultados obtenidos son concordantes, no se aprecia exceso de Ar. Se recomienda usar la edad obtenida con el plateau.

Nota: Se intento en dos oportunidades la datación de la muestra J-10 (anfíbola), en ninguna de las dos oportunidades fue posible obtener una edad confiable, posiblemente esto ocurrió dado al bajo contenido de K de la anfíbola y a una edad muy joven de la muestra.

DATOS ADICIONALES

Razón 40/36 de argón atmosférico: 295.5 ± 0.5
MSWD aceptable: < 3

Condiciones mínimas para el plateau: 3 pasos consecutivos con concordancia de error a 2 sigma y por lo menos un 50% de Ar³⁹.

En el informe, los errores en las edades están expresados en el ámbito de dos sigma de confiabilidad.

En los espectros de step-heating, los errores están expresados con dos sigmas de confiabilidad.

En las tablas de datos y el diagrama de isócrona inversa, los datos están expresados con un sigma de confiabilidad.

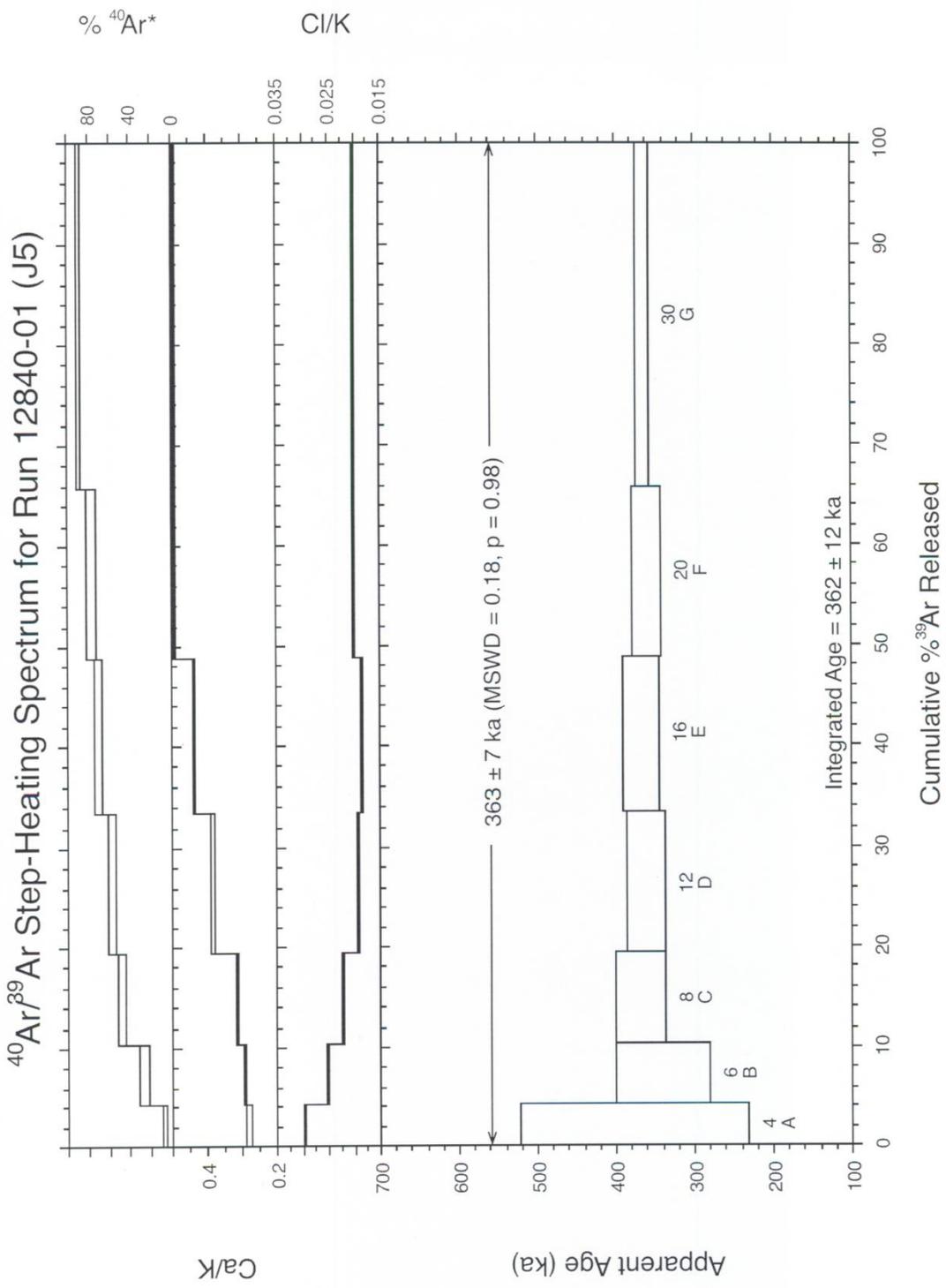
Cada tres o cuatro pasos se hicieron análisis de niveles de blancos, que permitieron ir corrigiendo los resultados posteriores.



CARLOS PEREZ DE ARCE R.
JEFE UNIDAD DE GEOLOGIA ISOTOPICA

**40Ar / 39Ar Step-Heating Data for Run
12840-01; J5**

roca total sin anfibola



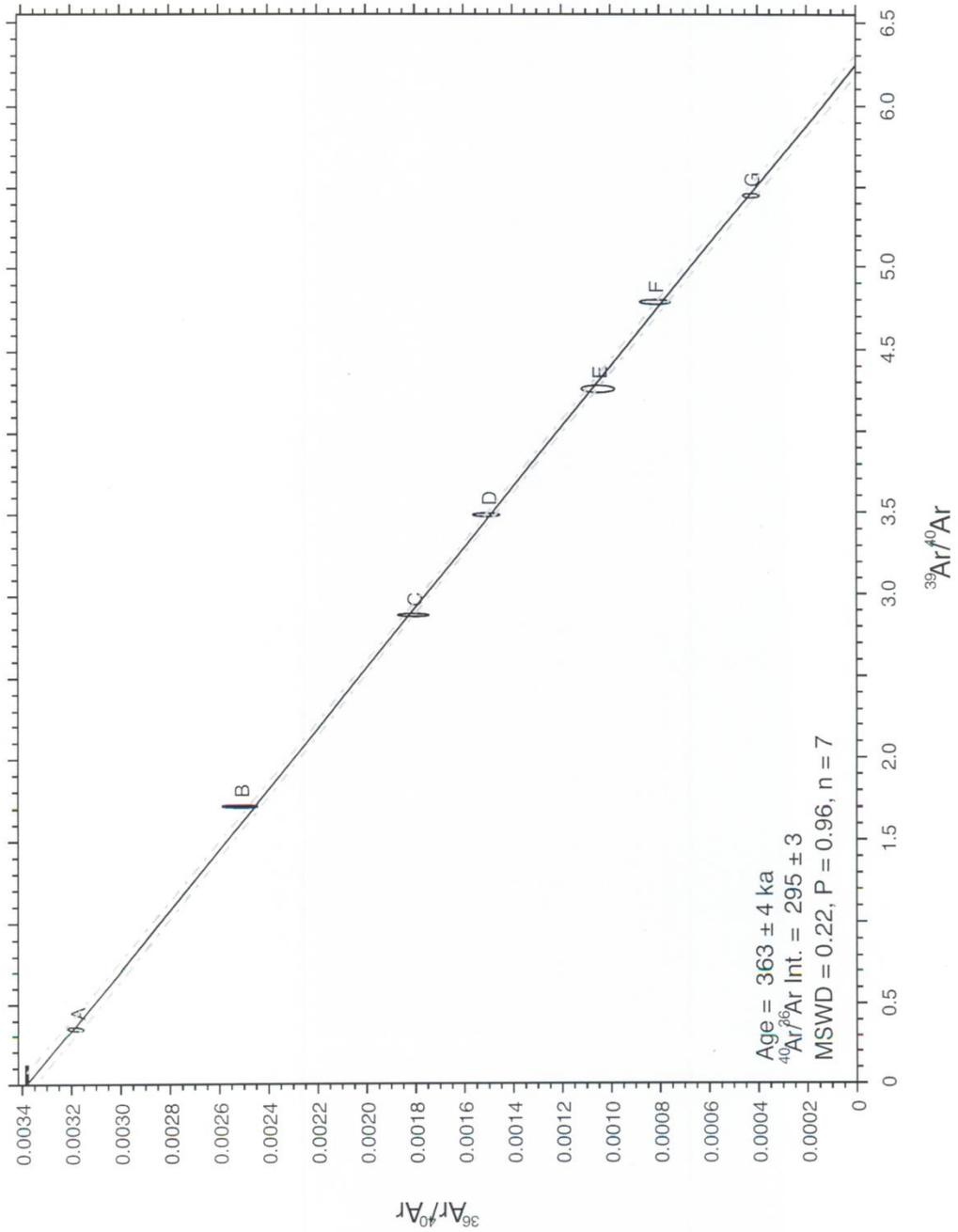
Step-Heating Information

Data
40Ar/39Ar Step-Heating Data for Run 12840-01; J5

Run ID	Watts	C _a /K	C _i /K	36Ar/39Ar	%36Ar(Ca)	40*Ar/39Ar	Mol 39Ar x e-14	% Step	Cum. %	%40Ar*	Age (ka)	± Age	Group
J5, Run ID# 12840-01	(J = 0.0012556 ± 9.000000e-7):												
12840-01A	•4.0	0.27746	0.02981	0.008791	0.5	0.16580	3.9500	4.4	4.4	6.0	375.52517	72.60251	1
12840-01B	•6.0	0.29074	0.02511	0.001506	2.9	0.14973	5.4840	6.1	10.5	25.7	339.13410	29.94947	1
12840-01C	•8.0	0.31171	0.02211	0.000675	6.9	0.16202	8.1070	9.0	19.5	46.6	366.97240	15.72260	1
12840-01D	•12.0	0.37860	0.01924	0.000486	11.6	0.15910	12.6549	14.1	33.6	55.6	360.35752	12.09337	1
12840-01E	•16.0	0.43302	0.01853	0.000310	20.8	0.16159	13.6863	15.2	48.9	69.1	365.99193	11.16673	1
12840-01F	•20.0	0.48812	0.02012	0.000243	29.9	0.15836	15.3128	17.1	65.9	75.9	358.68752	8.94219	1
12840-01G	•30.0	0.48745	0.01992	0.000151	48.2	0.16051	30.5693	34.1	100.0	87.5	363.54814	4.31393	1
Integ. Age =											362	12	
(•) Plateau Age =								100.0			363.00000	7.00000	1

