



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

ANÁLISIS MORFOLÓGICO Y PARÁMETROS ERUPTIVOS DE LAVAS HOLOCENAS DEL VOLCÁN PARINACOTA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

SALVADOR NOLASCO CORTEZ CABEZAS

Profesor guía:
Angelo Castruccio Álvarez

Miembros de la comisión:
Francisco Delgado de la Puente
Benigno Godoy Neira

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por:
The role of volcano edifice dimensions on patterns of volcanic activity of arc-volcanoes 1211869

SANTIAGO DE CHILE
2023

Resumen de la memoria para optar
al título de: Geólogo
Por: Salvador Nolasco Cortez Cabezas
Fecha: 2023
Prof. guía: Ángel Castruccio Álvarez

ANÁLISIS MORFOLÓGICO Y PARÁMETROS ERUPTIVOS DE LAVAS HOLOCENAS DEL VOLCÁN PARINACOTA

En este trabajo se realizaron análisis morfológicos y se determinaron los parámetros eruptivos de dos flujos de lava del volcán Parinacota, que fueron emitidos a través de centros eruptivos menores adventicios en el flanco sur del volcán. Específicamente la colada de lava Ajata inferior (a3), que se dividió en un flujo principal y un lóbulo secundario, y Ajata superior (a4), dividida en un sector sur y otro norte. Estas son lavas del tipo aa- de bloque, con composiciones traquiandesita-basáltica y traquiandesita, respectivamente. Estas, alcanzan distancias de 1,6 y 3,9 km de largo, sus potencias fluctúan entre 8 y 24 m para la colada a3 y 7,5 y 40,5 m para la colada a4 y tienen un volumen de $1,6 \cdot 10^7$ y $3,6 \cdot 10^7 m^3$.

Para el análisis morfológico se tomaron imágenes aéreas con un dron para crear un modelo de elevación digital (DEM). Luego, se realizaron distintos perfiles a lo largo del flujo y se describieron sus morfologías, dimensiones y petrografía. Para determinar los parámetros eruptivos de estas coladas y caracterizar su evolución en el tiempo, se utilizaron distintos modelos. Dependiendo del régimen dinámico que controla el avance de las coladas; la reología interna (newtoniano, Bingham o Herschel-Bulkley) o el Yield Strength en la Corteza (YSC). Con los datos medidos y calculados y con ayuda de la literatura, se seleccionó el modelo más representativo.

Tras la aplicación de estos modelos se determinó que el régimen de flujo de la colada a3 se encuentra dominada por el YSC. Su tasa eruptiva promedio se estima que es de $24,6 m^3/s$ para el flujo principal y de $5,28 m^3/s$ para el lóbulo con una duración de 6,9 y 4,5 días respectivamente. Por otro lado, la colada a4 también se encuentra dominada por el YSC. Su tasa eruptiva promedio es de $43,9 m^3/s$ para el sector norte y de $54,8 m^3/s$ para el sector sur. Su duración fue de 45,1 días y 9,03 días, respectivamente. Esta elección concuerda con las morfologías presentes en el flujo, pues los altos espesores y la presencia de ojivas sugieren de que la lava sufrió enfriamiento formando una corteza externa que dificultó el avance a pesar de que se seguía extruyendo lava.

*Que todo fluya
y que nada influya.*

Agradecimientos

Quería agradecer en primera instancia a los profesores Francisco Delgado y Patricia Larrea por aceptar ser parte de la comisión y principalmente al profesor Angelo Castruccio, mi profesor guía, por la oportunidad y confianza que me brindó de realizar mi trabajo de título con él, por la buena disposición que tuvo desde el primer momento hasta ahora en ayudarme a elaborar y mejorar la investigación y por la motivación y todos sus conocimientos que me brindó. También quiero agradecerle al proyecto "The role of volcano edifice dimensions on patterns of volcanic activity of arc-volcanoes 1211869" por haber financiado los terrenos y todo lo que conlleva.

Darle las gracias a las personas que me acompañaron a las salidas a terreno, Luis Flores y Alejandro Rebolledo ayudantes y memoristas del profesor Angelo Castruccio, Miyali Riquelme memorista, Jorge Clavero geólogo vulcanólogo que ha trabajado en la zona de estudio y Jorge Lemp (alias El Flaco) que fue el chofer designado y además ayudó en distintas actividades de terreno. También agradecer a Elizabeth Flores (mi madrina) quién ayudó en temas de la redacción del informe.

Darle las gracias a todas las personas que han estado presentes a lo largo de toda mi carrera universitaria, desde Bachillerato hasta ahora. Partiendo por mis amigos de Bachillerato, por todas esas noches de estudios para poder obtener un cupo a la facultad de ciencias físicas y matemáticas y también por las distracciones y celebraciones que esto conllevo. Agradecer a los profesores, ayudantes y compañeros/as de carrera que nos entregaron y compartieron sus conocimientos, que nos apoyamos entre nosotros para que este camino haya sido más fácil.

Imposible no agradecer a las personas que han estado a lo largo de mi vida, amigos del colegio y a amigos de la vida por todo el apoyo que me han dado en mi etapa estudiantil y las buenas energías que me han brindado. Agradecer a la gente de Maitencillo que conocí en este último tiempo, pueblo al cual me fui a vivir en este proceso de trabajo de título, en donde mis jefes y compañeros/as me apoyaron y dieron facilidades para poder realizar el informe y a la vez trabajar.

Agradecer a la gran y hermosa familia que me tocó, mi padre, hermana, abuelo/a, tíos/as y primos/as, porque siempre han tenido muy buenas esperanzas en mí y me han aconsejado, enseñado, apoyado y distraído a lo largo de mi vida. Pero principalmente quiero agradecerle a mi madre, Jessica Maribel Cabezas Contreras, que toda la vida ha estado ahí para guiarme, aconsejarme, apoyarme y brindarme lo mejor con todo su esfuerzo, quien me ha criado y a luchado por mí dejando todo de lado, la persona que gracias a ella soy lo que soy, la que si yo quería practicar un deporte cuando niño, ella me acompañaba, si quería aprender algún instrumento, ella buscaba alguien que me enseñara, la que siempre busco los mejores colegios

para darme una buena educación, la que me acompañó a marchar para tener una educación gratuita de la cual obtuvimos el beneficio, a ella darle las mayores gracias y todo esto, en su mayoría, es gracias a ella.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Ubicación y Acceso	2
1.3. Hipótesis	4
1.4. Objetivos	5
1.4.1. Generales	5
1.4.2. Específicos	5
2. Marco Geotectónico y Geológico	6
2.1. Estratigrafía	6
2.1.1. Formación Lupica (Oligoceno superior-Mioceno inferior)	6
2.1.2. Formación Lauca (Mioceno superior?-Plioceno)	6
2.1.3. Ignimbrita Lauca Pil (Plioceno superior)	7
2.1.4. Depósitos lacustres y fluvio-glaciales (Pleistoceno)	7
2.2. Geología volcán Parinacota	7
2.2.1. Unidad Parinacota 1 Plpa1 (Pleistoceno Medio?-superior, ca. 300-40? ka)	8
2.2.1.1. Subunidad inferior Plpa1(a) (260-110 ka)	8
2.2.1.2. Subunidad superior Plpa1(b), Plpa1(c), Plpa1(d) (ca. 55-40 ka)	8
2.2.2. Unidad Parinacota 2 Plpa2R, Hpa2A (Pleistoceno superior-Holoceno, 40?-8 ka)	9
2.2.3. Depósito de Avalancha Volcánica Parinacota Hpa2A (Holoceno, ca. 7-8 ka)	9
2.2.4. Unidad Parinacota 3 Hpa3 (Holoceno, <8 ka)	10
2.2.4.1. Edificio Principal Hpa3(a), Hpa3(b), Hpa3(c), Hpa3(d) (Ho- loceno)	10
2.2.4.2. Volcanes de Ajata Hpa3(e) (Holoceno)	11
3. Marco Teórico	16
3.1. Teoría de lavas	16
3.1.1. Trabajos anteriores	16
3.2. Modelación de las coladas de lava	17
3.2.1. Reología de las coladas de lava	17
3.2.1.1. Caso newtoniano	18
3.2.1.2. Caso Bingham	18
3.2.1.3. Caso Herschel-Bulkley	18

3.2.2.	Parámetros reológicos	19
3.2.2.1.	Viscosidad	20
3.2.2.2.	Yield strength	20
3.2.2.3.	Densidad	20
3.2.3.	Dinámica de los flujos de lava	21
3.2.3.1.	Caso newtoniano	22
3.2.3.2.	Caso Bingham	22
3.2.3.3.	Caso Herschel-Bulkley	23
3.2.3.4.	Caso del yield strength del interior de la lava	23
3.2.3.5.	Caso del yield strength en una corteza en crecimiento	23
3.3.	Características físicas de las coladas de lava.	25
3.3.1.	Criterios descriptivos	25
3.3.1.1.	Tipos de lavas	25
3.3.1.2.	Zonas de un flujo	25
3.3.1.3.	Levéés	27
3.3.1.4.	Comportamiento de los flujos	28
3.4.	Volcán Paríacota	29
3.4.1.	Trabajos anteriores	29
3.4.1.1.	Composición	29
3.4.1.2.	Análisis petrográfico	30
4.	Metodología	31
4.1.	Etapas de pre-terreno	31
4.2.	Etapas de terreno	32
4.2.1.	Vuelo del dron	32
4.2.2.	Toma de muestras	33
4.3.	Etapas de post-terreno	34
4.3.1.	Construcción de DEM	34
5.	Resultados	35
5.1.	Descripción morfológica de las coladas de lava	35
5.1.1.	Ajata inferior (a3)	36
5.1.2.	Ajata superior (a4)	41
5.2.	Análisis petrográfico	45
5.2.1.	Descripción a muestra de mano	47
5.3.	Dimensiones de los flujos	49
5.3.1.	Ancho y largo del flujo	51
5.3.2.	Espesor del flujo	52
5.3.3.	Volumen del flujo	54
5.4.	Estimación de reología	56
5.4.1.	Temperatura	56
5.4.2.	Viscosidad	57
5.4.3.	Densidad	63
5.5.	Estimación de parámetros eruptivos	63
5.5.1.	Ajata inferior	64
5.5.1.1.	Caso newtoniano	64
5.5.1.2.	Caso Bingham	67

5.5.1.3.	Caso Herschel-Bulkley	71
5.5.1.4.	Caso yield strength en la corteza	75
5.5.2.	Ajata superior	78
5.5.2.1.	Caso newtoniano	78
5.5.2.2.	Caso Bingham	81
5.5.2.3.	Caso Herschel-Bulkley	86
5.5.2.4.	Caso yield strength en la corteza	90
6.	Discusión	93
6.1.	Fuentes de error	93
6.1.1.	Topografía previa	93
6.1.2.	Relleno posterior	93
6.1.3.	Resolución del DEM	94
6.2.	Modelos utilizados	96
6.3.	Comparación de modelos	98
6.3.1.	Contenido de cristales	98
6.3.2.	Valores de consistencia y yield strength	99
6.3.3.	Valores de tasa eruptiva y velocidad	101
6.3.3.1.	Ajuste exponencial	103
6.4.	Dimensiones y morfologías de las coladas de lava	105
6.5.	Análisis de variaciones de las extensiones de las coladas de lava.	106
6.5.1.	Erupciones de otros volcanes	108
6.5.2.	Otros flujos de lava del volcán Parinacota	110
7.	Conclusiones	113
8.	BIBLIOGRAFÍA	116
Anexos		122
A.	Datos generales de las muestras	122
B.	Dimensiones de las coladas de lava	122
B.1.	Ajata inferior (a3)	123
B.2.	Ajata superior (a4)	124
C.	Fotos de las muestras	125
D.	Anchos de los levées	133
D.1.	Ajata inferior (a3)	133
D.1.1.	Flujo principal	133
D.1.2.	Lóbulo	135
D.2.	Ajata superior (a4)	136
D.2.1.	Flujo norte	136
D.2.2.	Flujo sur	138
E.	Volumen de las coladas	139
E.1.	Ajata inferior (a3)	139
E.1.1.	Flujo principal	139
E.1.2.	Lóbulo	140
E.2.	Ajata superior (a4)	140
E.2.1.	Flujo norte	140
E.2.2.	Flujo sur	141

F.	Valores de coeficientes para la determinación de la densidad	141
F.1.	Ajata inferior	141
F.2.	Ajata superior	142
G.	Tasa eruptiva en el tiempo	142
G.1.	Ajata inferior	142
G.2.	Ajata superior	143

Índice de Tablas

3.1.	Composición química de cada colada de acuerdo a Hora et al. (2007) y a Ginibre y Wörner (2007).	29
5.1.	Distancia desde la ubicación de las muestras hasta la fisura.	46
5.2.	Distancia desde la ubicación de las muestras hasta la fisura.	47
5.3.	Volumen de lava emitido por las coladas.	56
5.4.	Temperatura para cada colada.	56
5.5.	Viscosidad del fundido para cada colada.	57
5.6.	Relación de masa fundamental y fenocristales (> 1 mm) para cada muestra. .	58
5.7.	Densidad de las coladas de lava.	63
6.1.	Propiedades físicas y dimensiones de las lavas con sus rangos de valor esperados para distintas composiciones. Modificado de Pinkerton y Wilson, 1994.	97

Índice de Ilustraciones

1.1.	Mapa del volcán Parinacota. El polígono de color naranja corresponde a la colada Ajata superior y el de color morado al Ajata inferior.	3
1.2.	Mapa de rutas para llegar al volcán Parinacota.	4
2.1.	Línea de tiempo de eventos en el volcán Parinacota durante los últimos 163 k.y., también representada en la serie de fotos panorámicas del mismo, tomadas desde el sur. Las partes negras de la línea de tiempo indican que no hay erupciones. Los cuadrados de colores representan cada uno 1 km ³ de magma en erupción, recuperado en el trabajo de Hora et al. (2007).	13
2.2.	Mapa geológico del volcán Parinacota y sus alrededores, recuperado en el trabajo de Clavero et al. (2004).	14
2.3.	Mapa geológico del volcán Parinacota, recuperado en el trabajo de Hora et al. (2007).	15
3.1.	Curva esquemática de la reología de los fluidos. Modificado de Balmforth et al. (2000b)	19
3.2.	Esquema de los distintos regímenes dinámicos que pueden enfrentar los flujos de lavas en función de las fuerzas impulsoras. (a) Caso newtoniano, (b) Caso <i>yield strength</i> en la Corteza, (c) Caso <i>yield strength</i> del interior de la lava. En cada caso, se muestran también sus respectivas fuerzas de retardo (Castruccio, 2013).	24
3.3.	Zonas de una colada a lo largo (Lipman y Banks, 1987).	26
3.4.	Zonas de una colada lateralmente (Borgia et al.,1983).	27
3.5.	Tipos de levées. (a) Levée inicial, (b) Levée de acreción, (c) Levée tipo rubble, (d) Levée de desbordamiento (Sparks et al., 1976).	28
3.6.	Diagrama TAS. El círculo de color rojo corresponde a una muestra del flujo a3 y el círculo de color azul se trata del flujo a4 según Hora et al. (2007), mientras que el círculo de color verde corresponde a una muestra de flujo a3 y el de color amarillo corresponde a la colada a4 de acuerdo a Ginibre y Wörner (2007).	30
4.1.	Instalación del dron.	33
4.2.	Instalación del RTK.	33
5.1.	Se observan los flujos de Ajata inferior (a3) y Ajata superior (a4) en naranja.	35
5.2.	El polígono naranja corresponde al flujo Ajata inferior (a3). Se observa en el frente y el lado E del flujo que lo subyace la colada Ajata a2 que corresponde al polígono de color amarillo.	36
5.3.	Flujo Ajata inferior a3 sobre a2. Lo encerrado en color rojo corresponde al flujo a3, que se encuentra sobre el flujo a2. Lo encerrado en color azul es un martillo que se utilizó de escala de 80 cm aproximadamente.	37
5.4.	Foto tomada del frente del lóbulo del flujo Ajata inferior a3. Lo encerrado en color rojo corresponde a una persona de escala de 1.70 m.	37

5.5.	Levée norte del lóbulo del flujo Ajata inferior. Lo encerrado en rojo corresponde a un martillo de 80 cm aproximadamente.	38
5.6.	Bloque de 5 m aproximadamente. Lo encerrado en color rojo corresponde a una libreta de 30 cm aproximadamente que se utilizó de escala.	39
5.7.	Mapa de morfologías del Ajata inferior. Lo encerrado en rojo corresponde a la fuente de donde se extruyó la lava, las líneas de color naranja a ojivas, los polígonos de color morado a levées y los azules son lóbulos frontales.	40
5.8.	Mapa de las zonas del Ajata inferior. Los polígonos verdes corresponden al flow toe, los morados a la zona de dispersión, los cafés claros a la zona transicional y el celeste es la zona de canal estable.	41
5.9.	Mapa de los sectores de la colada Ajata superior. El polígono de color morado corresponde al flujo del sector sur de la colada que esta subyacente al polígono rojo que corresponde al flujo del sector norte	42
5.10.	Bloque de lava Ajata superior. Se observa la superficie rugosa de 2cm aproximadamente y un núcleo masivo. Se utiliza una libreta de 30 cm aproximadamente de escala.	43
5.11.	Mapa de morfologías del Ajata superior. Las líneas de color naranja corresponden a ojivas, lo encerrado en celeste a levées y lo azul son lóbulos frontales.	44
5.12.	Mapa de las zonas del Ajata superior. Los polígonos verdes corresponden al flow toe, el morado a la zona de dispersión, el café claro a la zona transicional y el celeste es la zona de canal estable.	45
5.13.	Muestra los sectores donde se tomaron las muestras en las lavas Ajata inferior (a3), domo y Ajata inferior (a2).	46
5.14.	Muestra los sectores donde se tomaron las muestras en la lava Ajata superior (a4) y una muestra de un flujo subyacente al a4.	47
5.15.	Foto de la muestra T1.M2 de la colada Ajata inferior.	48
5.16.	Foto de la muestra T2.M3 de la colada Ajata superior.	49
5.17.	Mapa de perfiles del flujo Ajata inferior. Las líneas azules corresponden a perfiles que se realizaron al flujo a3. Se trazaron de manera perpendicular a la dirección del flujo.	50
5.18.	Mapa de perfiles del flujo Ajata superior. Las líneas azules corresponden a perfiles que se realizaron al flujo a4. Se trazaron de manera perpendicular a la dirección del flujo.	51
5.19.	Gráfico del logaritmo del ancho vs. la distancia de las coladas. La línea azul corresponde al flujo Ajata superior, específicamente a la zona norte del flujo, la línea naranja corresponde a la zona sur del flujo Ajata superior, mientras que la línea gris corresponde al flujo principal del Ajata inferior y la línea amarillo representa al lóbulo del Ajata inferior.	52
5.20.	Ejemplo del perfil 18 del flujo a3. Los puntos negros corresponden a la base y los puntos morados representan la parte más alta de los bordes del flujo. La línea verde es una prolongación de la superficie.	53
5.21.	Ejemplo del perfil 8 del flujo a3. Los puntos negros corresponden a la base de donde comienza el levée y los puntos morados representan la parte más alta del levée. La línea verde es una prolongación de la superficie.	53