Sample ID	Material	Integ. Age	Error	Age	MSWD	Prob.	Steps	n/n-total	% Gas
J5 12840-01	R, Total S/Ar 362	12	7	363	0.2	0.98	A-G	7/7	100.0

Isochron for Run 12840 (J5)



Isochron Information

Data

Summary Isochron Data for 12840-01A to 12840-01G

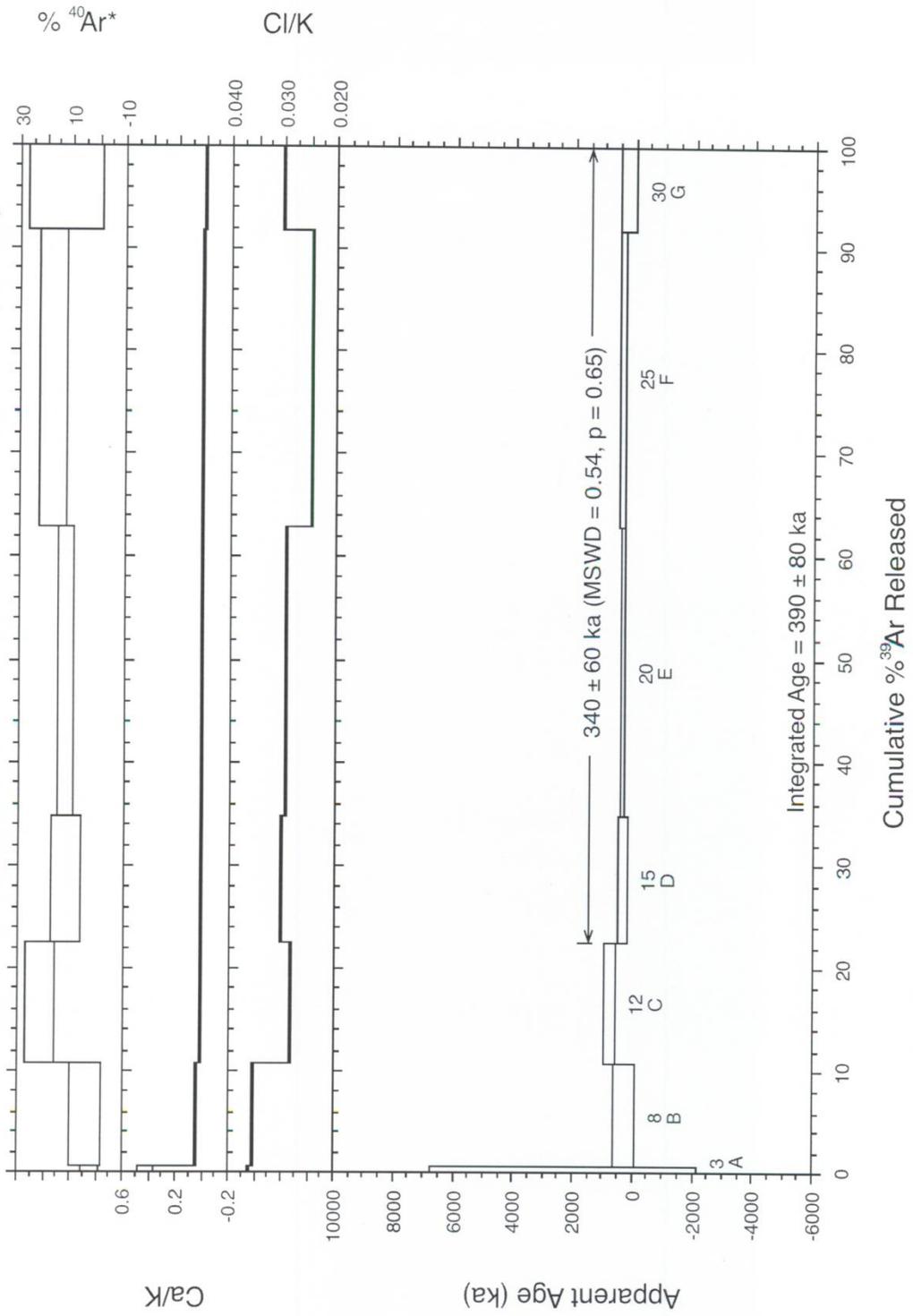
Run ID	Status	40*Ar/39Ar	(36/40)isoch	%±	(39/40)isoch	%±	Correl 36/39	Group
J5								1
12840-01A	OK	0.16580	0.0031802	1.2	0.36345	0.429	0.273	1
12840-01B	OK	0.14973	0.0025134	3.1	1.71832	0.177	0.087	1
12840-01C	OK	0.16202	0.0018069	3.7	2.87663	0.245	0.080	1
12840-01D	OK	0.15910	0.0015020	4.2	3.49569	0.202	0.067	1
12840-01E	OK	0.16159	0.0010473	6.8	4.27327	0.230	0.043	1
12840-01F	OK	0.15836	0.0008155	7.8	4.79294	0.229	0.036	1
12840-01G	OK	0.16051	0.0004244	8.2	5.44882	0.194	0.033	1

Sample	Aliquot	Age	MSE	40/36tr	MSE	MSWD	Prob	n	Pct. Gas	Steps
J5	12840-01	362.8	3.8	295.3	3.3	0.216	0.956	7	0.0	-

**40Ar/39Ar Step-Heating Data for Run
12843-02; M-G2**

biotita

⁴⁰Ar/³⁹Ar Step-Heating Spectrum for Run 12843-02 (M-G2)



Step-Heating Information

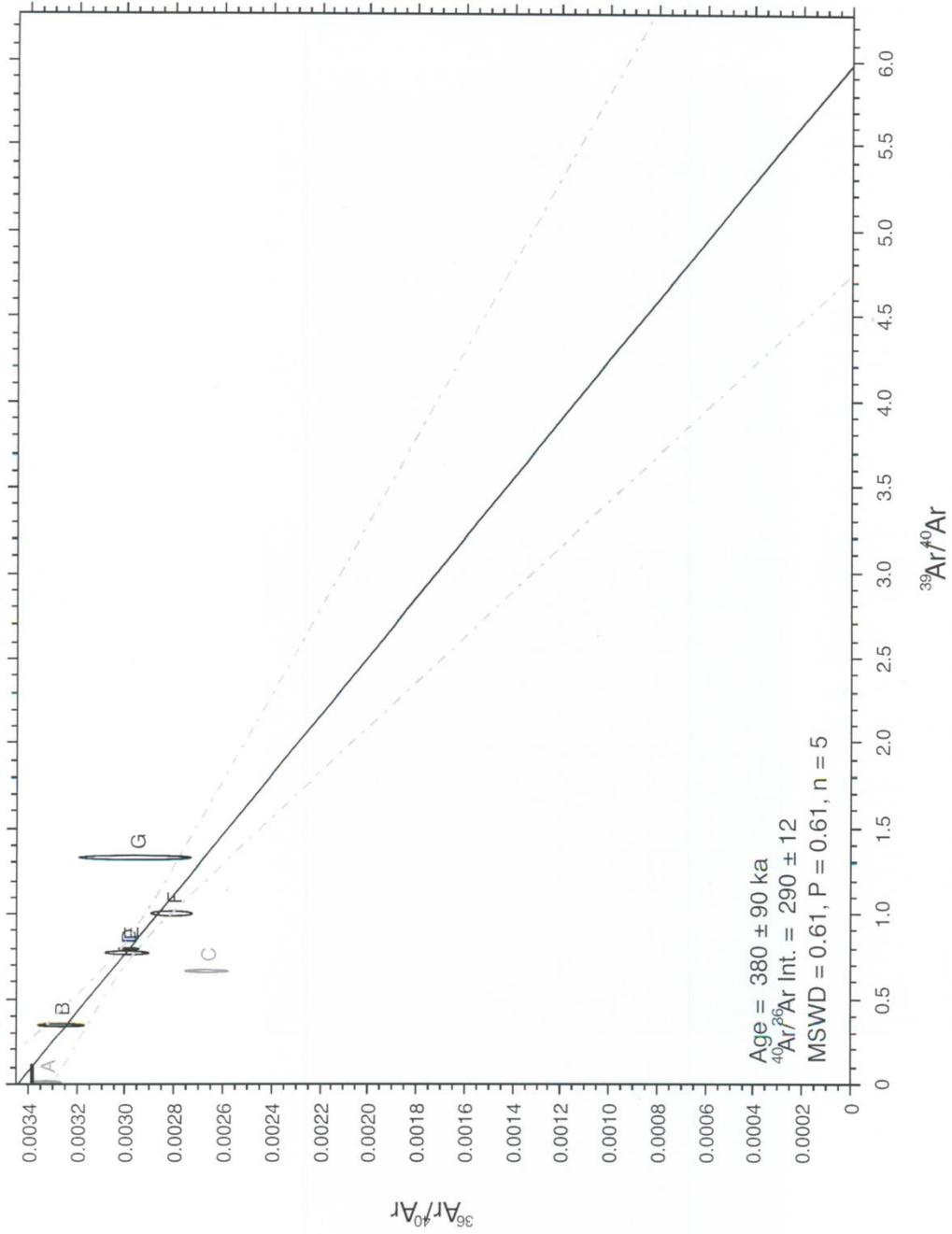
Data

40Ar/39Ar Step-Heating Data for Run 12843-02; M-G2

Run ID	Watts	Ca/K	Cl/K	36Ar/39Ar	%36Ar(Ca)	40*Ar/39Ar	Mol 39Ar x e-14	% Step	Cum. %	%40Ar*	Age (ka)	± Age	Group
M-G2, Run ID# 12843-02 (J = 0.001254 ± 9.000000e-7):													
12843-02A	3.0	0.41320	0.03620	0.182529	0.0	1.00495	0.0958	0.7	0.7	1.8	2272.16151	2233.02896	1
12843-02B	8.0	0.03633	0.03550	0.009184	0.1	0.10039	1.3254	10.1	10.8	3.6	227.10154	183.33360	1
12843-02C	12.0	0.01385	0.02818	0.003982	0.1	0.31844	1.5576	11.9	22.7	21.3	720.28585	91.72909	1
12843-02D	•15.0	0.01008	0.03033	0.003841	0.0	0.14899	1.6020	12.2	34.9	11.6	337.04207	80.80461	1
12843-02E	•20.0	0.00927	0.02940	0.003723	0.0	0.14885	3.6742	28.0	62.9	11.9	336.71967	40.36380	1
12843-02F	•25.0	0.00733	0.02469	0.002775	0.0	0.16952	3.7930	28.9	91.8	17.1	383.47037	59.96382	1
12843-02G	•30.0	0.00356	0.03001	0.002221	0.0	0.09531	1.0787	8.2	100.0	12.7	215.62528	119.01267	1
Integ. Age=											390	80	
(•) Plateau Age =								77.3			340.00000	60.00000	

Sample	ID	Material	Integ. Age	Error	Age	MSWD	Prob.	Steps	n/n-total	% Gas
M-G2	12843-02	Biotita	390	80	340	0.5	0.65	D-G	4/7	77.3
				60						12

Isochron for Run 12843 (M-G2)



Isochron Information

Data
Summary Isochron Data for 12843-02A to 12843-02G

Run ID	Status	40*Ar/39Ar (36/40)isocr	%±	(39/40)isoch	%±	Correl 36/3:	Group
M-G2							1
12843-02A	Deleted	1.00495	1.8	0.01820	0.942	0.082	1
12843-02B	OK	0.10039	3.0	0.35555	0.630	0.061	1
12843-02C	Deleted	0.31844	3.4	0.66914	0.381	0.099	1
12843-02D	OK	0.14899	3.1	0.77928	0.460	0.117	1
12843-02E	OK	0.14885	1.6	0.80103	0.238	0.156	1
12843-02F	OK	0.16952	3.2	1.01114	0.505	0.084	1
12843-02G	OK	0.09531	8.0	1.33135	0.688	0.075	1

Sample	Allquot	Age	MSE	40/36tr	MSE	MSWD	Prob	n	Pct. Gas	Steps
M-G2	12843-02	378.3	95	290.5	12.2	0.611	0.608	5	0.0	-

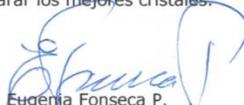


Informe de factibilidad 37/12

Solicitado por: Sr. José Barrientos C.
Razón Social/Proyecto: Infinergeo SPA.
Cantidad de muestras: 4
Fecha de entrega: 19 de julio de 2012
Correlativo interno: 288-12

Solicita factibilidad de datación por método Ar/Ar

- 1) **J-05**
Roca afanítica con 1% de fenocristales de plagioclasa cribados, el resto está formado por microlitos de plagioclasa en textura fluidal, en intersticios aparece vidrio y finas diseminaciones de opacos. La roca contiene un 4% de pequeños cristales de anfíbola con bordes oxidados. Estos deben ser extraídos para que no afecten el resultado de la datación.
Roca **APTA** para datación por método Ar/Ar en roca total (sin anfíbolos)
- 2) **J-10**
Roca de textura porfídica con fenocristales de plagioclasa seriados y cribados, además grandes fenocristales de anfíbola con bordes algo oxidados y con inclusiones, dado el gran tamaño y la abundancia deben seleccionarse los mejores cristales. Masa fundamental intersertal con microlitos de plagioclasa y en intersticios feldespato potásico y diseminaciones de opacos.
Roca **APTA** para datación por método Ar/Ar en anfíbola.
- 3) **M-G1**
Roca fragmentaria, piroclástica retrabajada con relictos de fragmentos de cristales de feldespatos, cloritas, cuarzo, ferromagnesianos oxidados, esta fracción es escasa no sobrepasa el 8%. Hay cristales de sanidina (1%) en el corte. La matriz es isotropa de color propio pardo.
Roca **APTA** para datación por método Ar/Ar en sanidina, siempre que se logren los cristales necesarios, teñir con nitrato de cobalto una vez separados.
- 4) **M-G2**
Se observan grandes cristales tabulares de plagioclasa, biotita, cuarzo, piroxenos, sustentados en vidrio, de textura esferulítica.
Roca **APTA** para datación por método Ar/Ar en biotita. Algunos cristales tienen inclusiones y otros están algo oxidados. Separar los mejores cristales.


Eugenia Fonseca P.
Geólogo
Jefe Depto. de Laboratorios

CC/Sr. Carlos Pérez de Arce. Jefe Sección Geología Isotópica.
Laboratorio de Separación de Minerales
Sr. Eugenio Pizarro. Responsable de Taller de Molienda.

Departamento de Laboratorios Servicio Nacional de Geología y Minería
Til Til 1993 - Nuñoa - Fono: (56-2) 2385292 - Fax: (56-2) 2385332 - Página Web: www.sernageomin.cl
E-mail: jefe_lab@sernageomin.cl - Casilla: 10465 y 1347, Correo 21 - **SANTIAGO - CHILE**