5.22.	Gráfico de espesor vs. largo de las coladas. La línea azul corresponde al flujo Ajata superior, específicamente a la zona norte del flujo, la línea naranja corresponde a la zona sur del flujo Ajata superior, mientras que la línea gris corresponde al flujo principal del Ajata inferior y la línea amarillo representa al lóbulo del Ajata inferior.	54
5.23.	Mapa del flujo Ajata inferior segmentado por los perfiles realizados.	55
5.24.	Mapa del flujo Ajata superior segmentado por los perfiles realizados.	55
5.25.	Gráfico que representa el contenido de cristales vs. la distancia de la colada en el primer caso. La línea azul corresponde al flujo Ajata superior, específicamente a la zona norte del flujo, la línea naranja corresponde a la zona sur del flujo Ajata superior, mientras que la línea verde corresponde al flujo principal del Ajata inferior y la línea amarillo representa al lóbulo del Ajata inferior.	59
5.26.	Gráfico de la viscosidad vs. la distancia de la colada Ajata inferior y superior para el caso 2. La línea de color amarillo corresponde al lóbulo de la colada a3, la de color verde es el flujo principal de la colada a3, la azul representa el sector norte de la colada a4 y la de color naranja el sector sur de la colada a4.	59
5.27.	Gráfico que representa el contenido de cristales vs. la distancia de la colada en el segundo caso. La línea azul corresponde al flujo Ajata superior, específicamente a la zona norte del flujo, la línea de color naranja corresponde a la zona sur del flujo Ajata superior, mientras que la línea verde corresponde al flujo principal del Ajata inferior y la línea amarillo representa al lóbulo del Ajata inferior.	60
5.28.	Gráfico de la viscosidad vs. la distancia de la colada Ajata inferior y superior para el caso 2. La línea de color amarillo corresponde al lóbulo de la colada a3, la de color verde es el flujo principal de la colada a3, la azul representa el sector norte de la colada a4 y la de color naranja el sector sur de la colada a4.	61
5.29.	Gráfico que representa el contenido de cristales vs. la distancia de la colada en el tercer caso. La línea de color amarillo corresponde al lóbulo de la colada a3, la de color verde es el flujo principal de la colada a3, la azul representa el sector norte de la colada a4 y la de color naranja el sector sur de la colada a4.	62
5.30.	Gráfico de la viscosidad vs. la distancia de la colada Ajata inferior y superior para el caso 3. La línea de color amarillo corresponde al lóbulo de la colada a3, la de color verde es el flujo principal de la colada a3, la azul representa el sector norte de la colada a4 y la de color naranja, el sector sur de la colada a4.	62
5.31.	Gráfico de la velocidad vs. largo de la colada Ajata inferior, para el primer caso de viscosidad. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.	64
5.32.	Gráfico de la tasa eruptiva vs. largo de la colada Ajata inferior, para el primer caso de viscosidad. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.	65
5.33.	Gráfico de la velocidad vs. largo de la colada Ajata inferior, para el segundo caso de viscosidad. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.	66
5.34.	Gráfico de la tasa eruptiva vs. largo de la colada Ajata inferior, para el segundo caso de viscosidad. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.	66

5.35.	Gráfico de la velocidad vs. largo de la colada Ajata inferior, para el tercer caso de viscosidad. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.	67
5.36.	Gráfico de la tasa eruptiva vs. largo de la colada Ajata inferior, para el tercer caso de viscosidad. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.	67
5.37.	Gráfico del <i>yield strength</i> vs. la distancia de la colada para el Ajata inferior. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.	68
5.38.	Gráfico de la velocidad vs.. largo de la colada Ajata inferior, para el primer caso de viscosidad. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.	69
5.39.	Gráfico de la tasa eruptiva vs.. largo de la colada Ajata inferior, para el primer caso de viscosidad. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.	69
5.40.	Gráfico de la velocidad vs. largo de la colada Ajata inferior, para el segundo caso de viscosidad. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.	70
5.41.	Gráfico de la tasa eruptiva vs. largo de la colada Ajata inferior, para el segundo caso de viscosidad. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.	70
5.42.	Gráfico de la velocidad vs. largo de la colada Ajata inferior, para el tercer caso de viscosidad. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.	71
5.43.	Gráfico de la tasa eruptiva vs. largo de la colada Ajata inferior, para el tercer caso de viscosidad. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.	71
5.44.	Gráfico de la velocidad vs. largo de la colada Ajata inferior, para el primer caso de viscosidad. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.	72
5.45.	Gráfico de la tasa eruptiva vs. largo de la colada Ajata inferior, para el primer caso de viscosidad. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.	73
5.46.	Gráfico de la velocidad vs. largo de la colada Ajata inferior, para el segundo caso de viscosidad. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.	73
5.47.	Gráfico de la tasa eruptiva vs. largo de la colada Ajata inferior, para el segundo caso de viscosidad. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.	74
5.48.	Gráfico de la velocidad vs. largo de la colada Ajata inferior, para el tercer caso de viscosidad. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.	74
5.49.	Gráfico de la tasa eruptiva vs. largo de la colada Ajata inferior, para el tercer caso de viscosidad. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.	75

5.50.	Gráfico de la velocidad vs. largo de la colada Ajata inferior. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.	76
5.51.	Gráfico de la tasa eruptiva vs. largo de la colada Ajata inferior. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.	76
5.52.	Gráfico de la velocidad promedio para los distintos modelos en el 1 ^{er} , 2 ^{do} y 3 ^{er} caso de viscosidad de la colada Ajata inferior.	77
5.53.	Gráfico de la tasa eruptiva promedio para los distintos modelos en el 1 ^{er} , 2 ^{do} y 3 ^{er} caso de viscosidad de la colada Ajata inferior.	77
5.54.	Gráfico de la velocidad vs. largo de la colada Ajata superior, para el primer caso de viscosidad. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.	78
5.55.	Gráfico de la tasa eruptiva vs. largo de la colada Ajata superior, para el primer caso de viscosidad. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.	79
5.56.	Gráfico de la velocidad vs. largo de la colada Ajata superior, para el segundo caso de viscosidad. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.	80
5.57.	Gráfico de la tasa eruptiva vs. largo de la colada Ajata superior, para el segundo caso de viscosidad. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.	80
5.58.	Gráfico de la velocidad vs. largo de la colada Ajata superior, para el tercer caso de viscosidad. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.	81
5.59.	Gráfico de la tasa eruptiva vs. largo de la colada Ajata superior, para el tercer caso de viscosidad. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.	81
5.60.	Gráfico del <i>yield strength</i> vs. el largo de la colada Ajata superior. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.	82
5.61.	Gráfico de la velocidad vs. largo de la colada Ajata superior, para el primer caso de viscosidad. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.	83
5.62.	Gráfico de la tasa eruptiva vs. largo de la colada Ajata superior, para el primer caso de viscosidad. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.	83
5.63.	Gráfico de la velocidad vs. largo de la colada Ajata superior, para el segundo caso de viscosidad. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.	84
5.64.	Gráfico de la tasa eruptiva vs. largo de la colada Ajata superior, para el segundo caso de viscosidad. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.	84
5.65.	Gráfico de la velocidad vs. largo de la colada Ajata superior, para el tercer caso de viscosidad. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.	85

5.66.	Gráfico de la tasa eruptiva vs. largo de la colada Ajata superior, para el tercer caso de viscosidad. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.	85
5.67.	Gráfico de la velocidad vs. largo de la colada Ajata superior, para el primer caso de viscosidad. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.	87
5.68.	Gráfico de la tasa eruptiva vs. largo de la colada Ajata superior, para el primer caso de viscosidad. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.	87
5.69.	Gráfico de la velocidad vs. largo de la colada Ajata superior, para el segundo caso de viscosidad. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.	88
5.70.	Gráfico de la tasa eruptiva vs. largo de la colada Ajata superior, para el segundo caso de viscosidad. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.	88
5.71.	Gráfico de la velocidad vs. largo de la colada Ajata superior, para el tercer caso de viscosidad. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.	89
5.72.	Gráfico de la tasa eruptiva vs. largo de la colada Ajata superior, para el tercer caso de viscosidad. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.	89
5.73.	Gráfico de la velocidad vs. largo de la colada Ajata superior. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.	90
5.74.	Gráfico de la tasa eruptiva vs. largo de la colada Ajata superior. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.	91
5.75.	Gráfico de la velocidad promedio para los distintos modelos en el 1 ^{er} , 2 ^{do} y 3 ^{er} caso de viscosidad de la colada Ajata superior.	91
5.76.	Gráfico de la tasa eruptiva promedio para los distintos modelos en el 1 ^{er} , 2 ^{do} y 3 ^{er} caso de viscosidad de la colada Ajata superior.	92
6.1.	Gráfico del espesor vs. la distancia. La curva azul corresponde al espesor real vs. la distancia. La curva naranja corresponde al espesor real vs la distancia pero se omiten los puntos en donde el espesor disminuye. La curva gris corresponde al espesor calculado vs. la distancia.	94
6.2.	Mapas de la colada Ajata superior con: a) DEM Copernicus, b) DEM TanDEM-X, c) DEM creado con las imágenes del dron.	95
6.3.	Muestra dos perfiles de la colada Ajata inferior, el perfil 8 (a, b y c) y 18 (d, e y f), en los distintos DEM, DEM Copernicus(a y d), DEM TanDEM-X (b y e) y DEM creado con las imágenes del dron (c y f).	96
6.4.	Consistencia para cada flujo de lava con sus respectivos errores.	100
6.5.	Gráfico de la tasa eruptiva vs. el tiempo para los datos obtenidos de la colada Ajata inferior junto al ajuste exponencial. Los puntos grises corresponden a las tasas eruptivas para el flujo principal de la colada a3 y la línea azul corresponde al ajuste exponencial para ese flujo. Los puntos amarillos son los valores de tasas eruptivas para el lóbulo de la colada a3 y la línea verde corresponde al ajuste exponencial para esa colada.	103

6.6.	Gráfico de la tasa eruptiva vs. el tiempo para los datos obtenidos de la colada Ajata superior junto al ajuste exponencial. Los puntos azules corresponden a los valores de la tasa eruptiva para la colada a4 y la línea naranja es su ajuste exponencial.	104
6.7.	Gráfico del largo de la lava vs. la tasa eruptiva promedio para erupciones de lava en varios volcanes, realizado por Walker (1973). El punto rojo corresponde a la colada Ajata inferior y el punto azul a la Ajata superior. Lavas basálticas: A, Askja 1961 (Iceland); C, Cerro Negra 1968; E, Etna (1, 1699; 2, 1911; 3, 1923; 4, 1928; 5, 1971); G, Gituro 1948 (Congo); K, Kilauea (1, 1955; 2, 1965); L, Laki 1783 (Iceland); Lp, La Palma 1585; M, Mauna Loa (1, 1851; 2, 1852; 3, 1868; 4, 1887; 5, 1907; 6, 1916; 7, 1919; 8, 1926; 9, 1935; 10, 1942; 11, 1949; 12, 1950); O, Oosima 1951; T, Tenerife 1705; S, Sakurajima 1946. Lavas andesita-basálticas: Ag, Mt Agung 1963 (Bali); H, Hekla (1, 1845/6; 2, 1947); N, Ngauruhoe (1, 1949; 2, 1954); Pc, Pacaya 1961 (Guatemala); Pr, Paricutin (primeros 8 meses 1945); Sn, Santiaguita (Guatemala). Lavas andesita/dacitas: Hb, Hibok-Hibok 1948; Tr, Trident 1953.	107
6.8.	Gráfico del volumen emitido vs. largo de las coladas para distintas erupciones en comparación con las del Ajata inferior y superior.	109
6.9.	Mapa del volcán Parinacota que muestra los otros flujos de lava con los que se compararon las coladas a3 y a4.	110
6.10.	Gráfico del volumen emitido vs. la edad para otros flujos de lava del volcán Parinacota en comparación con las coladas a3 y a4.	111
6.11.	Gráfico del largo de la colada vs. la edad para otros flujos de lava del volcán Parinacota en comparación con las coladas a3 y a4.	111
A.1.	Datos generales de las muestras de las coladas Ajata inferior y Ajata superior.	122
B.1.	Dimensiones del flujo principal de la colada a3.	123
B.2.	Dimensiones del lóbulo de la colada a3.	123
B.3.	Dimensiones del sector norte de la colada a4.	124
B.4.	Dimensiones del sector sur de la colada a4.	124
D.1.	Se observa una tabla que muestra los datos de los anchos de los levées medidos de cada perfil. En aquellos casos en que no había levées o no se logró definir bien sus límites, los datos están en blanco.	133
D.2.	Gráfico que muestra el ancho del levée vs. la distancia de la colada junto con su ecuación lineal para la colada a3 P.	134
D.3.	Se observa una tabla que muestra los datos de los anchos de los levées medidos y estimados para cada perfil. Los datos estimados se determinaron con la ecuación lineal y la distancia de la colada.	134
D.4.	Se observa una tabla que muestra los datos de los anchos de los levées medidos de cada perfil. En aquellos casos en que no había levées o no se logró definir bien sus límites, los datos están en blanco.	135
D.5.	Gráfico que muestra el ancho del levée vs. la distancia de la colada junto con su ecuación lineal para la colada a3 B.	135
D.6.	Se observa una tabla que muestra los datos de los anchos de los levées medidos y estimados para cada perfil. Los datos estimados se determinaron con la ecuación lineal y la distancia de la colada.	136

D.7.	Se observa una tabla que muestra los datos de los anchos de los levées medidos de cada perfil. En aquellos casos en que no había levées o no se logró definir bien sus límites, los datos están en blanco.	136
D.8.	Gráfico que muestra el ancho del levée vs. la distancia de la colada junto con su ecuación lineal para la colada a4 N.	137
D.9.	Se observa una tabla que muestra los datos de los anchos de los levées medidos y estimados para cada perfil.	137
D.10.	Se observa una tabla que muestra los datos de los anchos de los levées medidos de cada perfil. En aquellos casos en que no había levées o no se logró definir bien sus límites, los datos están en blanco.	138
D.11.	Gráfico que muestra el ancho del levée vs. la distancia de la colada junto con su ecuación lineal para la colada a4 S.	138
D.12.	Se observa una tabla que muestra los datos de los anchos de los levées medidos y estimados para cada perfil. Los datos estimados se determinaron con la ecuación lineal y la distancia de la colada.	139
E.1.	Se observa una tabla que muestra los valores del área, espesor promedio y volumen de los distintos segmentos en los que se dividió el flujo principal de la colada a3.	139
E.2.	Se observa una tabla que muestra los valores del área, espesor promedio y volumen de los distintos segmentos en los que se dividió el lóbulo de la colada a3.	140
E.3.	Se observa una tabla que muestra los valores del área, espesor promedio y volumen de los distintos segmentos en los que se dividió el sector norte de la colada a4.	140
E.4.	Se observa una tabla que muestra los valores del área, espesor promedio y volumen de los distintos segmentos en los que se dividió el sector sur de la colada a4.	141
F.1.	Se observa una tabla que muestra los valores de las variables obtenidas por bibliografía para la determinación de la densidad de la colada a3, de acuerdo a su composición.	141
F.2.	Se observa una tabla que muestra los valores de las variables obtenidas por bibliografía para la determinación de la densidad de la colada a4, de acuerdo a su composición.	142
G.1.	Se observa un gráfico que muestra la evolución de la tasa eruptiva en el tiempo de duración de la colada Ajata inferior, según el modelo del YSC.	142
G.2.	Se observa un gráfico que muestra la evolución de la tasa eruptiva vs. el tiempo de duración de la colada Ajata superior, según el modelo del YSC.	143

Capítulo 1

Introducción

1.1. Planteamiento del problema

Los flujos de lava son los productos volcánicos más comunes sobre la superficie de la Tierra. Las morfologías, dimensiones y texturas que estos posean entregan indicios de las condiciones en las que se emitieron, por lo que comprender estas características de los flujos de lava sirve para predecir y evaluar las consecuencias de una erupción efusiva.

Si bien los flujos de lava no se caracterizan por su rapidez, estos pueden alcanzar largas distancias, amenazando vidas, generando daños a la infraestructura (Blong, 1984) y provocando incendios (Ogden et al. 1998), transformándose así en un peligro para las zonas aledañas. Por lo tanto, es de suma importancia comprender los factores que controlan su dinámica para así poder predecir la evolución de los flujos de lava activos e identificar las zonas de peligro.

Para simular la evolución de los flujos de lava hay que comprender los factores que controlan su movimiento y detención. Distintos autores han analizado su comportamiento y determinaron que los flujos de lavas están controlados principalmente por la tasa eruptiva, la reología y la topografía del lugar (Walker (1973), Hulme (1974), Malin (1980), Castruccio et al. (2013)).

En este estudio, se trabajará en la Zona Volcánica Central (ZVC), específicamente en el volcán Parinacota que pertenece al complejo Nevados de Payachata de edad Pleistoceno superior-Holoceno, en donde se analizarán dos coladas de lava holocenas no históricas, Ajata inferior (a3) y Ajata superior (a4). De estos flujos se tomarán sus datos morfológicos y se describirá su petrología. Luego, utilizando modelos de regímenes dinámicos, se pretende estimar los parámetros eruptivos que caracterizaron al evento volcánico que generó a estas coladas, tales como la velocidad y la tasa eruptiva que estas alcanzaron. Este análisis nos permite evaluar las condiciones de erupción que podrían esperarse para futuras erupciones en el volcán.

Se escogió el volcán Parinacota debido a que este sufrió un colapso parcial del edificio volcánico hacia el oeste, hace aproximadamente 8 k.a., y se volvió a reconstruir, lo que permite evaluar cómo el edificio volcánico influye en el volumen erupcionado, la intensidad y el estilo eruptivo (efusivo o explosivo) (Castruccio et al., 2017), debido a que el edificio volcánico al irse formando modifica 3 parámetros que afectan la dinámica de ascenso del magma a

niveles poco profundos como por ejemplo: 1) la longitud del conducto que se va agrandando; 2) el estrés de la corteza, ya que el peso del edificio aumentará la presión litostática la cual puede modificar el volumen erupcionado al cambiar el contenido de burbujas en la cámara magmática y la sobrepresión crítica; 3) la sobrepresión necesaria para la fractura de la roca y el inicio de una erupción (Pinel y Jaupart, 2003), pues el crecimiento del volcán reduce el gradiente de presión que impulsa al magma ascender fuera de la cámara magmática. También permitiría evaluar lo propuesto por Watt (2019), quién indica que los volcanes post colapso muestran una actividad renovada y cambios en la composición de los productos erupcionados.

Por su lado, se eligieron las lavas de Ajata, las cuales provienen de unas fisuras ubicadas a 1500 m por debajo de la cumbre, para compararlas con lavas futuras emitidas por la cumbre y así poder evaluar lo propuesto por Castruccio et al. (2017) quienes indican que las lavas emitidas desde la cima producen flujos más cortos, y lo observado por Epp et al. (1983) quienes notaron una correlación inversa entre la elevación de donde se emitieron las lavas y el volumen erupcionado. Además, estos flujos de lavas, al provenir de erupciones laterales, no se ven afectados por el largo del conducto, pero sí por la carga litostática que produce el edificio volcánico, por lo que sus volúmenes podrían ser mayores.

1.2. Ubicación y Acceso

El volcán Parinacota está ubicado en el Altiplano a una altitud promedio de 4600 m.s.n.m., confinadas entre la cordillera occidental y la cordillera oriental, en la región de Arica y Parinacota, específicamente en las coordenadas UTM 19K 484723.13 E / 7991137.84 N (zona 19 S y Datum WGS84) (figura 1.1). Se encuentra a 20 km hacia el este de Parinacota, en la frontera de la república de Chile y la de Bolivia, por lo que la zona oeste del volcán pertenece a Chile y la zona este a Bolivia. El volcán se encuentra dentro del Parque Nacional Lauca.

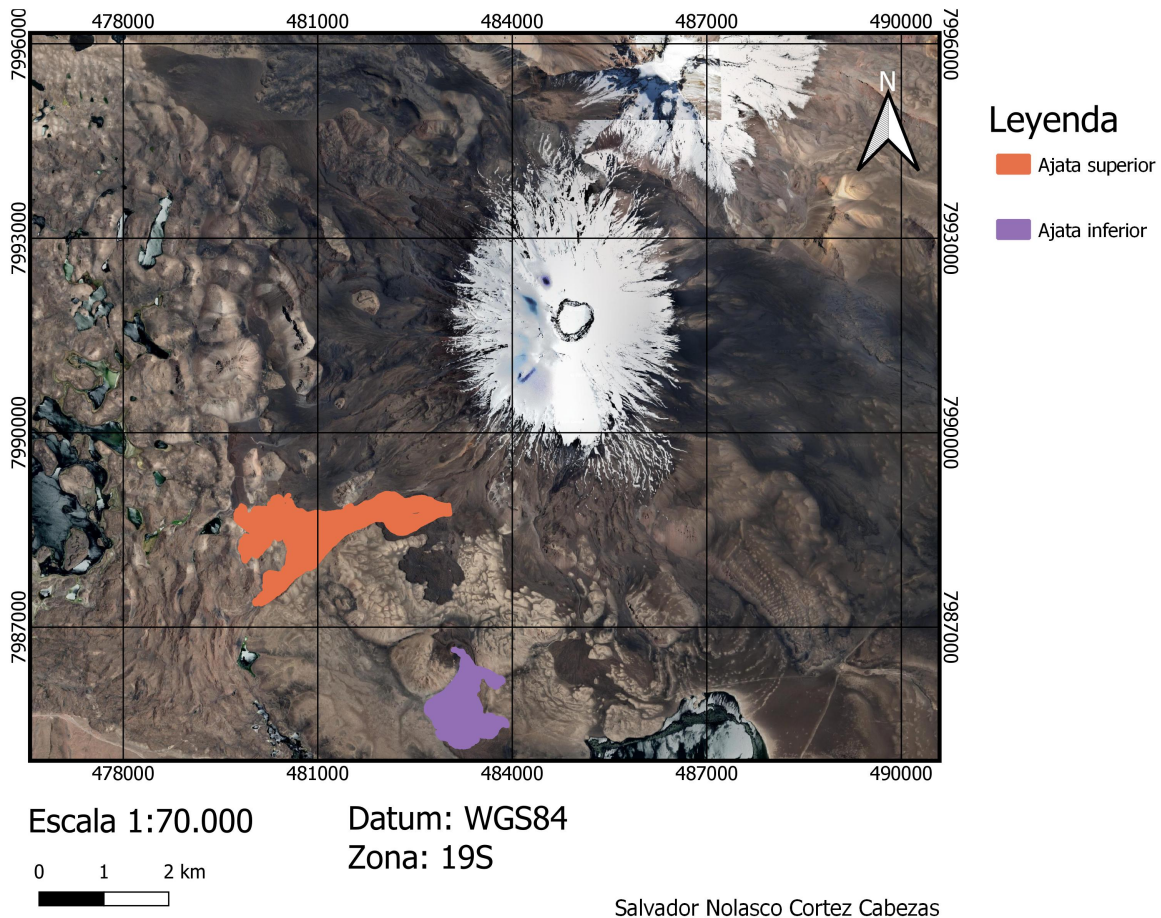


Figura 1.1: Mapa del volcán Parícuta. El polígono de color naranja corresponde a la colada Ajata superior y el de color morado al Ajata inferior.

El volcán se ubica a 2277 km al norte de Santiago y aproximadamente a 160 km al este de Arica. Se puede acceder a él por diferentes caminos, como se ilustra en la figura 1.2: uno oeste y otro sur. Desde el oeste se toma la ruta principal que corresponde a la Ch-11, que une las ciudades de Arica (Chile) y La Paz (Bolivia) a través del paso fronterizo Chungará-Tambo Quemado y unos 3 km antes del paso fronterizo hay que tomar dirección norte unos 7 km por un camino de tierra que lleva a la base del volcán. Desde el sureste hay que tomar la ruta ripiada A-385 hacia el norte, continuar por la A-395, luego la A-319, la A-235, la A-201, la A-211 hasta llegar a la Ch-11 y seguir por esa ruta en dirección este. Por otro lado, desde el norte hay que tomar la ruta A-93 en dirección sur hasta llegar a la a la ruta Ch-11 y seguir por la ruta en dirección este hasta llegar al volcán.

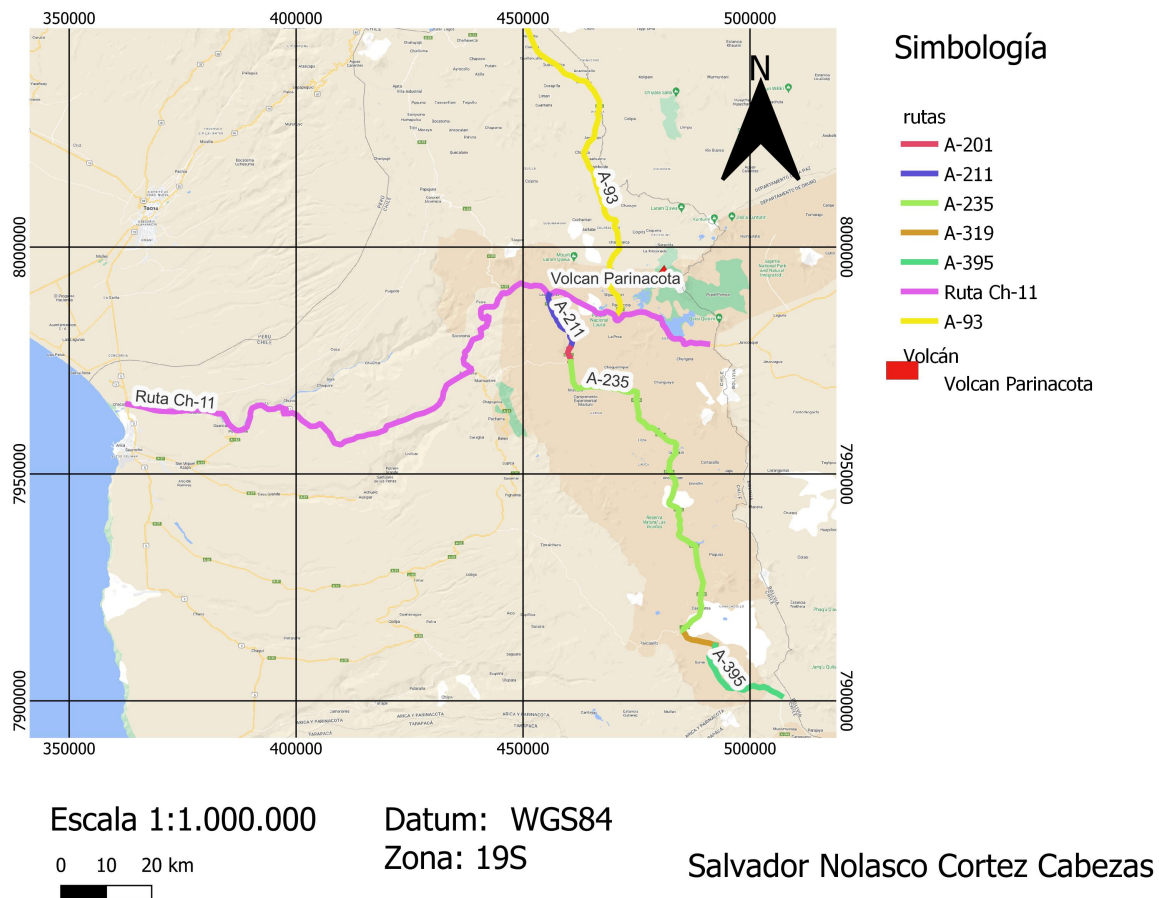


Figura 1.2: Mapa de rutas para llegar al volcán Parínacota.

1.3. Hipótesis

El régimen dinámico de una colada de lava, que está dado por su tasa eruptiva y reología, queda registrado en la textura, petrografía y morfologías de los productos emitidos en la erupción. Por lo que, con trabajos de terreno, teledetección y petrográficos se pueden estimar estos valores para las coladas que se van a estudiar en este trabajo, Ajata inferior y Ajata superior del volcán Parínacota y con esto, a partir de modelos teóricos basados en las dimensiones y reología de las lavas, poder estudiar cómo se comportaron y avanzaron.

Basándose en la información geológica disponible, se plantea la hipótesis de que debido a la similitud en la composición y las características morfológicas de estas coladas de lava, se esperaría que, tanto el régimen dinámico que controla el avance de los flujos como el comportamiento que tienen estos al momento de fluir, sea similar.

,

1.4. Objetivos

1.4.1. Generales

- Determinar los parámetros eruptivos de dos flujos de lava, Ajata inferior y Ajata superior del volcán Parinacota.

1.4.2. Específicos

- Estimar la tasa eruptiva y volumen eruptado de los dos flujos de lava.
- Analizar la dinámica de emplazamiento de las lavas, en función de los factores reológicos que controlan el avance y detención del flujo.
- Comparar el comportamiento eruptivo de las lavas Ajata superior e inferior con otros flujos de lava de composición similar.

Capítulo 2

Marco Geotectónico y Geológico

2.1. Estratigrafía

El volcán Parinacota, debido a que se encuentra al oeste de la cordillera occidental, posee como basamento la formación Lupica (secuencias volcanoclásticas del Oligoceno superior-Mioceno inferior), formación Lauca (depósitos lacustres del Mioceno-Plioceno), Ignimbrita Lauca (Plioceno superior) y depósitos lacustres y fluvio-glaciales (Pleistoceno superior-Holoceno) (Clavero et al., 2012).

2.1.1. Formación Lupica (Oligoceno superior-Mioceno inferior)

Corresponde a una secuencia volcanoclástica que aflora en el sector noroeste del volcán (Clavero et al, 2012), que, de acuerdo a Montecinos (1963), posee un espesor de 2500 m. En la zona de estudio corresponde a ignimbritas riolíticas con 50 m de espesor, muy soldadas y silicificadas. Las tobas están compuestas por abundantes cristales de cuarzo, restos argilizados de feldespatos y una baja cantidad de minerales máficos, los cuales se encuentran dentro de una matriz de ceniza fina soldada y silicificada (Clavero et al, 2012).

Según dataciones radiométricas de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, K-Ar y U-Pb, realizadas por García et al. (2004), sugieren que la Formación Lupica posee una edad de entre 18-25 Ma.

2.1.2. Formación Lauca (Mioceno superior?-Plioceno)

Secuencia horizontal de 10 m de espesor, que aflora en el extremo suroeste de la zona de estudio. Consiste en intercalaciones de depósitos lacustres de grano fino (limo-arena) de 20 cm de espesor y niveles epiclásticos de hasta 15 cm de espesor con mediana a buena selección y ricos en pómez redondeados de tamaño lapilli. Esta formación subyace de manera concordante a la ignimbrita Lauca (Clavero et al, 2012).

Según dataciones radiométricas hechas por Kött et al. (1995) a los niveles epiclásticos, la edad de la formación corresponde al mioceno superior ($5,4\pm 0,2$ a $6,0\pm 0,3$ Ma), pero, debido a su transición a depósitos del pleistoceno, García et al (2004) sugiere que la edad se extiende hasta el pleistoceno.

2.1.3. Ignimbrita Lauca Pil (Plioceno superior)

Consiste en depósitos de flujo piroclástico riolítico mal seleccionados, los cuales, en el área de estudio, afloran en el noroeste y suroeste, con un espesor que puede alcanzar hasta los 30 m. Presenta fragmentos juveniles pumíceos de hasta 20 cm de radio, con fenocristales de biotita, sanidina, cuarzo y fragmentos líticos polimícticos, principalmente lavas andesíticas subangulos de 6 cm de radio, dentro de una matriz de ceniza fina de color blanca a rosada. Contiene niveles basales de oleadas piroclásticas con estratificación paralela y cruzada, lentes con tamaño de grano más grueso y contiene fragmentos líticos del basamento (Clavero et al, 2012).

Mediante dataciones de K-Ar y $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en sanidina, se determinó que la edad se encuentra entre 2.6 - 2.8 Ma, lo cual coincide con la edad del evento eruptivo que la originó (García et al., 2004).

2.1.4. Depósitos lacustres y fluvioglaciales (Pleistoceno)

Se encuentran ubicados en los alrededores de la cuenca del río Lauca y en las laderas bajas del volcán. Los depósitos fluvioglaciales consisten en capas subhorizontales de hasta 2 m de espesor, compuestas por fragmentos de tamaño grava dentro de una matriz de grano medio. Se caracteriza por ser matriz soportada y tener una estratificación subhorizontal. Fueron originados en las zonas más distales de los sistemas glaciales del pleistoceno. Por otro lado, los depósitos lacustres se encuentran intercalados en la parte superior de los depósitos fluvioglaciales, por capas de 20 cm de espesor, bien seleccionadas, laminados y de granulometría de arena fina a limo. Se encontraron bloques de estos depósitos, incorporados en los depósitos de avalancha del Volcán Parinacota (Clavero et al, 2012).

2.2. Geología volcán Parinacota

El volcán Parinacota se ha construido sobre una corteza de 70 km de espesor (James, 1971) en donde la Placa de Nazca se está subduciendo bajo la placa Sudamericana con un buzamiento de 30° (Hora et al., 2007). Tal espesor afecta a la generación y evolución de los magmas (Scheuber y Giese, 1999). De acuerdo a las edades K-Ar, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, ^3He y U-Th la construcción del edificio volcánico se ha llevado a cabo durante 200 k.a. (Bourdon et al., 2000; Clavero et al., 2004; Wörner et al., 1988, 2000a).

Según Clavero et al. (2004a), el volcán Parinacota posee 3 unidades estratigráficas que caracterizan su historia eruptiva, las que se representan en la figura 2.2. Tales unidades representan los estadios de evolución del volcán y fueron descritos por Clavero et al. (2006) de acuerdo a criterios estratigráficos, morfoestructurales, geocronológicos y geoquímicos. Cabe destacar la escasa presencia de afloramientos de las unidades más antiguas (Unidad Parinacota 1 y 2) debido al colapso del edificio volcánico que generó el Depósito de Avalancha Volcánica Parinacota (DAVP), por lo tanto, los productos de tales unidades se encuentran en estos depósitos o han sido cubiertos por la unidad más reciente (Unidad Parinacota 3) (Clavero et al, 2012).

2.2.1. Unidad Parinacota 1 Plpa1 (Pleistoceno Medio?-superior, ca. 300-40? ka)

Esta unidad se puede dividir en 2 subunidades en base a la estratigrafía y datos geocronológicos (Wörner et al., 1988, 2000; Clavero et al., 2004a; Hora et al., 2004). La subunidad inferior, correspondiente a la más antigua, consiste en lavas andesíticas, mientras que la subunidad superior está conformada por lavas y domos dacíticos y domos y depósitos piroclásticos riodacíticos. Esta unidad aflora principalmente en la parte baja del flanco austral del volcán, pero también se encuentran afloramientos, en menor cantidad, en los flancos norte y sureste.

2.2.1.1. Subunidad inferior Plpa1(a) (260-110 ka)

Según Clavero et al. (2012) esta subunidad está formada por lavas andesíticas silíceas (59-61 % SiO₂), que se caracteriza por sus superficies de bloques suavizadas, sus texturas porfíricas y por poseer fenocristales de plagioclasa, anfíbola, clino y ortopiroxeno. Las edades de estas lavas se obtuvieron a través de dataciones radiométricas de K-Ar, indicando que las lavas fueron emitidas entre 260 y 110 ka (Wörner et al., 1988). Tales lavas afloran como una extensa plataforma baja de 50 m de espesor, por lo que representan sólo $6 \pm 2 \text{ km}^3$ de material, es decir, aproximadamente un 13% del volumen total. De acuerdo a Hora et al. (2007) la tasa de efusión promedio durante esta subunidad del volcán Parinacota fue 0,13 km³/año. Posterior a esta unidad hubo una pausa que duró $64,2 \pm 6,2 \text{ k.y.}$ aproximadamente (Hora et al., 2007).