ANEXO E: Zonas de caída de piroclastos

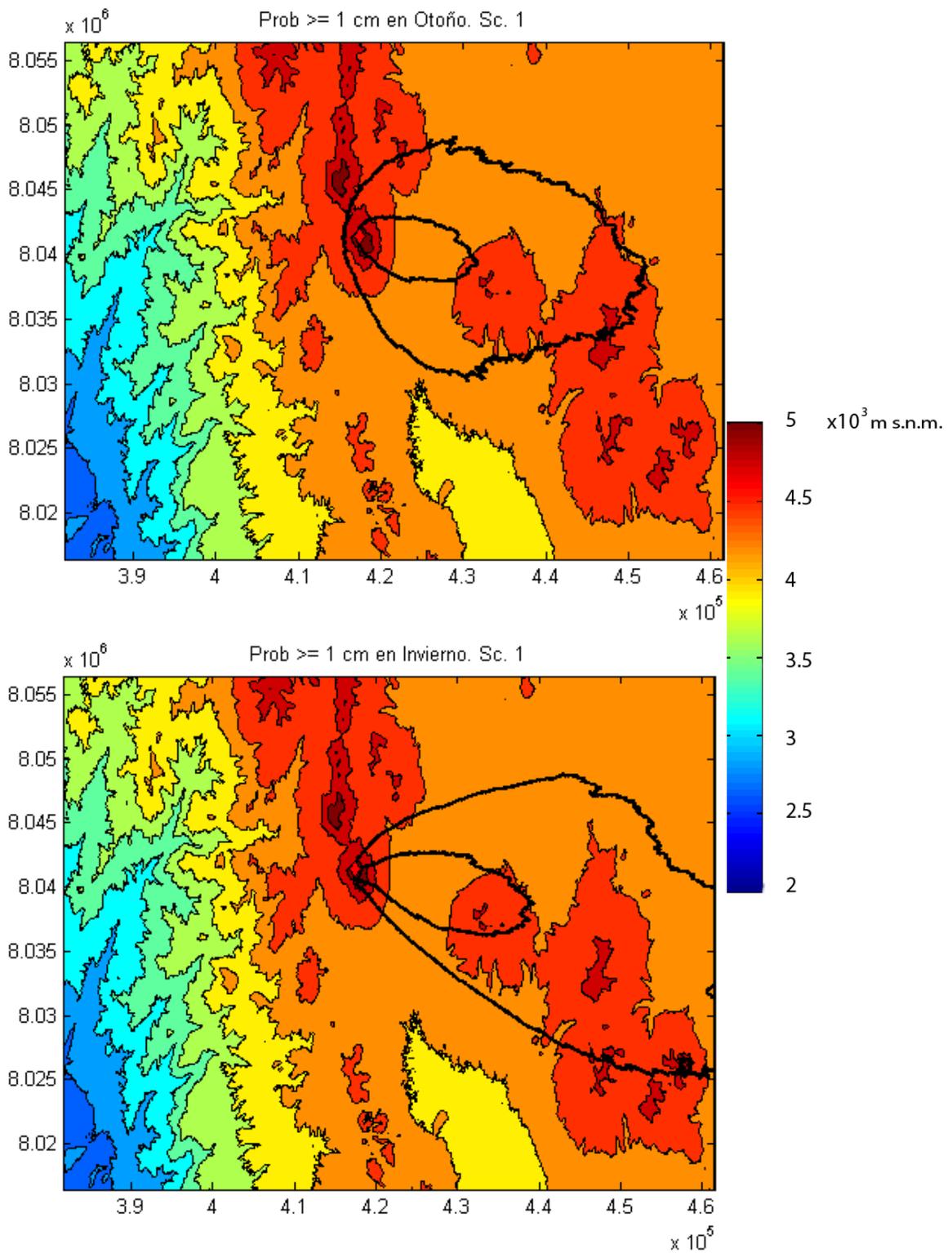


Ilustración 1. Delimitación de áreas con probabilidades de un 50 y 30% (de menor y mayor tamaño respectivamente) de obtener depósitos de caída de espesor igual o mayor a 1cm, si se produce una erupción en el escenario 1 de IEV 2-3, en otoño (figura superior) y en invierno (figura inferior).

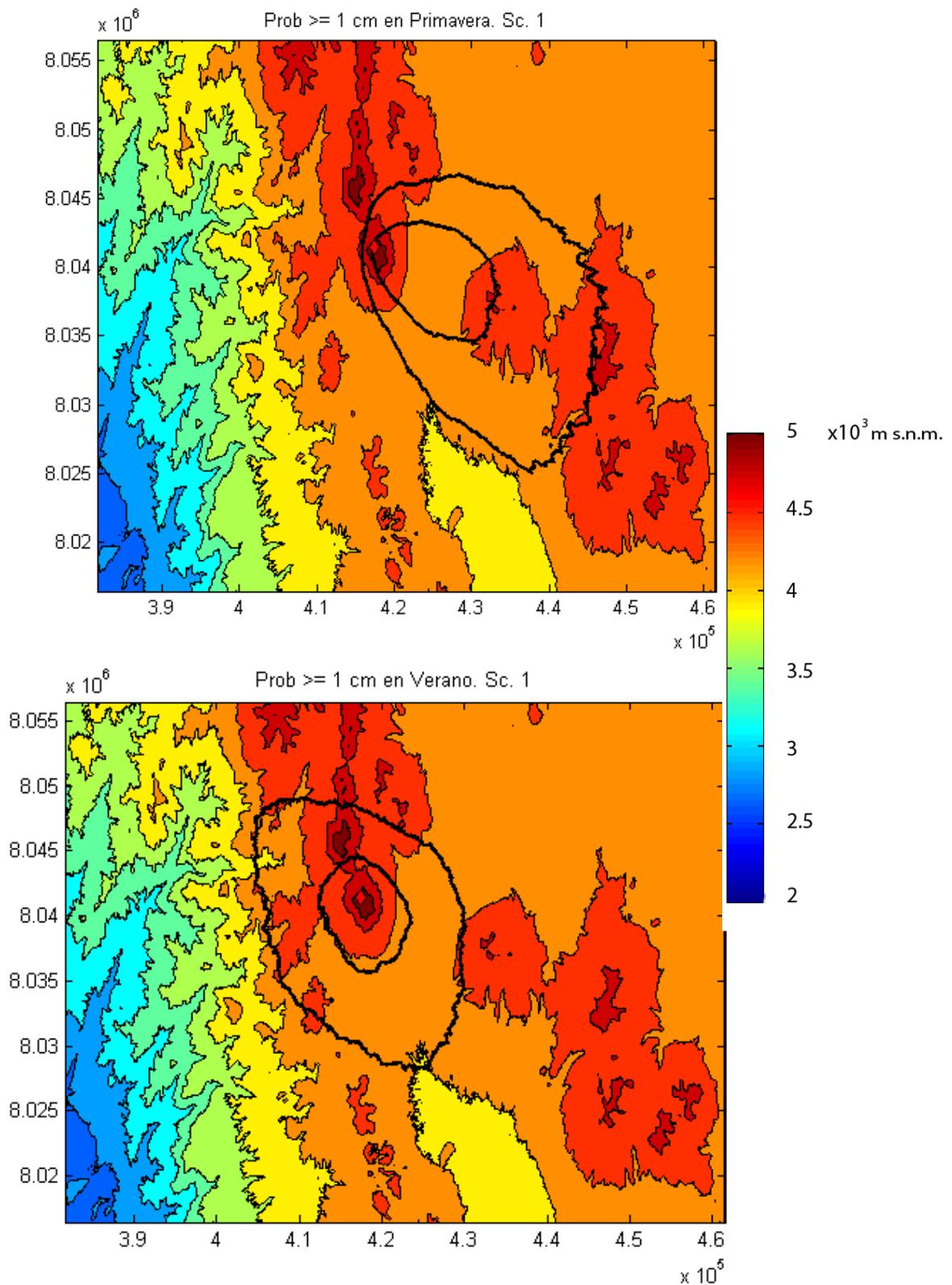


Ilustración 2. Delimitación de áreas con probabilidades de un 50 y 30% (de menor y mayor tamaño respectivamente) de obtener depósitos de caída de espesor igual o mayor a 1cm, si se produce una erupción en el escenario 1 de IEV 2-3, en primavera (figura superior) y en verano (figura inferior).

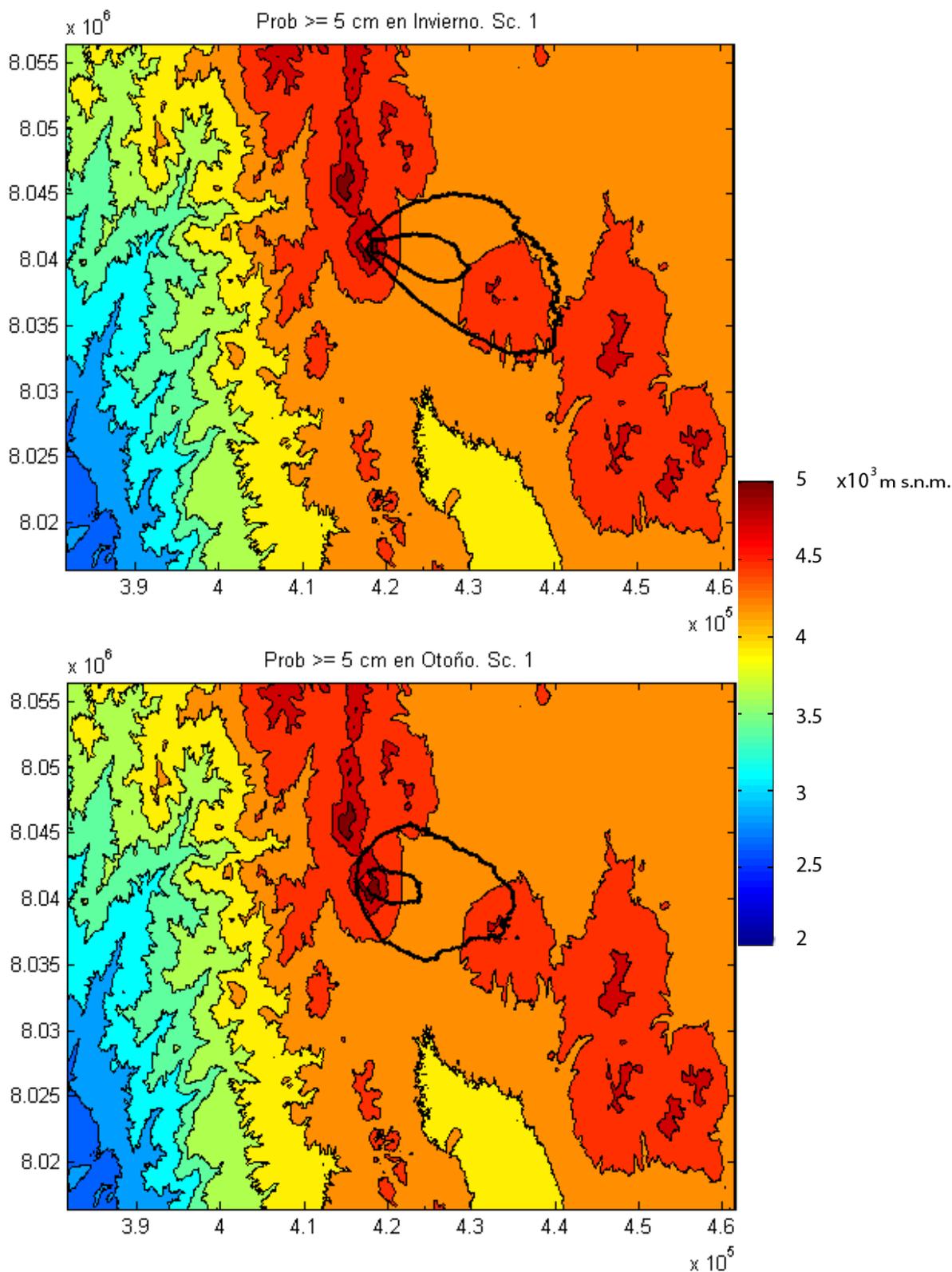


Ilustración 3. Delimitación de áreas con probabilidades de un 50 y 30% (de menor y mayor tamaño respectivamente) de obtener depósitos de caída de espesor igual o mayor a 5cm, si se produce una erupción en el escenario 1 de IEV 2-3, en otoño (figura superior) y en invierno (figura inferior).