2.2.1.2. Subunidad superior Plpa1(b), Plpa1(c), Plpa1(d) (ca. 55-40 ka)

Corresponde a lavas y lavas-domo dacíticas, domos y depósitos de flujo piroclástico riodacíticos que sobreyacen a las lavas de la subunidad inferior. (Clavero et al., 2012) Los domos riodacíticos (Plpa1(b)) (69-71 % SiO₂) afloran tanto en el flanco sur como norte del volcán, pero también se encuentran en los depósitos de avalanchas como Torevas (grandes bloques casi intactos) (Reiche, 1937). Se caracteriza por sus superficies brechosas y potencias de hasta 250 m. De acuerdo a las dataciones de ⁴⁰Ar/³⁹Ar hechas por Hora et al. (2004), indican edades de entre 40 y 50 ka.

Las lavas y lavas-domo dacíticos (Plpa1(c)) corresponden a coladas dacíticas (67 % SiO₂), que debido a su alta viscosidad poseen una extensión corta (< 2,5 km) y gran potencia (hasta 120 m) (Clavero et al., 2012). Son ricas en fenocristales de plagioclasa, piroxeno, sanidina, cuarzo, biotita, anfíbol, esfena y circón, pero carecen de olivino (Hora et al., 2007). Se caracterizan por ser coladas de lava muy potentes (tipo ‘coulée’) o domos de base subcircular (Clavero et al, 2012). De acuerdo a una datación K-Ar a roca total realizada por Wörner et al. (1988), estas lavas poseen una edad de $53 \pm 11 \text{ ka.}$

Los depósitos piroclásticos (Plpa1(d)) corresponden a depósitos piroclásticos de bloques y ceniza de composición riodacíticas a riolíticas (69- 74 % SiO₂), que se encuentran asociados al colapso de domos y afloran en el flanco sureste del volcán. Se caracterizan por ser de extensión corta (3,5 km) y bajo espesor (< 10 m) (Clavero et al, 2012). Según 3 dataciones de ⁴⁰Ar/³⁹Ar realizadas por Clavero et al. (2004a) una en hornblenda y dos en

biotita, entregaron edades de $308,0 \pm 12,0$ y $76,2 \pm 8,2$ ka y $305,8 \pm 3,2$ ka, respectivamente. Clavero et al. (2012) concluyeron que los resultados geocronológicos más antiguos se deben a la contaminación xenocrística o exceso de argón en las fases minerales, por lo tanto no son muy representativas. Por otro lado, según otros antecedentes geocronológicos (Clavero et al. (2004a) y Hora et al. (2004)) y de acuerdo a que se encuentran estratigráficamente sobre la subunidad inferior, la edad debería ser entre 76 y 40 ka (Clavero et al., 2012).

2.2.2. Unidad Parinacota 2 Plpa2R, Hpa2A (Pleistoceno superior-Holoceno, 40?-8 ka)

Consiste en la formación de un estratocono ancestral que sobreyace la unidad Parinacota 1 y se generó por lavas dacíticas silíceas (62,2–64,3 % SiO₂) en el flanco noroeste del complejo datadas con fechas de $46,7 \pm 1,6$ ka y por depósitos de piroclásticos de caída y laháricos. A medida que el cono se iba construyendo, la composición de las lavas se volvió más andesítica (61,8–57,9 % SiO₂) de tipo A'a, con texturas variadas y fenocristales de feldespato y anfíboles (Hora et al., 2007). Clavero et al. (2012) han estimado que el estratocono era de dimensiones similares al actual, basándose en el volumen de material contenido en los depósitos de avalancha y en que el estratocono colapsó casi por completo, por lo que la tasa eruptiva promedio perteneciente a esta unidad es de $0,46 \pm 0,11$ km³ /k.a (Hora et al., 2007).

Clavero et al. (2004a) realizaron dataciones de ⁴⁰Ar/³⁹Ar a la masa fundamental de una de las lavas del afloramiento, obteniendo una edad de $14,1 \pm 3,2$ ka mientras que las dataciones de ⁴⁰Ar/³⁹Ar realizadas por Hora et al. (2007) indican edades desde $52,3 \pm 2,8$ ka en adelante. Por otro lado, según antecedentes geocronológicos realizados por Clavero et al. (2002) a depósitos piroclásticos de la unidad Parinacota 2, se indica la ocurrencia de eventos eruptivos estrombolianos entre 12 y 8 ka, los cuales se relacionarían con la efusión de lavas que formaron el estratocono ancestral de la Unidad Parinacota 2.

2.2.3. Depósito de Avalancha Volcánica Parinacota Hpa2A (Holoceno, ca. 7-8 ka)

El colapso parcial del edificio volcánico construido durante los estadios Parinacota 1 y 2, concluye con el estadio de evolución de la unidad Parinacota 2. El colapso produjo el depósito de avalancha volcánica Parinacota correspondiente a un depósito volcanoclástico que se ubica en la parte baja del flanco oeste del volcán extendiéndose cerca de 22 km, cubriendo un área circundante de 140 km² y un volumen de 6 km³ aproximadamente (Clavero et al., 2012). Cabe destacar que el volumen es un aproximado debido a que no hay certeza sobre la topografía preexistente, la poca información en profundidad y el crecimiento de vegetación y deposición de sedimentos en las partes más distales de la avalancha.

La avalancha se dividió en 2 unidades: La unidad inferior que se compone principalmente de bloques de lavas riódacíticas, domos, depósitos de flujos piroclásticos y sedimentos glaciales, fluviales y lacustres (Clavero et al., 2002). Tales bloques son denominados por Reiche (1937) como bloques 'Toreva' que corresponden a bloques de domos riódacíticos de gran volumen ($0,05 \text{ km}^3$) y tamaño hasta 250 m, prácticamente intactos. Por otro lado, la unidad superior está conformada por una brecha de grano grueso clastosoportada, compuesta en su

mayoría por bloques de andesita (Clavero et al., 2002).

Clavero et al. (2002) indican que el colapso del edificio ancestral Parinacota fue causado por la sobrecarga de sedimentos fluvio-glaciales y lacustres, y ocurrió a través de planos de debilidad y fracturas existentes del estratovolcán.

Hora et al. (2007) definen los límites de edad de la avalancha entre $20,0 \pm 4,0$ ka, correspondientes a la andesita más joven del cono viejo, y $9,9 \pm 2,1$ ka, correspondiente la lava posterior al colapso más antigua, mientras que las dos dataciones realizadas por Clavero et al. (2002) a horizontes de paleo-suelo encontrados en los depósitos de avalancha, uno cerca de lago Chungará y el otro cerca de Parinacota Village, dieron edades de $7,79 \pm 0,1$ y $8,6 \pm 0,17$ ka, quienes los definieron como las máximas edades que podía tener la avalancha debido a que indican que los sedimentos que poseen materia orgánica y están expuestos en el área de los lagos Cotacotani son más antiguos que la avalancha del Parinacota.

2.2.4. Unidad Parinacota 3 Hpa3 (Holoceno, <8 ka)

Corresponde a la unidad que ha originado el nuevo cono del edificio volcánico, el cual se ha formado por productos emitidos a través del edificio principal, como lavas andesíticas, depósitos de flujo piroclástico andesítico-basálticos/dacíticos, depósitos piroclásticos de caída y depósitos laháricos, y aquellos productos emitidos a través de centros eruptivos menores adventicios (volcanes de Ajata), correspondientes a caída de piroclásticos y lavas andesíticas y andesíticas-basálticas (Clavero et al., 2012; Ginibre y Wörner, 2007; Hora et al., 2007).

2.2.4.1. Edificio Principal Hpa3(a), Hpa3(b), Hpa3(c), Hpa3(d) (Holoceno)

El edificio principal es un estratovolcán de aproximadamente 2000 m de altura, con un volumen de 18 km^3 y una base con diámetro de 8 km aproximadamente. Consiste en una alternancia de lavas y depósitos piroclásticos de flujos y caída (Clavero et al., 2012; Hora et al., 2007).

Las lavas, de composiciones andesíticas (58-60% SiO₂), son de tipo A'a y están distribuidas de manera radial en torno al volcán. Sus dimensiones son menores a 7 km de largo, anchos entre los 200 y 1300 m y espesores de 10 a 40 m. Presentan morfologías como lóbulos de avance y frontales, levées y superficies brechosas (Clavero et al., 2012). Dataciones realizadas por Hora (2007), arrojaron edades de las lavas que varían de $8,1 \pm 1,8$ a $0,5 \pm 0,3$ ka. Ginibre y Wörner (2007) dividieron las lavas petrográficamente en dos grupos: el grupo YC1 que se caracterizan por poseer abundantes plagioclasas de tamaños de 2-3 mm y el grupo YC2 que posee plagioclasas más pequeñas y en menor abundancia. Ambos grupos contienen piroxenos, óxidos y apatitas.

Los depósitos laháricos (Hpa3(b)) se encuentran distribuidos en todos los flancos del volcán a excepción del flanco norte. Poseen extensiones menores a 8 km y espesores de entre 0.2 a 1 m con superficies suaves (Clavero et al., 2012).

Los depósitos de flujo piroclástico (Hpa3(c)) también se encuentran distribuidos de manera radial alrededor del edificio volcánico. Consisten en pequeños volúmenes de depósitos

de flujos piroclásticos con dimensiones de largo máximos de 7 km y espesores de entre 0.1 a 30 m. Poseen lóbulos dendríticos, frentes abruptos y se caracterizan por ser depósitos no consolidados. De acuerdo a sus dimensiones y las características que presentan los depósitos, es que sugieren que fueron originados por colapsos de columnas eruptivas subplinianas. Presentan mineralogía andesítica similar a la de las lavas andesíticas de esta unidad, pero también presentan mineralogía dacítica similar a la de la Unidad Parinacota 2 (Clavero et al., 2012).

Los depósitos piroclásticos de caída (Hpa3(d)) se encuentran distribuidos principalmente hacia el este, alcanzando distancias hasta 15 km aproximadamente, con espesores entre 1 a 20 cm (Clavero et al., 2012). Las edades de material piroclástico obtenidas por Hora et al. (2007) fueron de $4,8 \pm 0,8$, $4,3 \pm 2,6$ y $3,6 \pm 1,1$ ka.

2.2.4.2. Volcanes de Ajata Hpa3(e) (Holoceno)

Según Entenmann (1994) y Wörner et al. (1998) los volcanes de Ajata se tratan de una serie de conos de piroclastos y lavas adventicias. Se originaron a través de fisuras en el flanco suroeste del edificio volcánico que da como resultado centros volcánicos "rápidos", los cuales Clavero et al. (2004a) dividieron en dos grupos: uno en dirección NNE, correspondiente al conjunto ubicado más al norte y otro asociado a una fisura en dirección NS, correspondiente al conjunto ubicado más al sur. Estas fisuras han generado pequeños conos de escoria monogénicos y flujos de tipo A'a que alcanzan hasta 3 km de extensión (Hora et al., 2007).

Según Clavero et al. (2012), el conjunto de más al sur consta de dos conos de piroclastos y al menos 4 flujos de lava de tipo A'a que alcanzan hasta 2 km de largo, 20 m de espesor y hasta 1300 m de ancho. Presentan morfologías como lóbulos de avance y frontales, levées y superficies brechosas. De acuerdo a Entenmann (1994) las lavas se caracterizan por su composición andesítico-basáltica con textura principalmente afírica, pero también presentan fenocristales (<5% vol.) de olivino y clinopiroxeno, con algunos xenocristales de sanidina y plagioclasa. Respecto a las edades, Wörner et al. (2000) realizó tres dataciones de exposición He^3 a distintas fases minerales, las cuales entregaron valores entre 6.560 ± 1.220 años y 3.050 ± 450 años; mientras que el conjunto de más al norte Clavero et al. (2012) los definieron en al menos 4 centros de emisión correspondientes a pequeños conos de piroclastos y 5 flujos de lavas de tipo A'a con dirección S-SE, las cuales alcanzan distancias máximas de hasta 3 km y espesores de hasta 20 m. Presentan morfologías similares a las del sector sur. Sus composiciones las dividió en 2 subgrupos, el flujo septentrional que se caracteriza por una composición más andesítica con fenocristales (<15% vol.) de plagioclasa, clino y ortopiroxeno y escaso olivino, y los flujos australes que poseen composiciones similares a las del grupo sur (Clavero et al., 2012). Wörner et al. (2000) realizó dataciones de exposición He^3 encontrando edades entre 2.160 ± 280 y 1.385 ± 350 años por lo cual, este grupo se consideraría el más joven. De acuerdo a lo expuesto por Clavero et al. (2004a), estos centros adventicios se formaron de manera simultánea con el edificio principal actual.

Por otro lado, Hora et al. (2007) definieron 4 flujos de Ajata. El primero corresponde al a1 que produjo varios flujos y algunas eyecciones. Uno de los flujos está datado con fecha de hace $9,9 \pm 2,1$ ka y una bomba, que se encuentra asociada con esta unidad, la cual presenta un contenido de Si de 58,5%, tiene una edad de $5,4 \pm 2,7$ ka. Más hacia el flanco sur del volcán,

sobre la meseta del domo de riodacita, se generaron 2 flujos de lavas a2, correspondientes al flujo subyacente de composición de 56,7% de SiO₂ y edad de $5,8 \pm 7,4$ ka que se caracteriza por tener los más bajos contenidos de Sr (800 ppm) y Ba de las lavas máficas de Parinacota, y a3 que corresponde al flujo sobreyacente de composición 53,3% SiO₂, siendo esta la composición más máfica del volcán Parinacota, con edad de $4,8 \pm 4,0$ ka. Corresponden a andesitas basálticas con contenidos muy altos de Sr (>1600 ppm) y Ba y un patrón de REE pronunciado. Las edades fueron obtenidas por dataciones de ⁴⁰Ar/³⁹Ar, las cuales coinciden, para a2 y a3, con las edades de ³He de $6,0 \pm 0,6$ y $3,0 \pm 0,5$ ka respectivamente (Ginibre y Wörner, 2007; Wörner et al., 2000b; Banaszak, 2014). El flujo de Ajata a4 surgió en el lado suroeste del edificio, alcanzando una distancia de 3 km de largo. Las dataciones de ⁴⁰Ar/³⁹Ar entregan edades de $2,6 \pm 1,3$ ka las cuales coinciden con edades de ³He que van de 1,3 a 2,2 ka, lo que indicaría que este es el más joven de los flujos de Ajata (Wörner et al., 2000a) (fig. 2.3).

Estos productos volcánicos emitidos tanto por la cumbre como por fisuras, han reconstruido el edificio volcánico el cual posee una altura de 1800 m desde su base, sus productos volcánicos cubren una superficie de 180 km^2 aproximadamente y se estima que tiene un volumen de 18 km^3 (Clavero et al., 2012). Debido a que la muestra del cono joven más antigua datada es de $8,1 \pm 1,8$ ka se puede usar como la condición para el inicio de la formación del cono joven, indicando que la tasa eruptiva corresponde a aproximadamente 2,25 $km^3/k.a$ (Hora et al., 2007), indicando que el volcán Parinacota es uno de los más activos del Holoceno en los Andes Centrales.

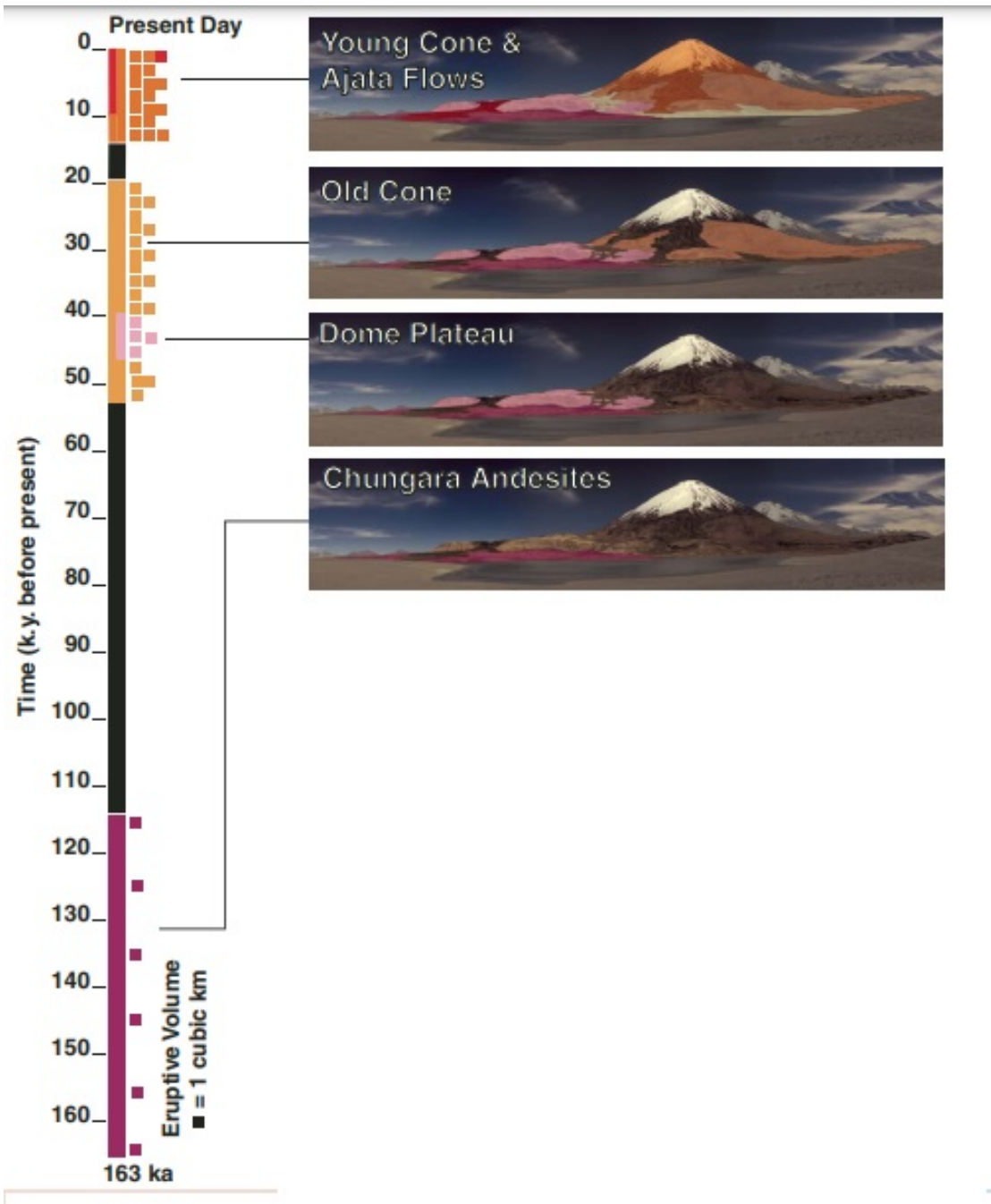


Figura 2.1: Línea de tiempo de eventos en el volcán Parícutin durante los últimos 163 k.y., también representada en la serie de fotos panorámicas del mismo, tomadas desde el sur. Las partes negras de la línea de tiempo indican que no hay erupciones. Los cuadrados de colores representan cada uno 1 km³ de magma en erupción, recuperado en el trabajo de Hora et al. (2007).

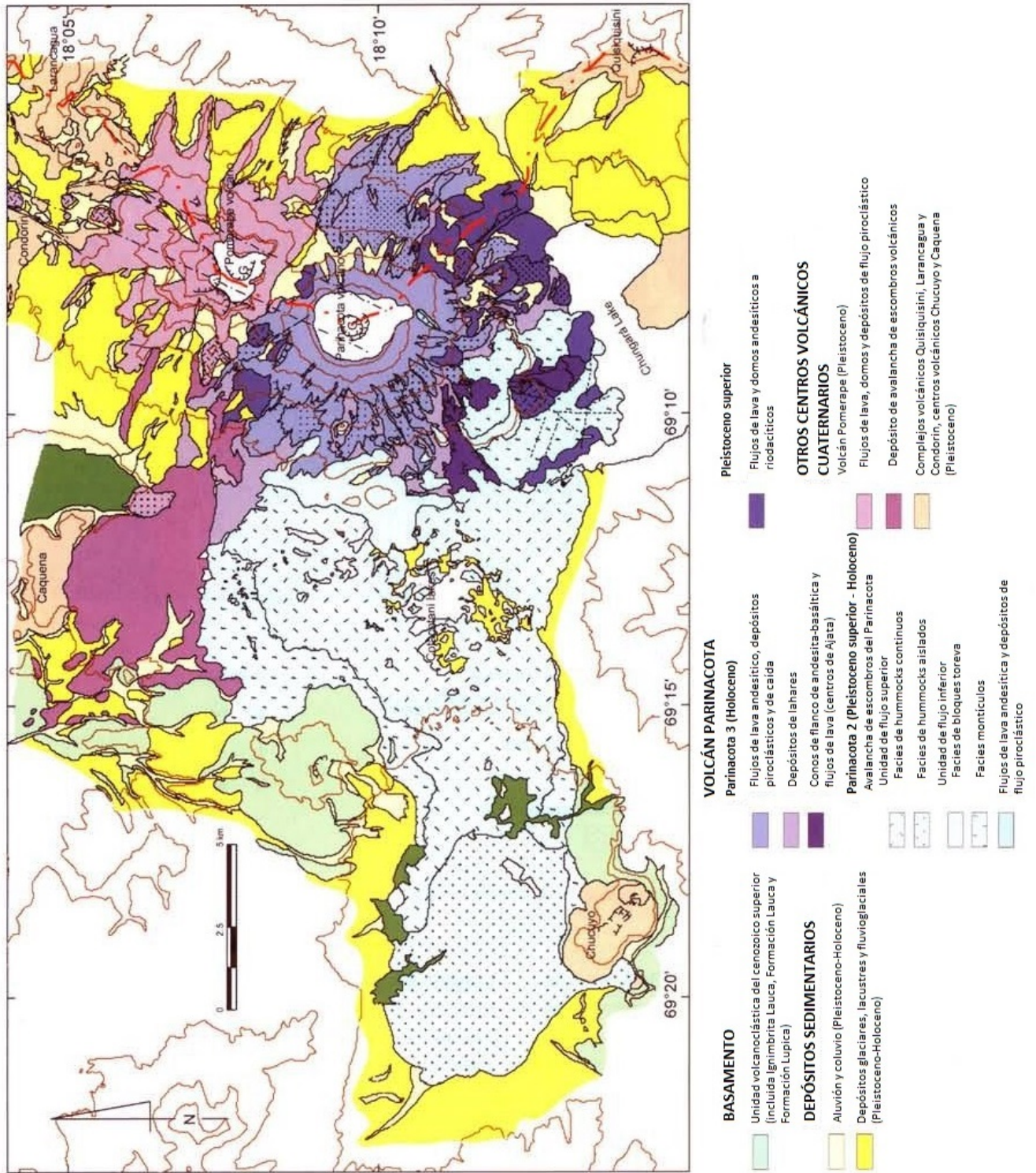


Figura 2.2: Mapa geológico del volcán Parínacota y sus alrededores, recuperado en el trabajo de Clavero et al. (2004).

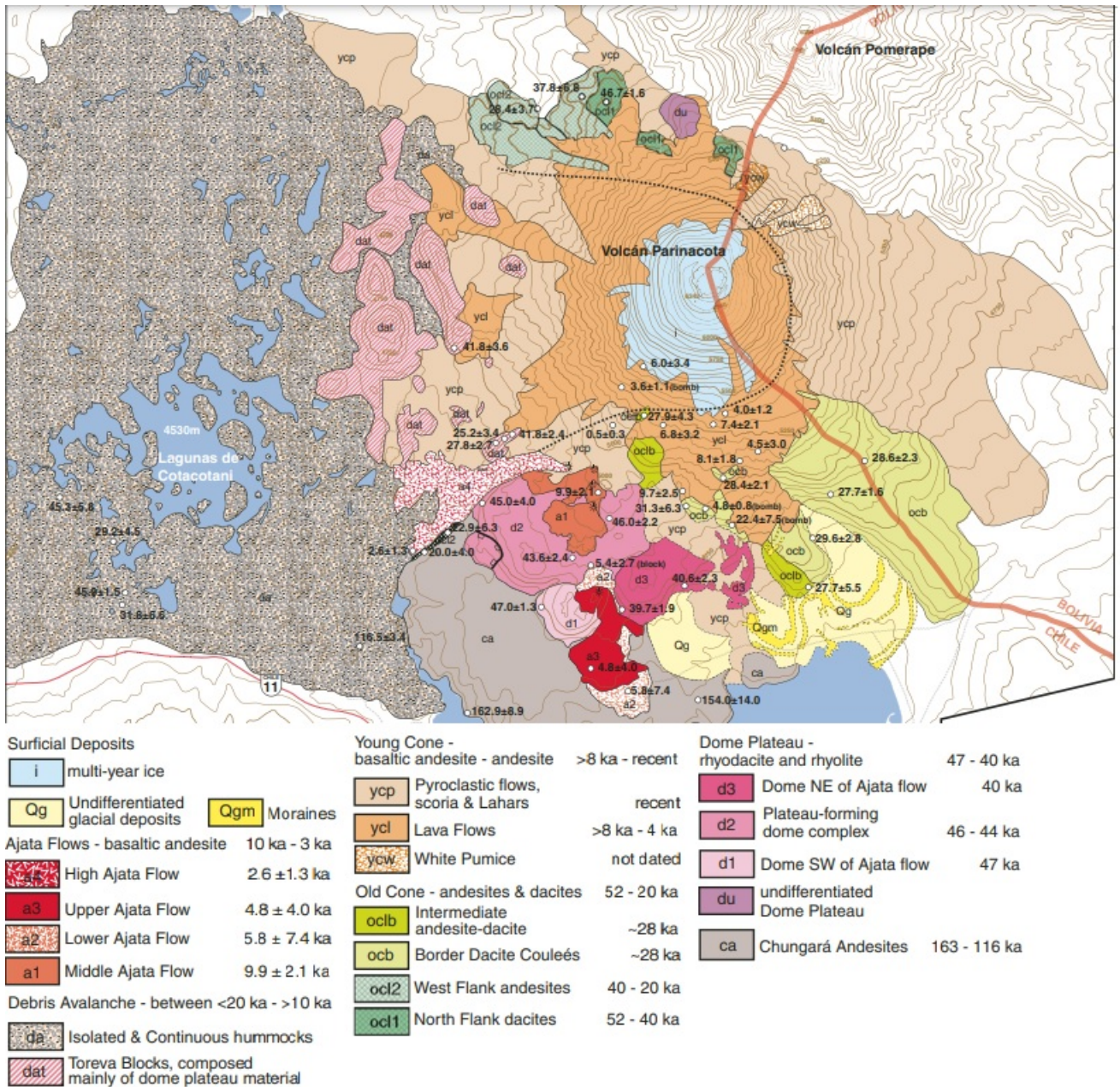


Figura 2.3: Mapa geológico del volcán Parinacota, recuperado en el trabajo de Hora et al. (2007).

Capítulo 3

Marco Teórico

3.1. Teoría de lavas

El planeta Tierra posee muchas áreas volcánicas, de las cuales algunos volcanes se encuentran activos. Según el SERNAGEOMIN esto significa que los volcanes muestran signos de actividad interna o que han hecho alguna erupción en los últimos 10 mil años, por lo que es posible que estos vuelvan a hacer erupción. En una erupción el volcán emite gases volcánicos y lava o material piroclástico, dependiendo el tipo de erupción que se genere.

La lava es magma que ascendió a través de la corteza terrestre y ha alcanzado la superficie. Se caracterizan por sus altas temperaturas que oscilan entre 850° C y 1250° C. Colada de lava se le llama a un manto de lava emitida por un volcán durante su erupción y que fluye sobre la superficie terrestre. Estas se van solidificando a medida que van fluyendo a causa de la pérdida de calor hacia el suelo y la atmósfera, formando así, canales o tubos de lavas. Poseen un amplio rango de composiciones desde basálticas hasta riolíticas y sus propiedades físicas varían dependiendo de sus composiciones, contenido de volátiles, de cristales, entre otras.

Es por esto, que las coladas de lava son de bastante interés y han sido estudiadas en distintas investigaciones con la finalidad de conocer sus comportamientos para así poder entender cuáles son los procesos que controlan su avance o detención y predecir las dimensiones y el tiempo que le toma en alcanzarlas, con el fin de poder evitar que este peligro geológico afecte a la población.

3.1.1. Trabajos anteriores

Los estudios principales que se han realizado sobre la dinámica de lavas son:

- Walker, G. (1973): Fue el primero en determinar que el principal factor de el largo de los flujos de lavas es la tasa de efusión.
- Hulme (1974): Postula que las lavas son líquidos no newtonianos con un *yield strength* (mínimo stress necesario para generar deformación en el flujo) y que es este el que determina las dimensiones del flujo.
- Malin (1980): Indica como factor determinante en las dimensiones de una colada, la tasa

eruptiva, el área de una sección transversal y el volumen eruptado.

- Huppert et al. (1982): Sugieren que la lava asciende bajo una presión de conducción hidrostática decreciente y que cuando la columna de lava alcance el equilibrio hidrostático la extrusión cesará.
- Flink y Griffiths (1992): Determinan que la estructura superficial del flujo dependen del caudal, las condiciones térmicas y la rugosidad de la superficie. También indican que las morfologías superficiales (pillows, rifts y levées) se originan por el enfriamiento de la corteza.
- Pinkerton y Wilson (1994): Postularon que la longitud final de una colada de lava no está controlada solamente por la tasa de efusión, sino que también por la reología de la lava, la pendiente de la superficie y el enfriamiento que va sufriendo.
- Blake y Bruno (2000): Explican que el avance de las coladas de lavas y las morfologías que presentan dependen principalmente del crecimiento, deformación y ruptura de su corteza, la cual también canaliza el flujo, pudiendo formar nuevas ramas.
- Balmforth (2000 y 2002): Estudió el comportamiento de los fluidos viscoplásticos considerando el contenido de cristales en la reología del flujo.
- Lyman et al. (2005): Demuestran que los flujos se detienen por el *yield strength* interno y/o por el enfriamiento de la corteza.
- Harris y Rowland (2009): Estudiaron la relación entre la tasa eruptiva y la pérdida de calor y cómo esta afecta a la longitud de una colada de lava.
- Takagi y Huppert (2010): Indican que la tasa eruptiva es el principal parámetro que controla el avance del frente de los flujos de lava, y en menor medida por la topografía.
- Deardorff et al. (2012): Indican que la tasa de efusión es un parámetro de mayor interés para los flujos de lava en canales abiertos, ya que la tasa de efusión es importante para estimar la longitud final del flujo, la tasa de avance del flujo y la duración de la erupción.
- Castruccio et al. (2013): Sugieren que el *yield strength* de la corteza debe tenerse en cuenta en los modelos de avance del flujo de lava.

3.2. Modelación de las coladas de lava

3.2.1. Reología de las coladas de lava

El modo en que las lavas se deforman o fluyen en respuesta a tensiones o fuerzas aplicadas se rige de acuerdo a las propiedades reológicas, principalmente la viscosidad y el *yield strength*, que corresponde a un nivel de stress que debe ser sobrepasado para que la lava se comience a deformar. Existen distintos casos de reología que han intentado modelar el comportamiento de las coladas de lava y su evolución, como se ilustra en la figura 3.1.

3.2.1.1. Caso newtoniano

Se considera un flujo newtoniano todo aquel que posee una viscosidad constante, que sólo varía cuando ocurren cambios de temperatura o presión. La viscosidad de un fluido newtoniano es la relación entre el esfuerzo cortante que se genera en el fluido para resistir el flujo y la tasa de deformación aplicada al fluido para inducir el flujo. Tal relación se caracteriza por ser lineal (Mendez A. et al., 2010), por lo que el stress aplicado es:

$$\tau = \eta \cdot \gamma \quad (3.1)$$

donde τ es el stress aplicado, η es la viscosidad y γ es la tasa de deformación.

3.2.1.2. Caso Bingham

Se considera un fluido de Bingham a un fluido no newtoniano que requiere de un esfuerzo crítico para empezar a fluir. Estos fluidos se comportan como un sólido hasta que se sobrepasa el esfuerzo de deformación mínimo y comienzan a fluir comportándose como un fluido newtoniano en donde exhiben una relación lineal entre el esfuerzo y la tasa de deformación (Mendez A. et al., 2010).

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \cdot \gamma \quad (3.2)$$

donde, τ_0 es el *yield strength*, correspondiente al mínimo stress aplicado necesario para generar una deformación permanente en el fluido y η_p es la viscosidad plástica.

3.2.1.3. Caso Herschel-Bulkley

Se considera un fluido no newtoniano, cuya viscosidad no es constante. Al igual que los fluidos de Bingham, estos fluidos necesitan de una tensión de corte mínima para que el material fluya, pero una vez sobrepasada la tensión de fluencia, el material puede fluir con una relación entre el esfuerzo y la tasa de deformación de manera lineal ($n=1$) o no lineal (pseudoplástico si $n<1$, es decir, disminuye su viscosidad con el aumento del esfuerzo, o dilatante si $n>1$), lo cual está determinado por el exponente de la ley de potencia. Este modelo reológico incorpora tanto el límite elástico como los efectos de adelgazamiento por cizallamiento (Herschel W. y Bulkley R. 1926).

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \gamma^n \quad (3.3)$$

donde K es la consistencia y n es un parámetro adimensional.

Cuando τ_0 es igual a 0 y n igual a 1 se trata de un flujo newtoniano. Si τ_0 es distinto a 0 y n igual a 1 se obtiene la relación para fluidos tipo Bingham. Si τ_0 es igual a 0 y $n < 1$ el fluido es del tipo pseudoplástico mientras que si $n > 1$ es del tipo dilatante.

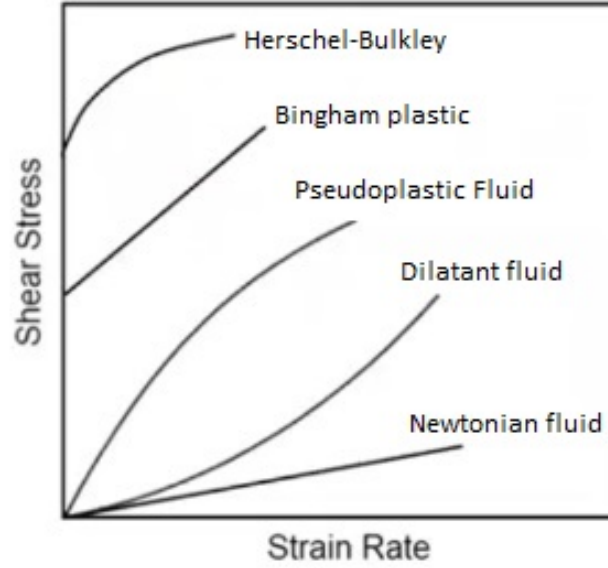


Figura 3.1: Curva esquemática de la reología de los fluidos. Modificado de Balmforth et al. (2000b)

El valor de n es adimensional y es uno de los parámetros requeridos para la determinación de los parámetros eruptivos. Para calcularlo se cuenta con la fórmula entregada por Castruccio (2012):

$$n = \begin{cases} 1 & \text{si } \phi \leq \phi_c \\ 1 + 1,3 \left(\frac{\phi_c - \phi}{\phi_m} \right) & \text{si } \phi > \phi_c \end{cases} \quad (3.4)$$

con $\phi_c = 0,44 \cdot \phi_m$, que corresponde a la concentración de partículas cuando se inicia el comportamiento no newtoniano.

Otra manera de calcular este parámetro, es con la ecuación entregada por Mueller et al. (2010), quién la determinó mediante experimentos usando aceite de silicona y realizando mediciones en un viscosímetro rotacional.

$$n = 1 - 0,2 \cdot r_p \cdot \left(\frac{\phi}{\phi_m} \right)^4 \quad (3.5)$$

Con r_p la razón de aspecto que es la razón entre el largo y el ancho de los cristales.

3.2.2. Parámetros reológicos

Para la determinación de los parámetros eruptivos de los flujos de lava Ajata inferior y superior, se requieren de varios factores, como las dimensiones de las coladas y sus respectivas propiedades físicas. A continuación se presentan algunos de ellos.

3.2.2.1. Viscosidad

La viscosidad del fundido se puede determinar a partir del modelo de Giordano et al. (2008):

$$\log(\eta) = a + \frac{b}{T - c} \quad (3.6)$$

donde η es la viscosidad del fundido, a, b y c son constantes que se determinaron de manera automática al saber la composición del magma y T es la temperatura en K.

Pero la viscosidad del fundido no es equivalente a la viscosidad del magma pues esta última depende de la cantidad de cristales que posea, burbujas de gas y del fundido. Por lo tanto para determinar la viscosidad del magma se requiere aplicar la siguiente fórmula entregada por Einstein-Roscoe:

$$\eta_{magma} = \eta_{melt} \left(1 - \frac{\phi}{\phi_0}\right)^{-2,5} \quad (3.7)$$

donde ϕ es el volumen de fracción de cristales y ϕ_0 es el empaquetamiento máximo de cristales que corresponde a la fracción volumétrica máxima de las partículas cristalinas en el interior del fluido.