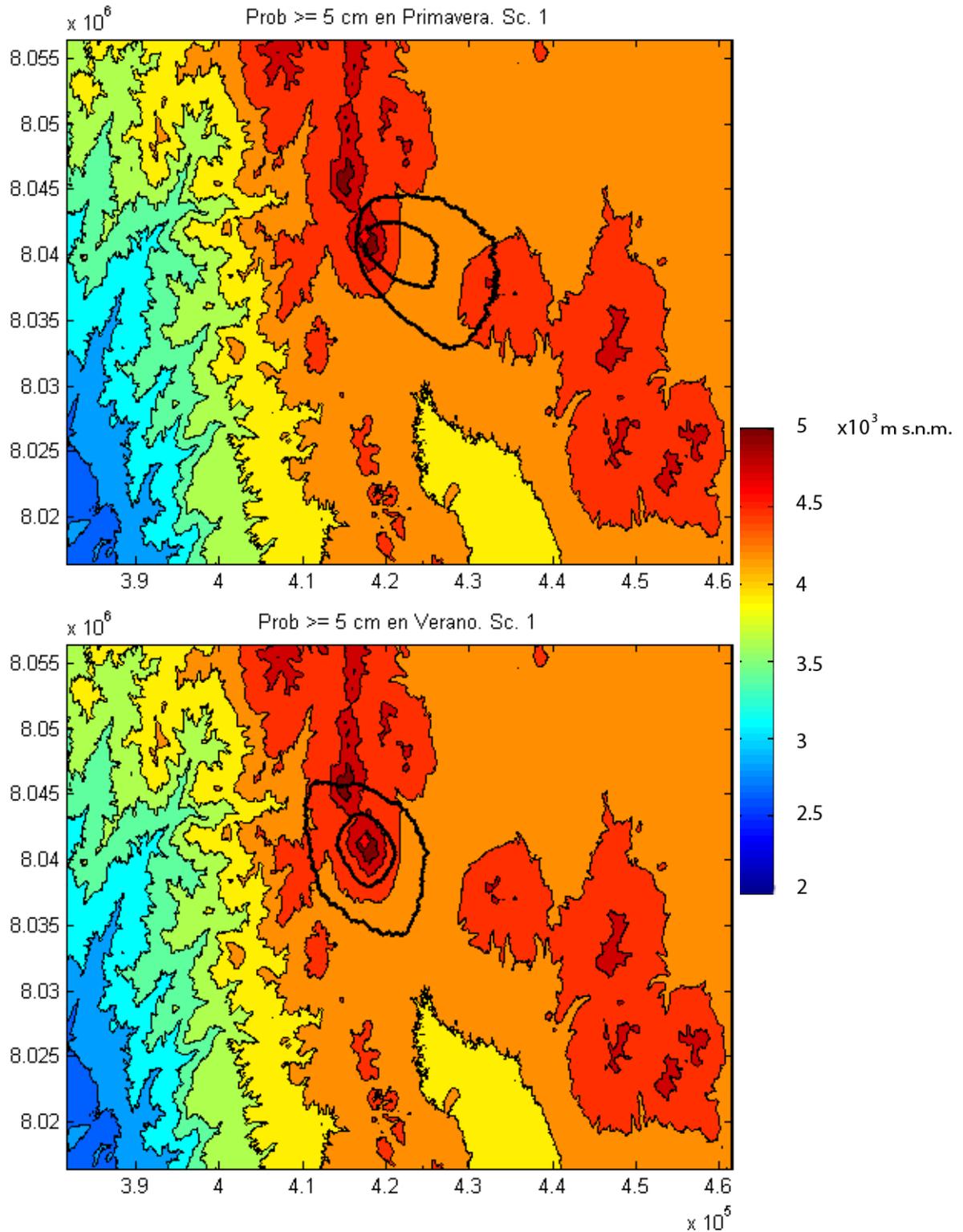


Ilustración 4. Delimitación de áreas con probabilidades de un 50 y 30% (de menor y mayor tamaño respectivamente) de obtener depósitos de caída de espesor igual o mayor a 5 cm, si se produce una erupción en el escenario 1 de IEV 2-3, en primavera (figura superior) y en verano (figura inferior).

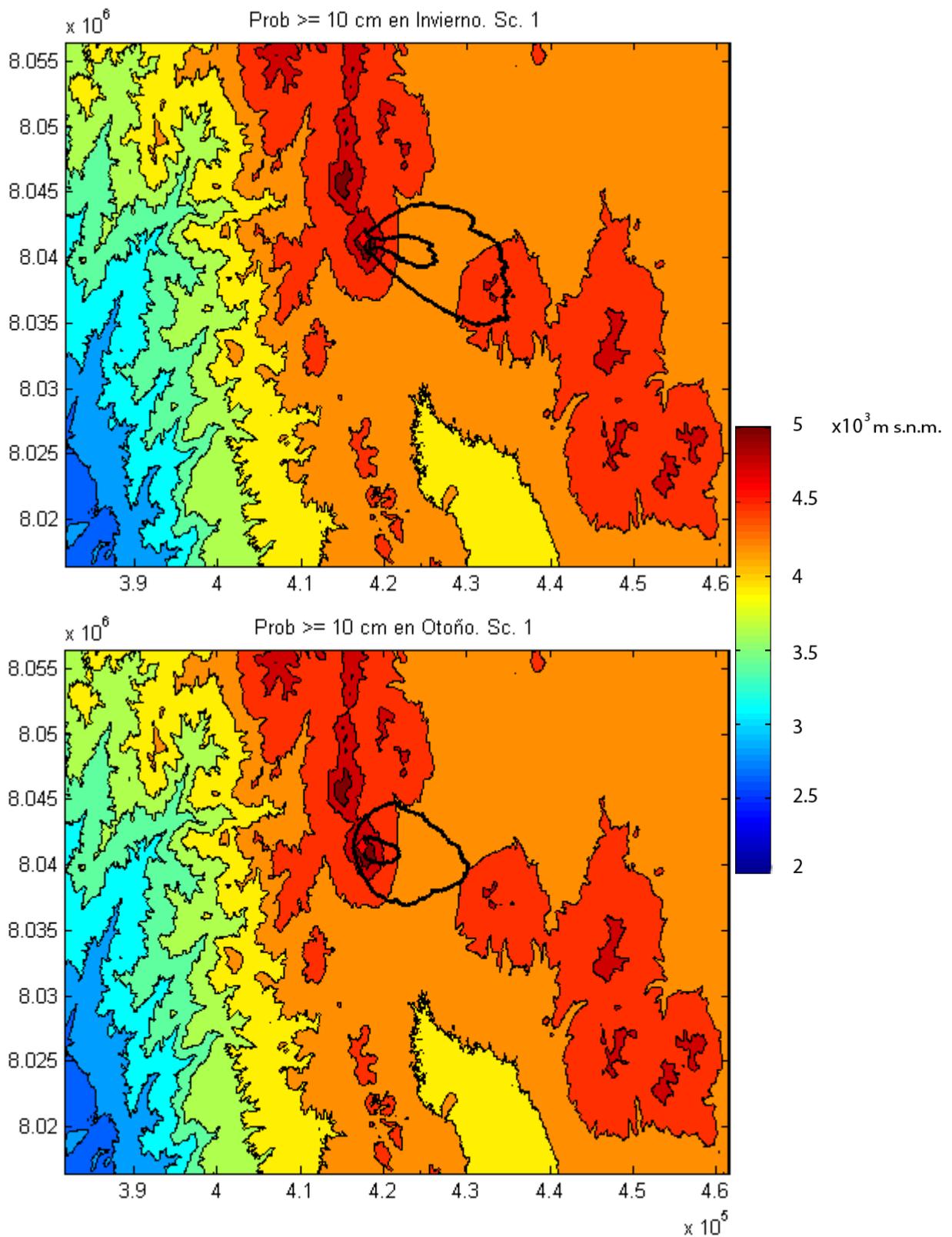


Ilustración 5. Delimitación de áreas con probabilidades de un 50 y 30% (de menor y mayor tamaño respectivamente) de obtener depósitos de caída de espesor igual o mayor a 10cm, si se produce una erupción en el escenario (Sc) 1 de IEV 2-3, en otoño (figura superior) y en invierno (figura inferior).

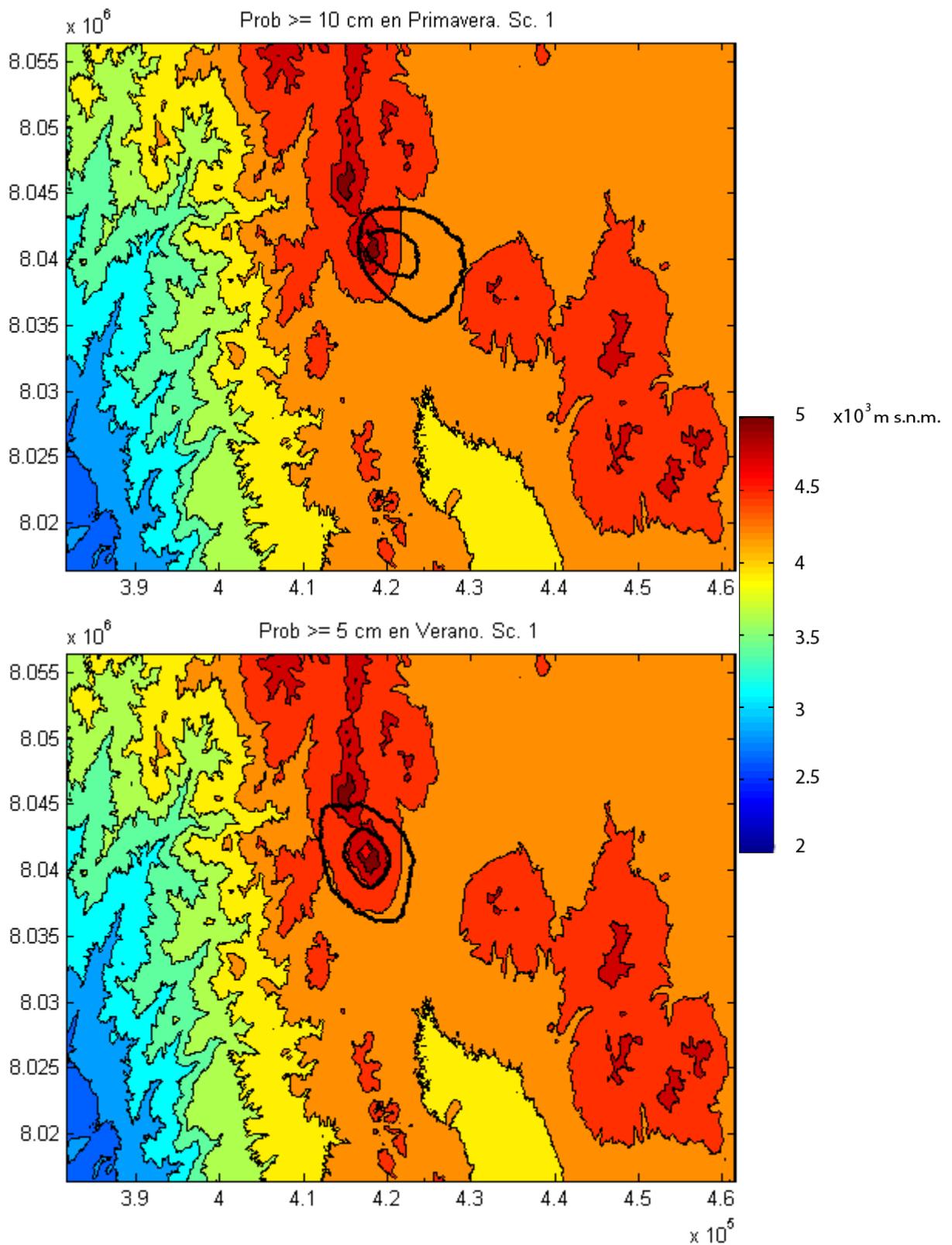


Ilustración 6. Delimitación de áreas con probabilidades de un 50 y 30% (de menor y mayor tamaño respectivamente) de obtener depósitos de caída de espesor igual o mayor a 10 cm, si se produce una erupción en el escenario 1 de IEV 2-3, en primavera (figura superior) y en verano (figura inferior).

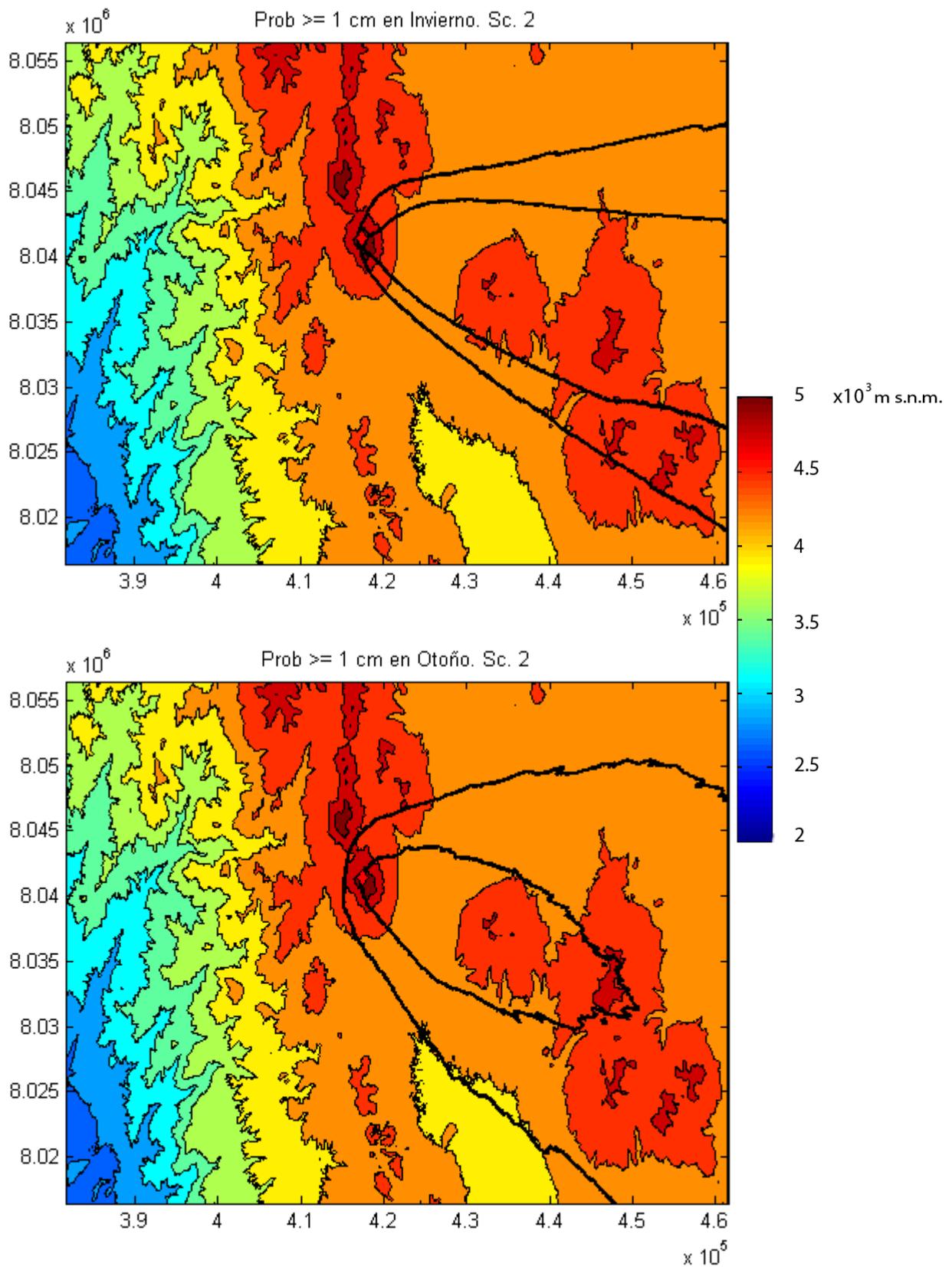


Ilustración 7. Delimitación de áreas con probabilidades de un 50 y 30% (de menor y mayor tamaño respectivamente) de obtener depósitos de caída de espesor igual o mayor a 1cm, si se produce una erupción en el escenario (Sc) 2 de IEV 3-4, en otoño (figura superior) y en invierno (figura inferior).