Según Griffiths (2000) la consistencia tiene relación con la viscosidad cuando la tasa de deformación ($\dot{\gamma}$) es igual a la unidad y el *yield strength* (τ_0) sea igual a 0. Por lo tanto, la consistencia de las lavas también se puede determinar utilizando la ecuación entregada por Einstein-Roscoe.

3.2.2.2. Yield strength

El *yield strength* corresponde al mínimo stress necesario para generar deformación en un flujo y se puede obtener con las dimensiones del levée del flujo de lava. La ecuación para determinarla fue presentada por Hulme (1974) y corresponde a:

$$\tau_0 = 2 \cdot w_1 \cdot \rho \cdot g \cdot \sin^2(\beta) \quad (3.8)$$

con ρ la densidad, w_1 el ancho del levée, g la gravedad y β la pendiente del terreno por donde fluyó la colada de lava.

Por su lado, Johnson (1970) entrega una fórmula para determinar el *yield strength* en el momento en que la lava se encuentra estacionaria, como en los frentes de los flujos.

$$\tau_0 = \rho \cdot g \cdot H \cdot \sin(\beta) \quad (3.9)$$

con H la altura de la colada.

3.2.2.3. Densidad

La densidad es una de las propiedades físicas fundamentales de los fundidos silicatados que explica la forma en que los magmas fluyen y conducen calor. Cabe destacar que el ascenso de

los magmas se debe al contraste de densidad que existe entre el magma, el manto y la corteza que atraviesa para ascender. La densidad de un fundido de silicatos se puede determinar con la siguiente ecuación (Sigurdsson et al., 1999):

$$\rho = \sum_{i=1}^N \frac{x_i \cdot M_i}{V_i} \quad (3.10)$$

donde x_i es la fracción molar del componente de óxido i , es decir, es el número de moles de un óxido en una muestra dividido por el número total de moles en esa muestra, M_i es la masa molar del componente i (g/mol), V_i es el volumen fraccionario del óxido i (m^3/mol), es decir, es el volumen que ocupa un mol y N es el número total de óxidos en la masa fundida.

Por lo tanto, se requiere conocer V_i , el cual se determina con la siguiente ecuación (Sigurdsson et al., 1999):

$$V_i = \vec{V}_i + \left[\frac{\partial \vec{V}_i}{\partial T} \right]_P \cdot (T - T_0) + \left[\frac{\partial \vec{V}_i}{\partial P} \right]_T \cdot P \quad (3.11)$$

donde \vec{V}_i es el volumen molar parcial del óxido i a una presión de 0,101325 MPa y una temperatura de 1400 K (m^3/mol), $\left[\frac{\partial \vec{V}_i}{\partial T} \right]_P$ es el coeficiente de expansión térmica del óxido i (cómo cambia el volumen molar con la temperatura a presión constante) ($m^3/mol \cdot K$), $\left[\frac{\partial \vec{V}_i}{\partial P} \right]_T$ es el coeficiente de compresibilidad isotérmica del óxido i (cómo cambia el volumen molar con la presión a temperatura constante) ($m^3/mol \cdot GPa$).

3.2.3. Dinámica de los flujos de lava

Para estimar la tasa eruptiva en el tiempo, de cada lava estudiada (Ajata inferior y Ajata superior), se utiliza la siguiente ecuación, asumiendo un canal rectangular y que toda la lava emitida se transporta hacia el frente:

$$Q = H \cdot w \cdot \vec{v} \quad (3.12)$$

con H el espesor (m), w el ancho (m) y \vec{v} la velocidad (m/s) del flujo.

Castruccio et al. (2013) han propuesto 3 regímenes que pueden controlar la dinámica de un flujo de lava. Todos ellos poseen la misma fuerza que genera el movimiento, F_d , la cual está dada por el peso de la lava y corresponde a:

$$F_d \sim V \cdot \rho \cdot g \cdot \text{sen}(\beta) \quad (3.13)$$

con V el volumen del flujo, ρ la densidad del flujo (kg/m^3), g la fuerza de gravedad y β la pendiente a través de la cual fluye la colada.

Pero, estos modelos poseen distintas fuerzas de retardo que generan la detención del flujo, F_R , diferenciando así los distintos regímenes. Uno está controlado por la reología interna, el cual abarca el caso newtoniano, Bingham y Herschel-Bulkley. Otro controlado por el *yield strength* que se genera en la corteza en crecimiento (modelo YSC) y por último, el que considera el *yield strength* en todo el flujo (modelo YS) (fig. 3.2). Por lo tanto, Castruccio et al.

(2013) sugieren que el avance de un flujo de lava no siempre está controlado por la reología interna.

En este trabajo solo se utilizaron los modelos controlados por la reología interna y por el *yield strength* en la corteza, dejando afuera el modelo del *yield strength* en todo el flujo ya que, como no tiene la variable tiempo, no se puede utilizar para flujos de lava no históricas.

3.2.3.1. Caso newtoniano

En este caso, la fuerza retardante es proporcional a $\mu \cdot \gamma$, con μ la viscosidad y γ la tasa de deformación, debido a que el movimiento del flujo depende solamente de la reología interna que posea. Considerando que la tasa de deformación viene dada por:

$$\gamma = -\frac{\delta u}{\delta z} \quad (3.14)$$

entonces γ es proporcional a \vec{v}/H , con \vec{v} la velocidad del flujo y H la potencia del mismo. Esta fuerza actúa sobre un área igual a la base del flujo, por lo tanto también es proporcional a $L \cdot W$, donde L es el largo y W el ancho del flujo. Por lo tanto, la fuerza retardante queda dada por:

$$F_R \sim \mu \cdot \gamma \sim \mu \cdot \frac{u}{H} \cdot L \cdot W \quad (3.15)$$

Igualando la fuerza retardante (F_R) con la fuerza impulsora (F_d), la velocidad de la colada se mantendrá constante, y si se considera $u \sim L/t$ y $V \sim LHW$, entonces se obtiene:

$$L = (C_1 \cdot \frac{V^2 \cdot \rho \cdot g \cdot \text{sen}(\beta) \cdot t}{\mu \cdot W^2})^{\frac{1}{3}} \quad (3.16)$$

con C_1 una constante y t el tiempo.

Pero, debido a los constantes cambios en la pendiente del terreno, el ancho del flujo y las variaciones en la viscosidad de la lava, es que una mejor representación del avance de la colada es dada por:

$$L = C_1 \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{V_i^2 \cdot \rho \cdot g \cdot \text{sen}(\beta_i) \cdot t_i}{\mu_i \cdot W_i^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.17)$$

con V_i igual al volumen en cada tramo, β_i es la pendiente del terreno en el frente, t_i es el intervalo de tiempo entre cada paso, y μ_i y W_i son la viscosidad y el ancho del frente. Despejando, se puede llegar a la ecuación de Jeffrey:

$$\vec{v} = \frac{H^2 \cdot \rho \cdot g \cdot \text{sin}(\beta)}{3\mu} \quad (3.18)$$

3.2.3.2. Caso Bingham

En este modelo, para determinar la velocidad se utiliza la siguiente ecuación:

$$\vec{v} = \frac{H^2 \cdot \rho \cdot g \cdot \sin(\beta)}{3 \cdot \mu} \cdot \left(\frac{3}{2 \cdot H^3}\right) \cdot (H \cdot (H - h_c)^2 - \frac{1}{3}(H - h_c)^3) \quad (3.19)$$

con H el espesor del flujo (m), ρ la densidad del flujo (kg/m³), g la aceleración de gravedad (m/s²), β pendiente del flujo (°), μ la viscosidad del flujo (Pa*s) y h_c es la altura crítica (m). Este último es equivalente a (Hulme 1974; Dragoni et al. 1986):

$$h_c = \frac{\tau_0}{\rho \cdot g \cdot \sin(\beta)} \quad (3.20)$$

con τ_0 el *yield strength*.

Esta altura crítica representa la potencia mínima del flujo necesaria para que la colada continúe avanzando. En el caso de que el *yield strength* crezca de tal modo que la altura del flujo sea menor que la altura crítica, entonces la colada se detendrá.

3.2.3.3. Caso Herschel-Bulkley

La velocidad se calcula con la siguiente ecuación:

$$\vec{v} = \frac{H^2 \cdot \rho \cdot g \cdot \sin(\beta)}{3K} \cdot \left(\frac{3n}{H^3 \cdot (n+1)} \left(\frac{\rho \cdot g \cdot \sin(\beta)}{K}\right)^{\frac{(1-n)}{n}}\right) \cdot \left(H \cdot (H - h_c)^{\frac{n+1}{n}} - \frac{n}{2n+1} (H - h_c)^{\frac{2n+1}{n}}\right) \quad (3.21)$$

con H el espesor del flujo (m), ρ la densidad del flujo (kg/m³), g la aceleración de gravedad (m/s²), β pendiente del flujo (°), K la consistencia del flujo (Pa · s), h_c es la altura crítica (m).

3.2.3.4. Caso del yield strength del interior de la lava

En este caso se consideró que la fuerza impulsora apenas supera el *yield strength*. Aca la fuerza retardante actúa en toda la colada y es equivalente a:

$$F_R \sim \tau_y \cdot L \cdot W \quad (3.22)$$

Igualando la F_d con F_R y con $V \sim LWH$ se puede obtener el largo de la colada con la siguiente ecuación:

$$L = C_2 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{V_i \cdot \rho \cdot g \cdot \sin(\beta_i)}{\tau_{yi} \cdot W_i} \quad (3.23)$$

con C_2 una constante.

3.2.3.5. Caso del yield strength en una corteza en crecimiento

En este caso, el flujo se va deteniendo debido al *yield strength* de una corteza que se va formando en la parte superior de un flujo a medida que va avanzando, causado por el enfriamiento conductivo. El espesor de la corteza (δ) que se va generando, está dado por:

$$\delta \sim \sqrt{k \cdot t} \quad (3.24)$$

con t el tiempo y k la difusividad termal de la lava que equivale a $10^{-6} m^2/s$ (Pinkerton y Sparks 1976; Kerr y Lyman 2007).

Si se asume que la fuerza de retardo del caso del *yield strength* de la corteza es mucho mayor que la fuerza de retardo del caso de la reología interna; que la conductividad termal es significativo tanto en la base como en la superficie de la colada; y que la densidad es similar en todo el flujo (tanto en la corteza como en el interior), entonces, la fuerza de retardo está dada por:

$$F_R \sim \tau_c \cdot \frac{\delta}{H} \cdot L \cdot W \quad (3.25)$$

con τ_c el *yield strength* de la corteza.

Por último, igualando la fuerza impulsora con la fuerza de retardo se obtiene que la posición del frente del flujo está dado por:

$$L = C_3 \cdot \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{V_i^2 \cdot \rho \cdot g \cdot \text{sen}(\beta_i)}{\tau_{ci} \cdot W_i^2 \cdot \sqrt{k \cdot t}}} \quad (3.26)$$

con C_3 una constante y τ_{ci} el *yield strength* en la corteza.

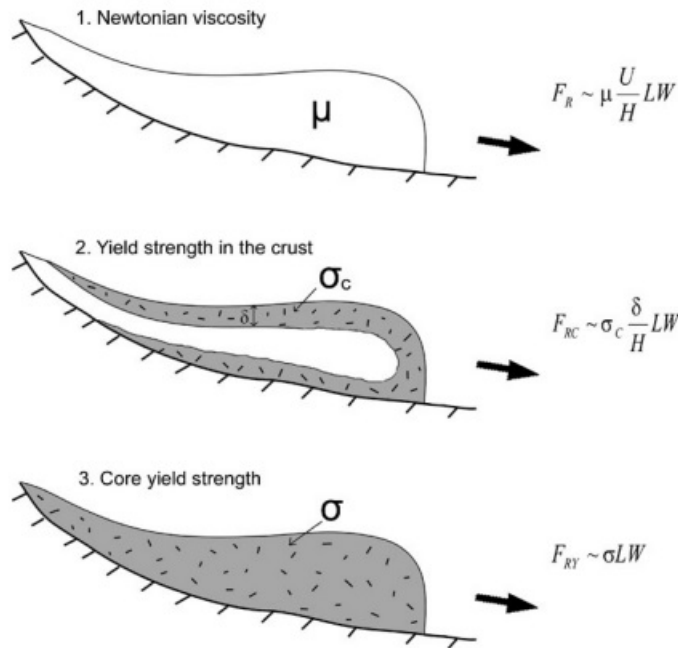


Figura 3.2: Esquema de los distintos regímenes dinámicos que pueden enfrentar los flujos de lavas en función de las fuerzas impulsoras. (a) Caso newtoniano, (b) Caso *yield strength* en la Corteza, (c) Caso *yield strength* del interior de la lava. En cada caso, se muestran también sus respectivas fuerzas de retardo (Castruccio, 2013).

3.3. Características físicas de las coladas de lava.

3.3.1. Criterios descriptivos

3.3.1.1. Tipos de lavas

Según Macdonald (1953), se distinguen 3 tipos de lavas de acuerdo a sus morfologías: las tipo A'a, las pahoehoe y las de bloques. Las lavas A'a se caracterizan por tener una superficie fragmentada y espinosa con vesículas irregulares. Por su lado, las pahoehoe se distinguen por sus superficies lisas, onduladas y viscosas, con la posible presencia de vesículas esferoidales; mientras que las lavas de tipo bloque se diferencian de las A'a ya que sus espesores son mayores y presentan bloques con formas más regulares (bloques poliédricos) y superficies menos espinosas, es decir, más lisas, delimitados por ángulos diédricos.

Harris y Rowland (2015) caracterizan las lavas tipo A'a por tener una superficie auto-brechada y costras basales, y un interior coherente que generalmente se denomina núcleo. Además, destacan que estas lavas tienen un espesor de 0,5 a 20 m; mientras que las pahoehoe las caracterizan por tener una superficie lisa, vidriosa y a veces con pliegues superficiales. Por otra parte, diferencian las lavas en bloque de las tipo A'a debido a que las primeras son mucho más gruesas, alcanzando de decenas hasta cientos de metros de espesor, además de que presentan estructuras plegadas internas que se expresan superficialmente como ojivas.

3.3.1.2. Zonas de un flujo

Por otro lado, las coladas de lavas se pueden clasificar según ciertas características morfológicas que presentan. Lipman y Banks (1987) definieron, a lo largo, las coladas de lavas de tipo A'a en 4 zonas distintas, sin importar la longitud y el tipo de flujo (fig. 3.3).

1. Flow toe: Corresponde al frente del flujo, zona donde la velocidad del flujo es similar tanto en el centro como en los bordes.
2. Zona de dispersión del flujo: Consiste en la zona detrás del frente del flujo, en donde algunos sectores de la lava comienzan a desacelerarse en relación con otras partes. No posee canalización ni levées
3. Zona transicional: Esta zona está marcada por una corriente central que fluye más rápido, mientras que al borde de la corriente central la lava comienza a estancarse y se comienzan a formar los levées.
4. Zona de canal estable: En esta zona, los levées se han estancado por completo y el material es transportado eficientemente a través de un canal central, el cual se caracteriza por ser muy desarrollado y marcado.

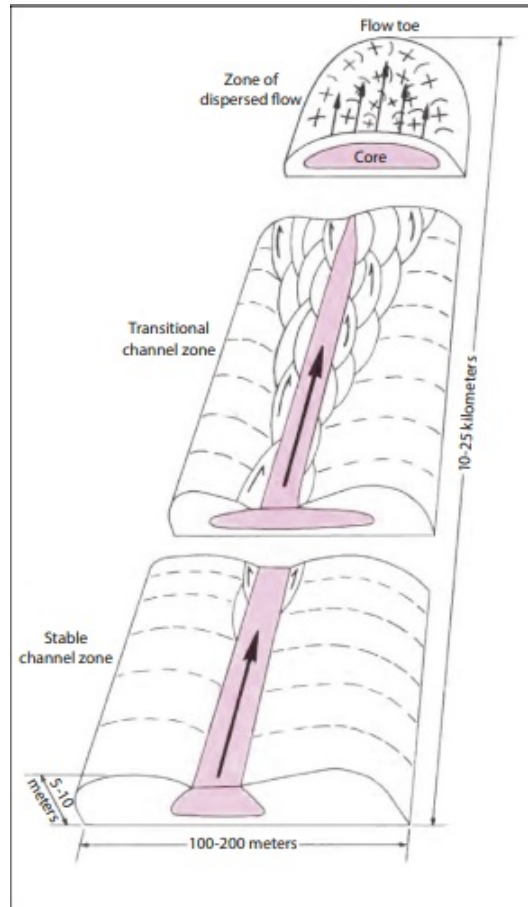


Figura 3.3: Zonas de una colada a lo largo (Lipman y Banks, 1987).

Mientras que Borgia et al. (1983) definen lateralmente las coladas en dos unidades, como se muestra en la figura 3.4, el canal central que corresponde a la zona entre los dos levées y se caracteriza por tener una superficie curva. Se desarrollan debido a que los márgenes de la lava se enfrían más rápido y se mueven más despacio que el centro. Los levées consisten en los límites laterales del flujo y a menudo se forman temprano en la vida de un flujo de lava, extendiéndose casi a lo largo del sistema de flujo. La posición y el espesor de los levées representa el ancho y alto de la colada al momento que el frente del flujo paso por ahí, motivo por el cual se consideran las zonas que representan de mejor manera la composición del material inicial.

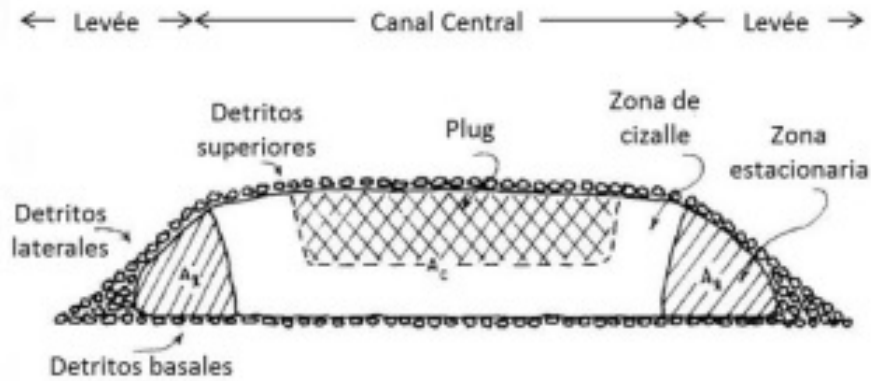


Figura 3.4: Zonas de una colada lateralmente (Borgia et al.,1983).