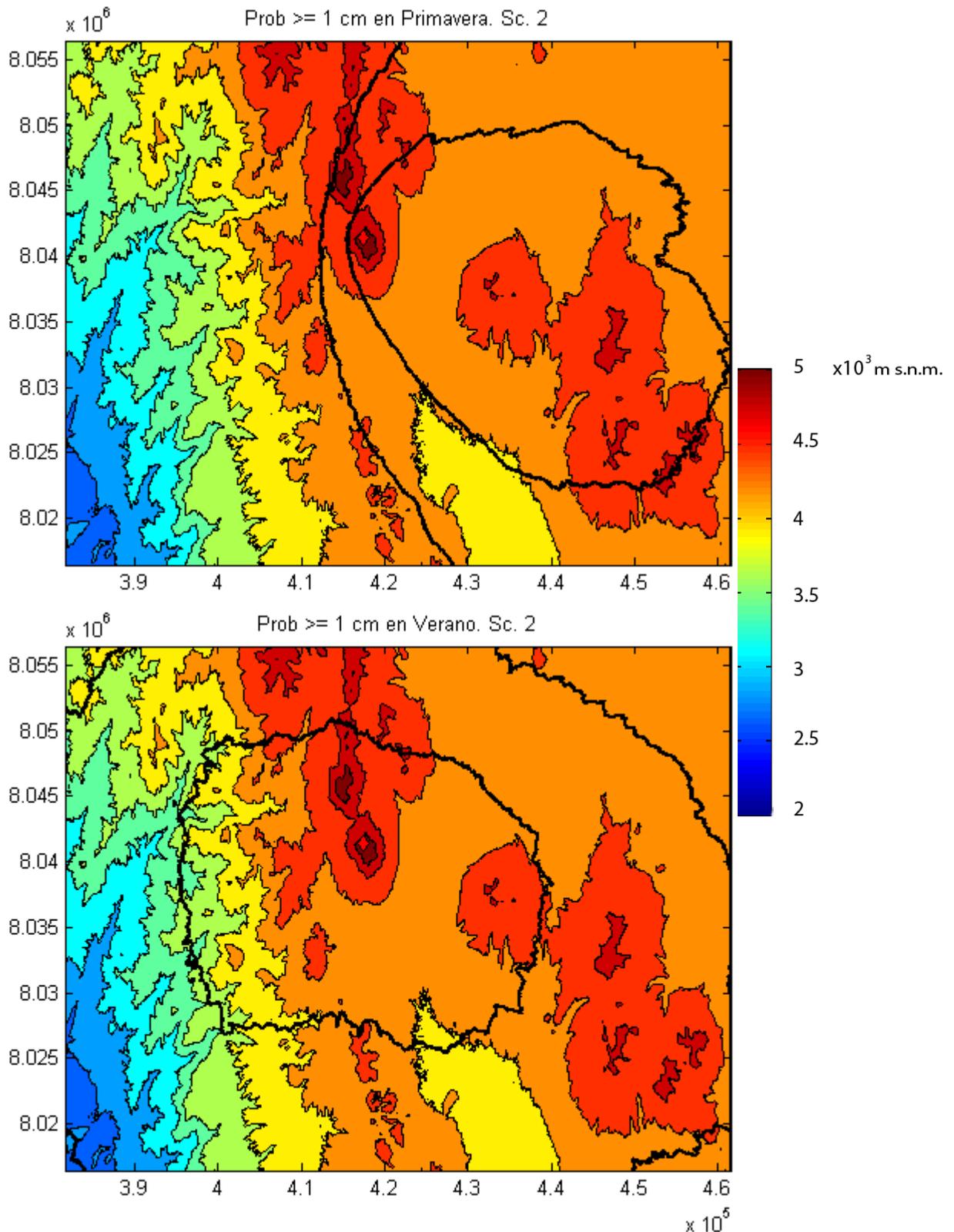


Ilustración 8. Delimitación de áreas con probabilidades de un 50 y 30% (de menor y mayor tamaño respectivamente) de obtener depósitos de caída de espesor igual o mayor a 1 cm, si se produce una erupción en el escenario (Sc) 2 de IEV 3-4, en primavera (figura superior) y en verano (figura inferior).

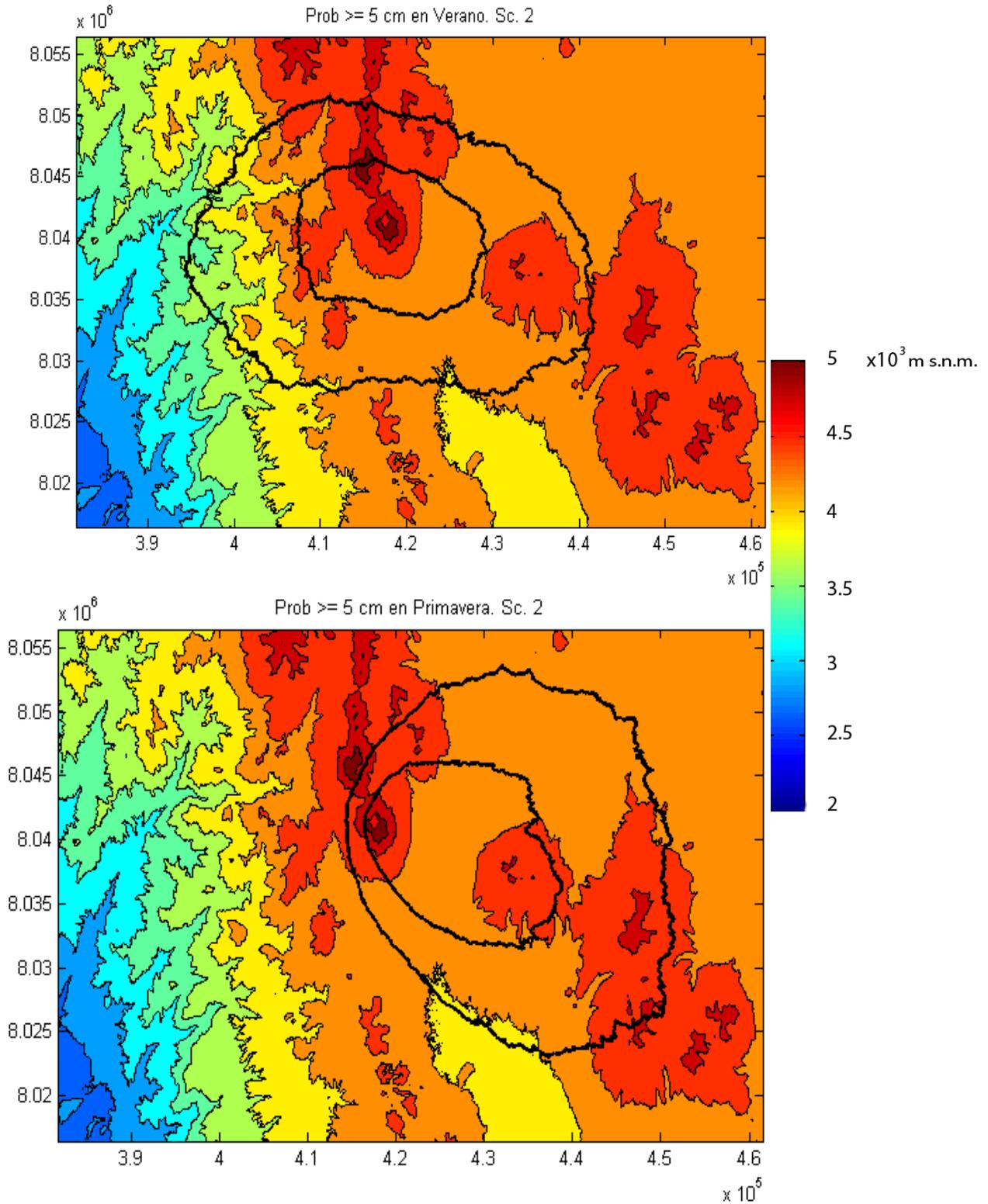


Ilustración 9. Delimitación de áreas con probabilidades de un 50 y 30% (de menor y mayor tamaño respectivamente) de obtener depósitos de caída de espesor igual o mayor a 5 cm, si se produce una erupción en el escenario (Sc) 2 de IEV 3-4, en otoño (figura superior) y en invierno (figura inferior).

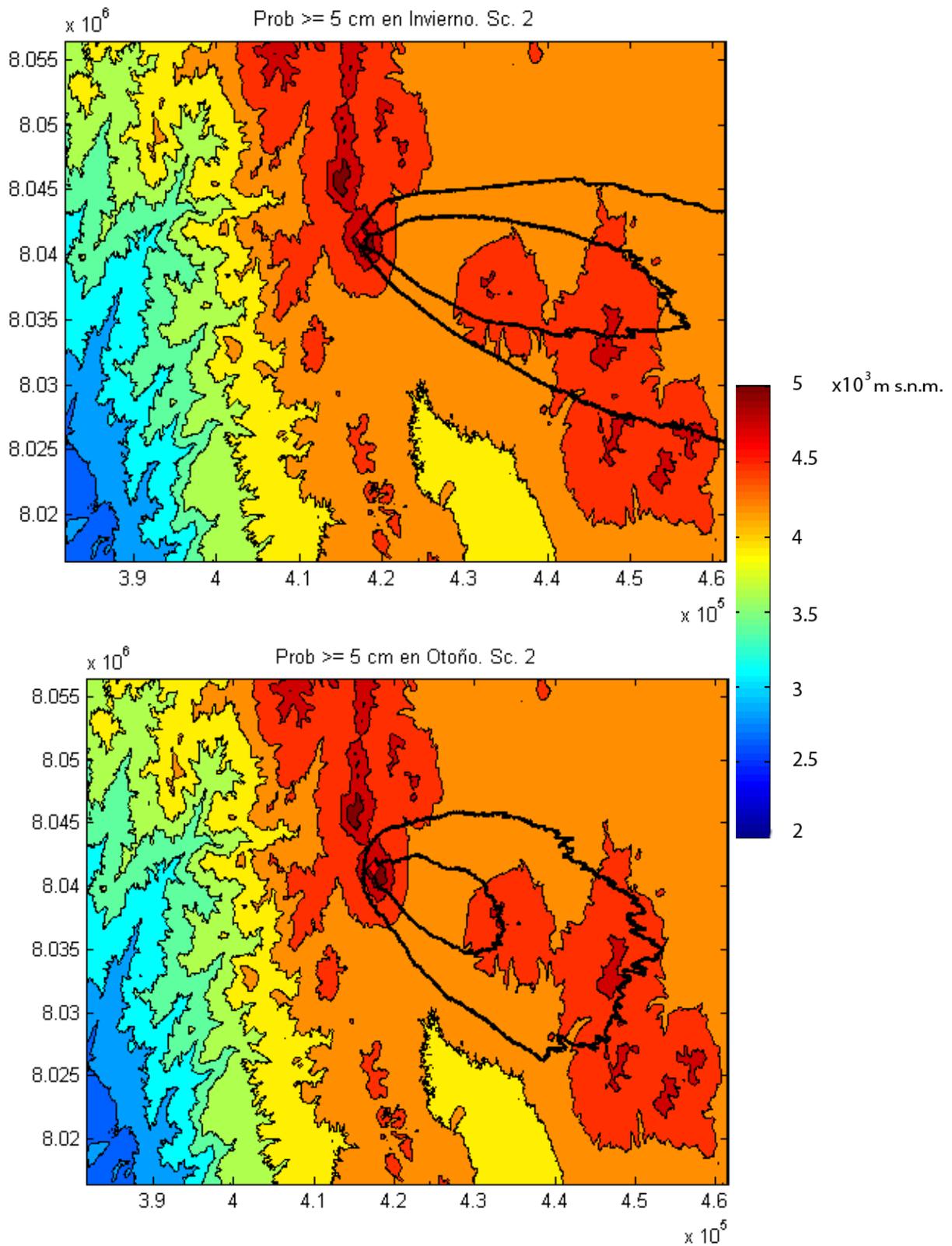
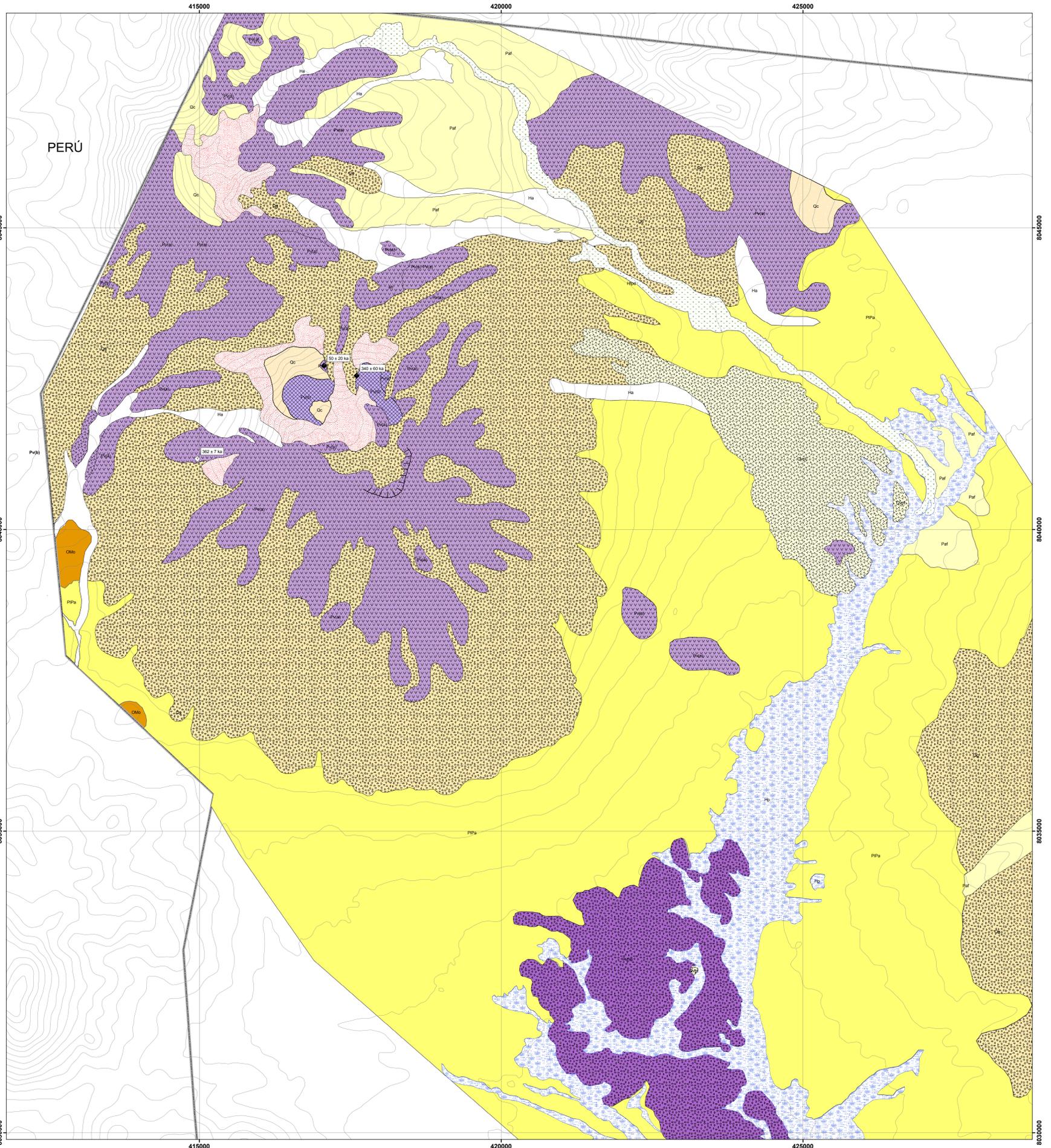


Ilustración 10. Delimitación de áreas con probabilidades de un 50 y 30% (de menor y mayor tamaño respectivamente) de obtener depósitos de caída de espesor igual o mayor a 5 cm, si se produce una erupción en el escenario (Sc) 2 de IEV 3-4, en primavera (figura superior) y en verano (figura inferior).



LEYENDA

ROCAS ESTRATIFICADAS

- Ha Depósitos aluviales (Holoceno)
Ripios gravas y arenas
- Hp Depósitos palustres (Holoceno)
Limos con materia orgánica
- Hfpd Depósitos de flujo de pasto y detritos (Holoceno)
Bloques, gravas, limos con materia orgánica, generados por terremoto MS 4 de Arequipa del año 2001
- Cc Depósitos coluviales (Cuaternario)
Depósitos de bloque grava y arena
- Oq Depósitos glaciares, morenas (Cuaternario)
Depósitos de flujo de pasto y detritos (Holoceno)
- Paf Depósitos aluviales y fluviales (Pleistoceno)
Ripios gravas, arenas y limos
- PIPa Formación Visiviri (Plioceno-Pleistoceno)
Gravas, areniscas y limolitas, fluviales y lacustres

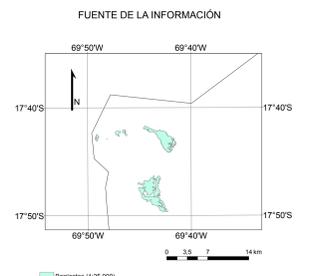
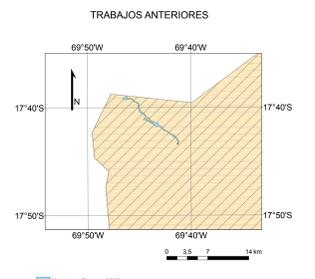
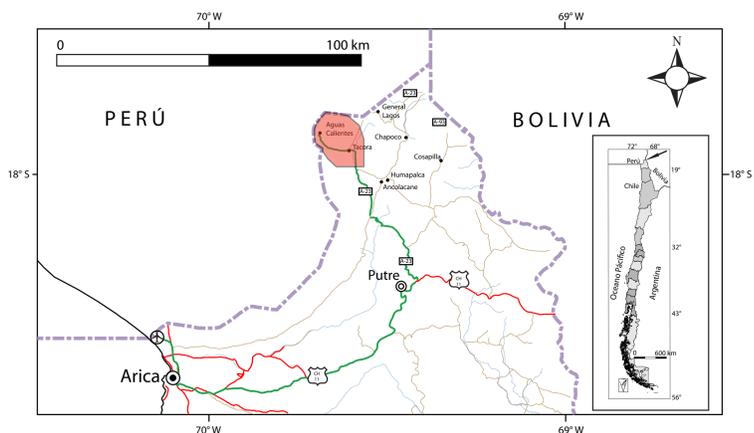
ROCAS VOLCÁNICAS

- Ovpf Depósitos de flujo piroclástico (Cuaternario)
Tobas cristalinas, liticas y vítreas de lapilli; de composición andesítica
- Pv (a) Lavas andesíticas a dacíticas (Pleistoceno)
(b) Depósitos de Flujos Piroclásticos (Pleistoceno)
(c) Depósitos de avalancha volcánica, con morfología tipo Hummock (Pleistoceno)
(d) Domo andesítico a dacítico (Pleistoceno)

- Om Formación Oxaya (Oligoceno Superior-Mioceno Inferior),
Sucesión volcánica continental

SIMBOLOGÍA

- Curvas de nivel cada 50 m
- Alteración hidrotermal
- Dataciones
- Método
- ◆ Ar-Ar en Biotita
- ◇ Ar-Ar en Masa Fundamental
- Escarpes indicando área deprimida



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- García, M., Clavero, J. & Gardeweg, M., 2012. Cartas Visiviri y Villa Industrial, Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Narajo, J., Clavero, J., 2005. A rare case of grass flow induced by the M8.4 Arequipa earthquake, June 2001, in the Atiplano of Northern Chile, Quaternary Research 64 242 – 248.
- Henríquez, H., 1963. Reconocimiento geológico en el extremo Norte del Departamento de Arica. Memoria de Titulo, Dpto. de Geología, U. de Chile, 56 p.
- Salas, R., Kast, R., Montecinos, F., Salas, I., 1966. Geología y recursos minerales del Departamento de Arica, Provincia de Tarapacá, Bol. 21, 130 pp., Inst. de Invest. Geol., Santiago, Chile.

REFERENCIA GEODÉSICA

Datum WGS 1984 UTM 19S

NORMAS UTILIZADAS

Cohen, K. M., Finney, S., Gibbard, P. L., 2012. International Chronostratigraphic Chart. International Comilition on Stratigraphy.

BASE TOPOGRÁFICA

Cartas escala 1:50.000, Aguas Calientes, Villa Industrial, del Instituto Geográfico Militar (Chile).