Según Walker (1972), los flujos de lava también se pueden clasificar en simples o compuestos. Los flujos de lava simples son aquellos que no son divisibles en unidades de flujo y se forman cuando la tasa eruptiva es alta, produciendo flujos extensos; mientras que los flujos de lava compuestos hacen referencia a los que son divisibles en varias unidades de flujo y se forman cuando la tasa eruptiva es baja.

3.3.1.3. Levées

Los levées se clasifican en 4 tipos (Sparks et al., 1976) (fig. 3.5).

1. Levées iniciales: Consiste en lava estacionaria ubicada a cada lado del flujo y justo detrás de un frente de flujo que avanza. Es el primero que se forma y ocurre cuando el flujo de lava pasa por sobre el terreno. Este tipo de levée es el que define el ancho del flujo, la máxima altura que este alcanza y también la reología que tiene.
2. Levées rubble: Corresponden a un levée inicial que comprende una brecha del frente de flujo que ha sido empujada al borde debido a la corriente axial. Se caracterizan por sus taludes con detritos de lava rugosa.
3. Levées de desbordamiento: Consiste en lava que desborda el canal construyendo unidades sobre los levées existentes, aumentando tanto su altura como su anchura. Estos levées ocurren como respuesta a dos procesos. Primero, a tasas de efusión fluctuantes que dan como resultado un desbordamiento repetido y, en segundo lugar, a que el nivel de la lava va aumentando generando desbordamientos repetidos.
4. Levées de acreción: Se generarán cercanos al centro efusivo debido a que los clinker se adhieren a las paredes del levée y se van acumulando formando estos levées de acreción. Se caracterizan por sus altas pendientes en los taludes y por que sus texturas muestran elongación de los clastos de forma paralela al flujo.

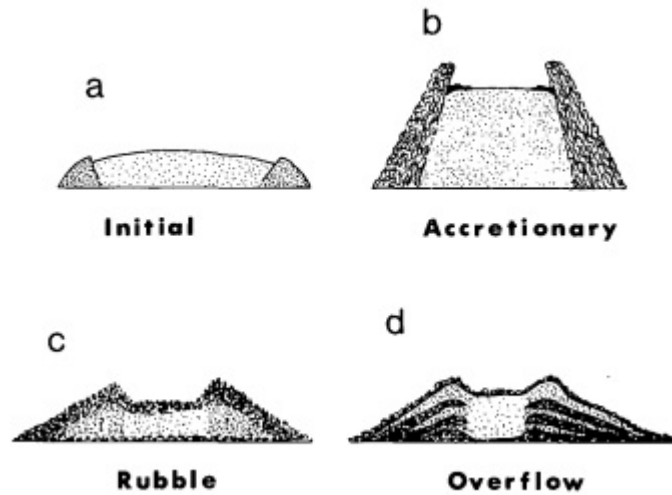


Figura 3.5: Tipos de levées. (a) Levée inicial, (b) Levée de acreción, (c) Levée tipo rubble, (d) Levée de desbordamiento (Sparks et al., 1976).

3.3.1.4. Comportamiento de los flujos

Guest et al. (1987), indican que la extensión de las coladas puede estar influenciada por dos comportamientos: las coladas limitadas por el enfriamiento en donde, la pérdida de calor impide que la lava continúe fluyendo -a pesar de que siga extruyendo lava desde la fuente- y las coladas limitadas por volumen, que corresponden a las que se detienen debido a que no hay más extrusión de lava.

Hulme y Fielder (1977) proponen que el enfriamiento de las coladas de lava se debe a la pérdida de calor por radiación al ambiente, el cual se encuentra a una menor temperatura, motivo por el cual la lava se va enfriando desde su corteza hacia el núcleo, hasta que llega un momento en donde se enfría por completo impidiendo que la colada siga avanzando. Esto se puede modelar con el número de Graetz, que es un número adimensional que cuantifica las tasas relativas de advección y enfriamiento conductivo y se calcula de la siguiente manera (Hulme y Fielder, 1977):

$$Gz = \frac{Q}{k \cdot d} \cdot \frac{H}{w} \quad (3.27)$$

donde Q es la tasa eruptiva, k la difusividad térmica, d es la distancia a la fuente, H es el espesor de la colada y w el ancho de la colada. Según Hulme y Fielder (1977) cuando el número de Graetz alcanza valores cercanos a los 300, las coladas de lavas se detienen, esto siempre y cuando las coladas estén limitadas por el enfriamiento y no por el volumen.

3.4. Volcán Parinacota

3.4.1. Trabajos anteriores

3.4.1.1. Composición

La composición del material emitido por el volcán Parinacota, a lo largo de su historia pre-colapso, ha ido variando desde 57.3-68.5 % de SiO₂. Tras el colapso del edificio volcánico ancestral, la composición de los magmas varió desde andesitas basálticas (53,32 % SiO₂) hasta dacitas (63.8 % SiO₂) (Wörner et al., 1988; Hora et al., 2007). Los flujos de lava Ajata (a1, a2, a3 y a4) no poseen las mismas composiciones químicas entre sí, pero se destacan por ser las lavas más máficas del volcán, variando entre 53-58 % de SiO₂ (Wörner et al., 1988; Clavero et al., 2004; Hora et al., 2007). Según Wörner et al. (1988), los flujos de Ajata más antiguos corresponden a flujos de composición andesita máfica con fenocristales de plagioclasa, mientras que los flujos más jóvenes corresponden a andesitas basálticas ricas en olivino (5-10 % en volumen) con la presencia de clinopiroxenos y carencia de plagioclasas.

En la tabla 3.1 se puede observar la composición química de los flujos de Ajata a3 y a4 que fueron determinadas por Hora et al. (2007) y por Ginibre y Wörner (2007) y corresponden a:

Tabla 3.1: Composición química de cada colada de acuerdo a Hora et al. (2007) y a Ginibre y Wörner (2007).

wt %	Hora et al. (2007)		Ginibre y Wörner (2007)	
	a3	a4	a3	a4
SiO ₂	53.32	58.70	54.04	58.93
TiO ₂	1.63	1.26	1.62	1.28
Al ₂ O ₃	15.9	16.40	16.06	16.23
Fe ₂ O ₃	8.69	6.77	8.59	2.93
MnO	0.11	0.09	0.00	3.56
MgO	5.03	3.18	0.11	0.09
CaO	7.52	5.47	4.79	3.27
Na ₂ O	4.28	4.30	7.58	5.57
K ₂ O	2.49	2.86	2.63	2.83
P ₂ O ₅	0.77	0.46	0.76	0.46
Total	99.73	99.48	100.43	99.52

Con lo que, de acuerdo al diagrama TAS, la colada a3 corresponde a una Traquiandesita basáltica y la a4 corresponde a una Traquiandesita (fig. 3.6).

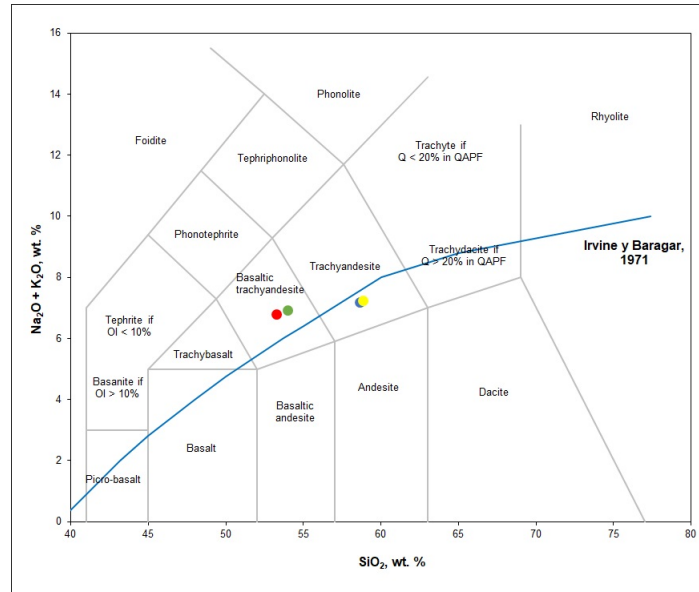


Figura 3.6: Diagrama TAS. El círculo de color rojo corresponde a una muestra del flujo a3 y el círculo de color azul se trata del flujo a4 según Hora et al. (2007), mientras que el círculo de color verde corresponde a una muestra de flujo a3 y el de color amarillo corresponde a la colada a4 de acuerdo a Ginibre y Wörner (2007).

3.4.1.2. Análisis petrográfico

Ginibre y Wörner (2007) indicaron que la lava perteneciente a la colada de Ajata inferior son andesitas basálticas con 2% de fenocristales compuestos de olivino subhedrales, a menudo con pequeñas inclusiones de espinela, microfenocristales de augita, titanomagnetita y plagioclasa, y también posee trazas de hornblenda altamente oxidada. Mientras que el Ajata superior consiste en andesitas basálticas y posee una mineralogía de abundantes plagioclasas reabsorbidas internamente, abundantes piroxenos, hornblenda oxidada, olivino, apatito y óxidos de Ti-Fe.

Además, a través de imágenes SEM, Ginibre y Wörn (2007) describieron la zonificación de las plagioclasas del Ajata superior. Indicaron que el rango de contenido de An es entre $An_{39} - An_{58}$. La mayoría de los cristales poseen núcleos (An_{42} a An_{56}) que se encuentran rodeados por zonas parcheadas redondeadas de 50 a 200 μm (An_{39} a An_{55}) que poseen inclusiones de masa fundida cristalizada.

Por otro lado, según la descripción de muestras realizada por Banaszak (2014), la colada a3 es vesicular y contiene fenocristales de olivino, anfíboles, clinopiroxeno y óxidos de Fe-Ti; microfenocristales de plagioclasa, anfíboles y olivino; y microlitos de plagioclasas. Las plagioclasas poseen numerosas zonas de reabsorción, mientras que los anfíboles, por su lado, se caracterizan por sus bordes oxidados. A muestra de mano las rocas poseen una textura porfídica mientras que en microscopio se logra distinguir texturas glomeroporfídicas constituidas por cristales de piroxenos, plagioclasas y óxidos de Fe-Ti. Entre tanto, las muestras descritas de la colada a4 contienen plagioclasa, clinopiroxeno, ortopiroxeno y óxidos de Fe-Ti. Además, se caracteriza por poseer una textura seriada a muestra de mano y glomeroporfídica al microscopio.

Capítulo 4

Metodología

La metodología principal utilizada en este trabajo consistió en la fotogrametría 2D, en donde utilizando un dron se tomaron fotos de las lavas y luego a través del programa Agisoft Metashape se creó un DEM de alta resolución, con el cual se trabajó para obtener las dimensiones de las coladas.

El dron con el que se trabajó es el *Phantom 4 RTK*, el cual se caracteriza por ser un equipo compacto, muy ligero (1,4 kg) y de alta precisión (centimétrica), pues captura fotografías mientras se encuentra en movimiento, sin el riesgo de que ocurra un desenfoque. Los datos de imagen capturados son con un sensor CMOS de 1 pulgada y 20 megapíxeles, un obturador mecánico que mejora la captura de objetos en movimiento y un lente gran angular optimizado con una distancia focal de 8.8 mm. Su capacidad de operación es hasta los 6000 m.s.n.m, permitiendo su uso en distintas zonas, incluso en aquellas de difícil acceso (Geocom, s. f.).

Está compuesto por un control remoto con pantalla integrada y la aplicación DJI GS RTK, los cuales brindan un control optimizado para misiones topográficas. DJI GS RTK permite diversos modos de aplicación, que incluyen fotogrametría 2D y 3D, vuelos de waypoint, entre otros. También se pueden importar archivos KML/KMZ para optimizar el flujo de trabajo de sus misiones (Geocom, s. f.).

Además, el Phantom 4 RTK incluye una estación móvil D-RTK 2 que es un método sencillo para recopilar datos, pues proporciona datos diferenciales en tiempo real al dron y forma una solución topográfica precisa, o adquiere las coordenadas de ubicación precisas, a nivel de centímetros. Asimismo, ofrece seguridad de vuelo mejorada y también puede guardar información de observación por satélite para posprocesamiento cinemático (PPK) (Geocom, s. f.).

4.1. Etapa de pre-terreno

Se hizo una revisión bibliográfica de la zona de estudio para entender el contexto geológico del lugar al cual se fue a trabajar, así como de la historia eruptiva del volcán Parinacota con sus estilos eruptivos, la composición química que poseen sus flujos de lava, riesgos y peligros geológicos, existencia o ausencia de erupciones históricas.

Se adquirieron imágenes satelitales del área de estudio, de las páginas *earthexplorer.usgs.gov/* y *search.earthdata.nasa.gov/search*, que fueron procesadas en el programa QGis para tener una mejor visualización digital de las lavas Ajata inferior y Ajata superior, obtener las redes hidrográficas, las cuencas de drenaje, las curvas de nivel y así poder preparar rutas para el momento de ir a terreno.

Se realizó una introducción del funcionamiento del dron para su utilización en terreno. Luego, a través del programa QGis se construyeron polígonos que encierran los flujos de lava, intentando que fueran lo más regular posibles (cuadrados, rectángulos), con la finalidad de ingresarlos al dron y que estos polígonos fueran las rutas más óptimas en tiempo a realizar por el dron. Tales archivos fueron guardados en formato .kml ya que es el formato que reconoce el dron.

4.2. Etapa de terreno

Se realizaron dos salidas a terreno, la primera del 13 al 18 de junio de 2022 y la segunda del 17 al 22 de octubre de 2022.

4.2.1. Vuelo del dron

A través de las rutas mapeadas en el trabajo pre-terreno se estableció la base de operaciones del dron a un costado de los flujos para poder volar el dron de manera eficiente, invirtiendo el menor tiempo en los vuelos para poder optimizar el uso de las baterías y así captar las imágenes aéreas requeridas para el proyecto. Para esto, se necesitó ir a diferentes puntos a lo largo de los flujos.

Un punto relevante para la realización del vuelo del dron es que la información sea georeferenciada. Para esto se utiliza el RTK. Tanto el dron como el RTK requieren ser instalados en una superficie plana para que su despegue y aterrizaje no se vea afectado por desniveles (fig. 4.1 y 4.2). Idealmente el RTK debe ser instalado lo más elevado posible. Luego, tanto el RTK como el dron se conectaron al control de mando. Una vez conectado se exportó el polígono a realizar la ruta y se generó un plan de vuelo entre 300 y 350 m de altitud con una fotogrametría 2D a una velocidad de 10 m/s de lo que se obtuvo una resolución de 9,59 cm/píxel



Figura 4.1: Instalación del dron.



Figura 4.2: Instalación del RTK.

4.2.2. Toma de muestras

Se tomaron muestras de las lavas, principalmente de las zonas de los levées debido a que es en estas zonas donde se representa la estimación más confiable de τ_y para el modelado del

avance del flujo y también refleja, de mejor manera, el comportamiento del flujo de lava en el momento en que iba fluyendo (Castruccio et al., 2014). Las muestras fueron descritas con el objetivo de estimar el contenido de cristales y describir las vesículas y la mineralogía que presentan, ya que son parámetros necesarios para estimar la reología (viscosidad y densidad) de la lava.

También se tomaron muestras de domos y de otras lavas, tres de la colada Ajata inferior más antigua (a2) y otras dos perteneciente al antiguo cono (ocb), con la finalidad de poder compararlas con las lavas que se estudian.

4.3. Etapa de post-terreno

4.3.1. Construcción de DEM

Se construyó el DEM con las imágenes que fueron entregadas por los vuelos del dron, con la finalidad de determinar las dimensiones (ancho y espesor) del flujo, la pendiente a través de la cual fluyó y también se utilizó para hacer fotointerpretación de las morfologías que presentan los flujos (levées, espinas, ojivas, entre otras).

El software que se utilizó para la construcción del DEM es el Agisoft Metashape. Este realiza el procesamiento fotogramétrico de imágenes digitales y genera datos espaciales en 3D para usarlos en aplicaciones GIS.

Para la creación del DEM se requiere tener una carpeta con todas las imágenes tomadas por el dron en su recorrido y un archivo de texto con las bases de referencias llamadas puntos de control que poseen la nomenclatura - la coordenada X y la coordenada Y en UTM y la coordenada z que representa la altitud- y sirven para georeferenciar. Luego se insertan todas las imágenes al programa y se les coloca el mismo sistema de coordenadas que se tiene el archivo txt, que se importará posteriormente. Después hay que orientar las fotos para que haga una especie de “montaje” superponiéndolas. Una vez terminado el proceso se genera una nube de puntos. A continuación, cada base de control se debe orientar en las imágenes que aparezcan para así poder hacer la elevación de la nube de puntos y generar una nube de puntos densa. Posteriormente se crea la malla para transformar la nube de puntos densa en una superficie sólida. Por último, se construye la ortofoto en coordenadas para importarla en QGis.

Capítulo 5

Resultados

5.1. Descripción morfológica de las coladas de lava

A continuación, en la figura 5.1, se mostrarán las dos coladas de lava estudiadas, Ajata superior (a4) y Ajata inferior (a3), describiendo sus principales características, las cuales se adquirieron de las dos campañas de terreno que se realizaron y también por datos que se obtuvieron del DEM construido con las imágenes aéreas captadas por el dron.

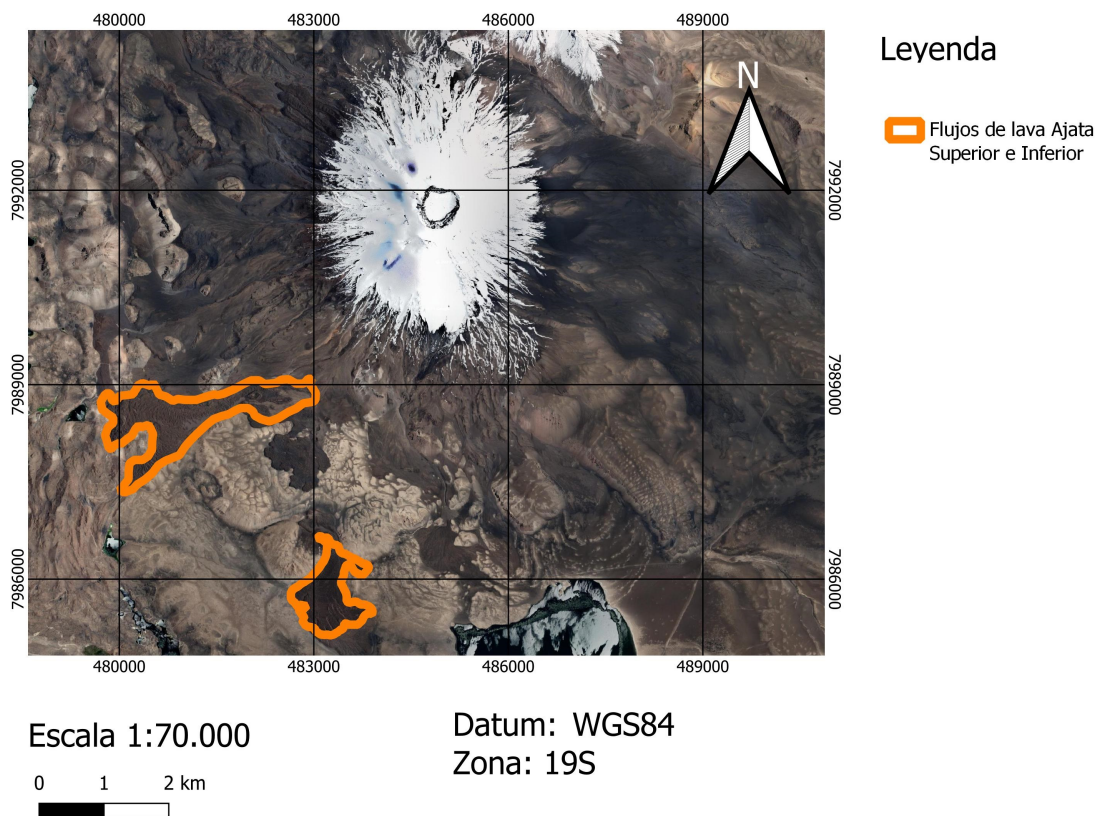


Figura 5.1: Se observan los flujos de Ajata inferior (a3) y Ajata superior (a4) en naranja.

5.1.1. Ajata inferior (a3)

La colada Ajata inferior se ubica en la ladera sur del volcán Parinacota, proviene de una fisura a 4843 m.s.n.m. y llega hasta los 4652 m.s.n.m.. Esta colada se ubica sobreyacente a otra colada de Ajata (a2) lo cual se puede visualizar en las figuras 5.2 y 5.3, en donde se observa el cambio de litología en el frente del flujo a3 y en algunos sectores del lado E a lo largo de la colada. Posee un largo de 1,651 km y un ancho que va aumentando pendiente abajo, principalmente en la zona de dispersión donde prácticamente duplica o triplica su ancho; su potencia también va variando a lo largo de la colada desde 8 m a 26 m pero, se observó que su relación de contacto con la base es con material no consolidado tamaño ceniza-lapilli, el cual cubre parte del flujo, motivo por el cual el espesor medido no es el real debido a que se desconoce el espesor que puede haber sido cubierto.

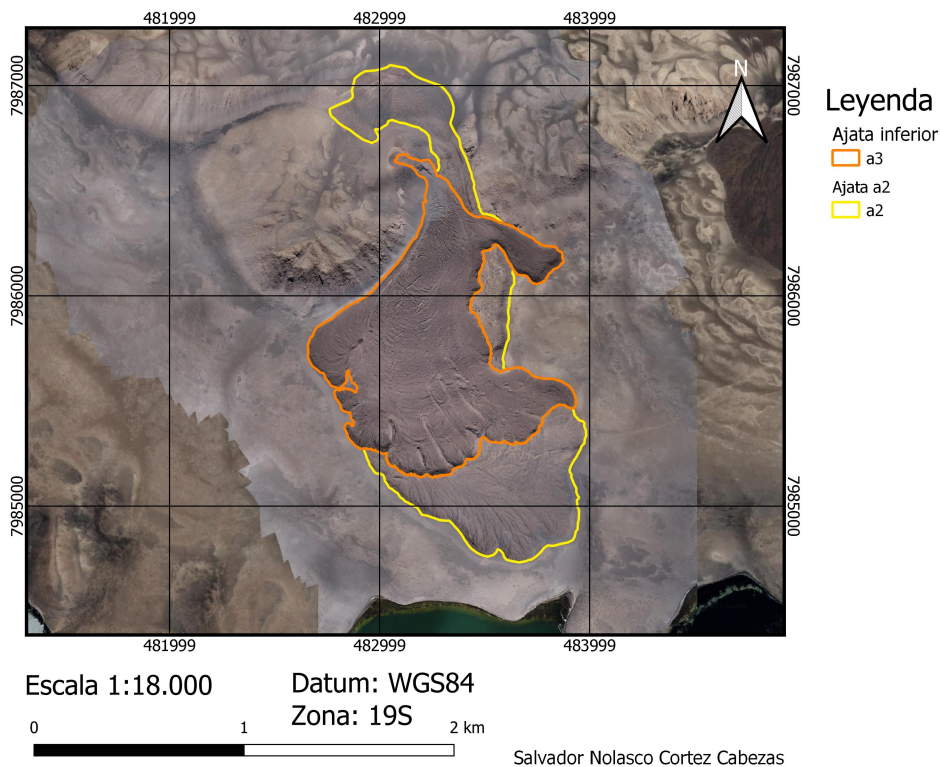


Figura 5.2: El polígono naranja corresponde al flujo Ajata inferior (a3). Se observa en el frente y el lado E del flujo que lo subyace la colada Ajata a2 que corresponde al polígono de color amarillo.

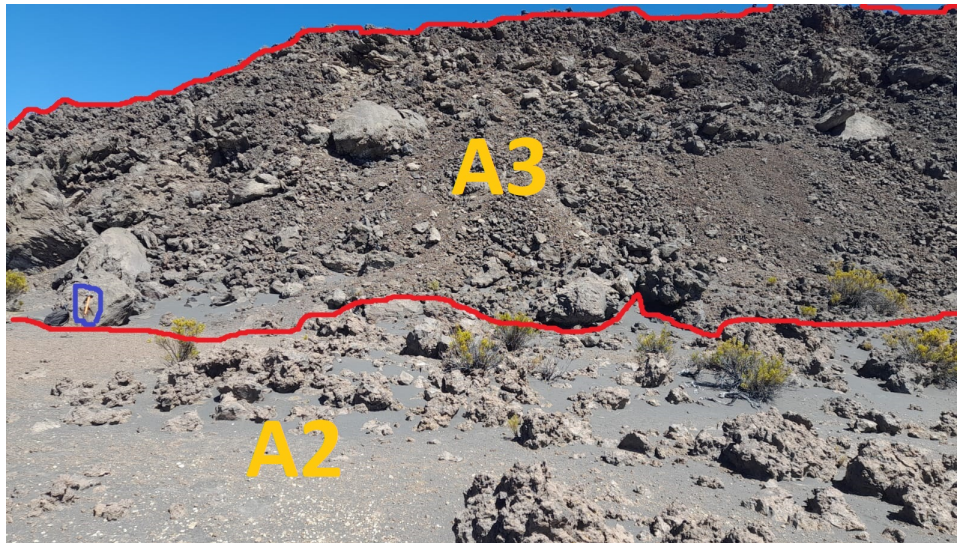


Figura 5.3: Flujo Ajata inferior a3 sobre a2. Lo encerrado en color rojo corresponde al flujo a3, que se encuentra sobre el flujo a2. Lo encerrado en color azul es un martillo que se utilizó de escala de 80 cm aproximadamente.

El flujo posee un “lóbulo” hacia el lado E, con un largo de 0.939 km, un ancho que disminuye hasta la zona media pero luego va aumentando hacia la zona de dispersión y una potencia de llega hasta los 24 m aproximadamente en el frente (fig. 5.4 y 5.5).



Figura 5.4: Foto tomada del frente del lóbulo del flujo Ajata inferior a3. Lo encerrado en color rojo corresponde a una persona de escala de 1.70 m.



Figura 5.5: Levée norte del lóbulo del flujo Ajata inferior. Lo encerrado en rojo corresponde a un martillo de 80 cm aproximadamente.

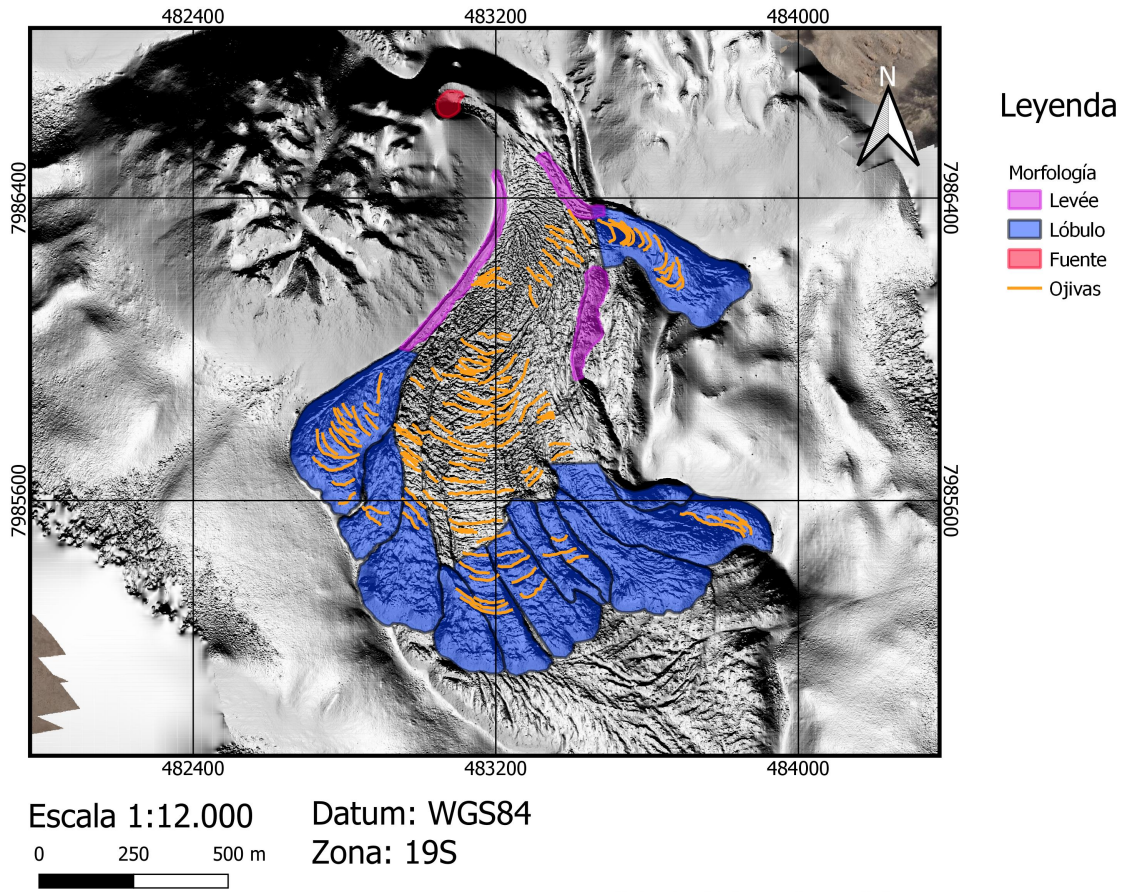
La pendiente de la superficie por la que fluyó la colada, se determinó con trigonometría, calculando la razón entre la diferencia de altitud en dos puntos distintos y la distancia entre estos, lo que entregaría el seno de la pendiente. Esto se aplicó a cuatro tramos a lo largo del flujo, la zona proximal (que abarcan los perfiles 13 y 12) con una pendiente de $14,5^\circ$, la zona media (perfiles 11, 10, 9, 8, 7, 6 y 5) con $3,2^\circ$, la zona de dispersión (perfiles 4, 3, 2 y 1) con $4,9^\circ$ y el lóbulo (perfiles 18, 17, 16, 15 y 14) con una pendiente de $8,1^\circ$.

La colada presenta bloques que varían de 10 cm a 7 m (fig. 5.6), los cuales poseen una superficie rugosa de 2-5 cm aproximadamente con un núcleo más macizo, lo que indica que la lava es del tipo A'a, pero también poseen forma angulosa y la presencia de ojivas, lo que es más característico de una lava de bloque (Harris y Rowland, 2015). Por lo tanto, se definió que la colada es una transición del tipo A'a a la de bloque.



Figura 5.6: Bloque de 5 m aproximadamente. Lo encerrado en color rojo corresponde a una libreta de 30 cm aproximadamente que se utilizó de escala.

A continuación, en las figuras 5.7 y 5.8, se presentan dos mapas, uno con las morfologías presentes en la colada y otro con las zonas del flujo definidas por Lipman y Banks (1987), ambas fueron identificadas por teledetección.



Salvador Nolasco Cortez Cabezas

Figura 5.7: Mapa de morfologías del Ajata inferior. Lo encerrado en rojo corresponde a la fuente de donde se extruyó la lava, las líneas de color naranja a ojivas, los polígonos de color morado a levées y los azules son lóbulos frontales.

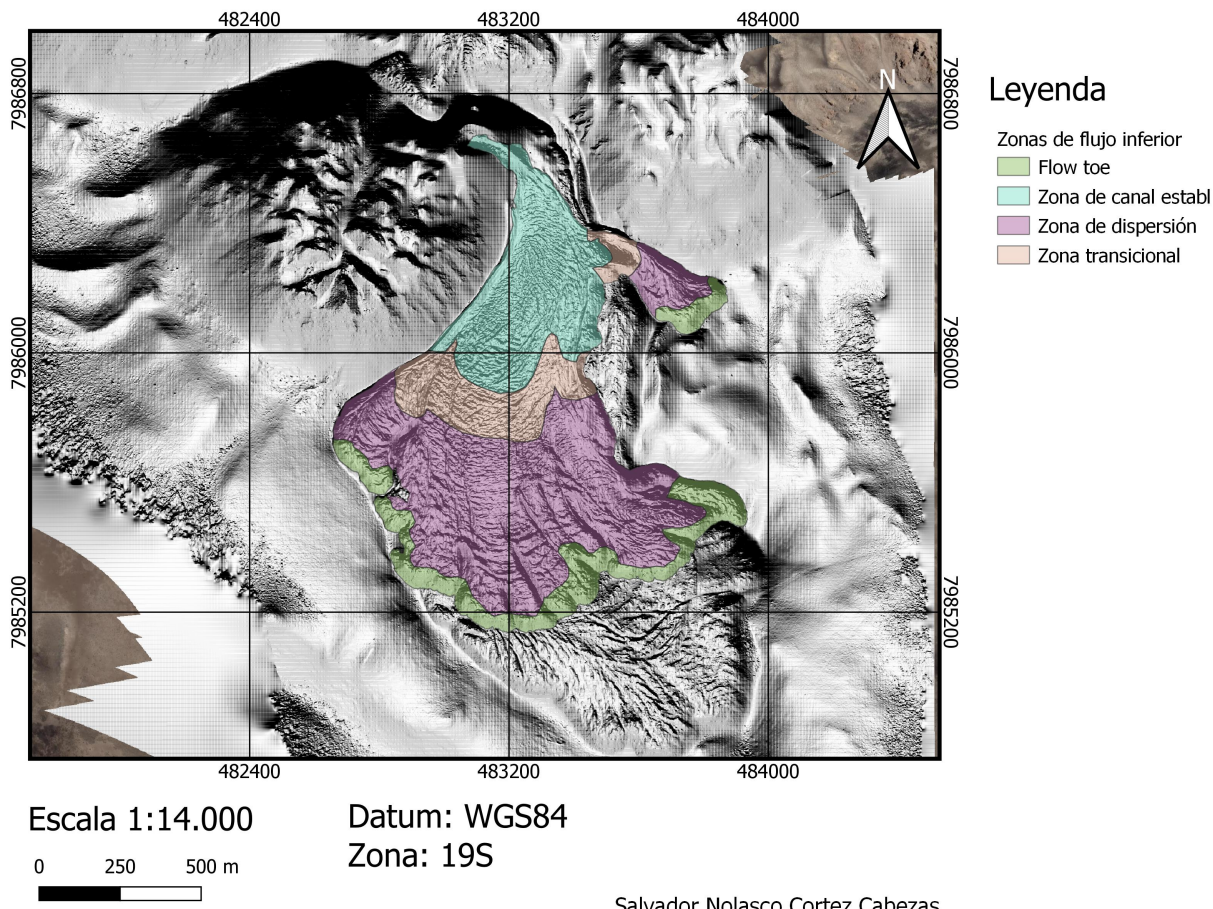


Figura 5.8: Mapa de las zonas del Ajata inferior. Los polígonos verdes corresponden al flow toe, los morados a la zona de dispersión, los café claros a la zona transicional y el celeste es la zona de canal estable.

Se puede observar que la mayor presencia de ojivas se encuentra en la zona de dispersión y en menor cantidad en la zona de canal estable. Estas morfologías son convexas hacia la dirección del flujo y tienen diferente longitud de onda (λ), dependiendo de la zona en la que se encuentren. En el frente poseen un λ promedio de 15 m, en la zona de dispersión de 27 m y en la de transición y canal estable disminuye a 17 m. Por otro lado, la altura que estas poseen es casi constante variando entre 1 y 3 m, con una leve tendencia a aumentar hacia el frente.

5.1.2. Ajata superior (a4)

La colada Ajata superior proviene de una fisura y también baja por el flanco sur del volcán pero desde una altitud de 4983 m.s.n.m y llega hasta 4580 m.s.n.m. Recorre una distancia de 3,917 km aproximadamente y su ancho va aumentando rápidamente en su origen de 368 m hasta 601 m en el inicio de la zona media donde disminuye bruscamente a 319 m debido a la presencia de un domo que la acuña; luego comienza aumentar hacia la zona de dispersión en donde se divide en dos debido a la presencia de hummocks formados en la avalancha, llegando a 758 m de ancho. Por su lado, el espesor también va variando a lo largo de la

colada desde 9 m en la zona proximal, aumentando a 15 m en la zona media y luego a 42 m en la zona frontal aproximadamente. Pero, de manera similar a la colada inferior, su relación de contacto con la base es con material no consolidado tamaño ceniza-lapilli, el cual cubre parte del flujo, motivo por el cual el espesor medido no es el real debido a que se desconoce el espesor que puede haber sido cubierto.

Se puede notar en la imagen sombreada que el sector norte de la colada fue posterior al sector sur, gracias a la presencia del levée sur del flujo, el cual se observa su continuación por sobre el flujo del sector sur (fig. 5.9).

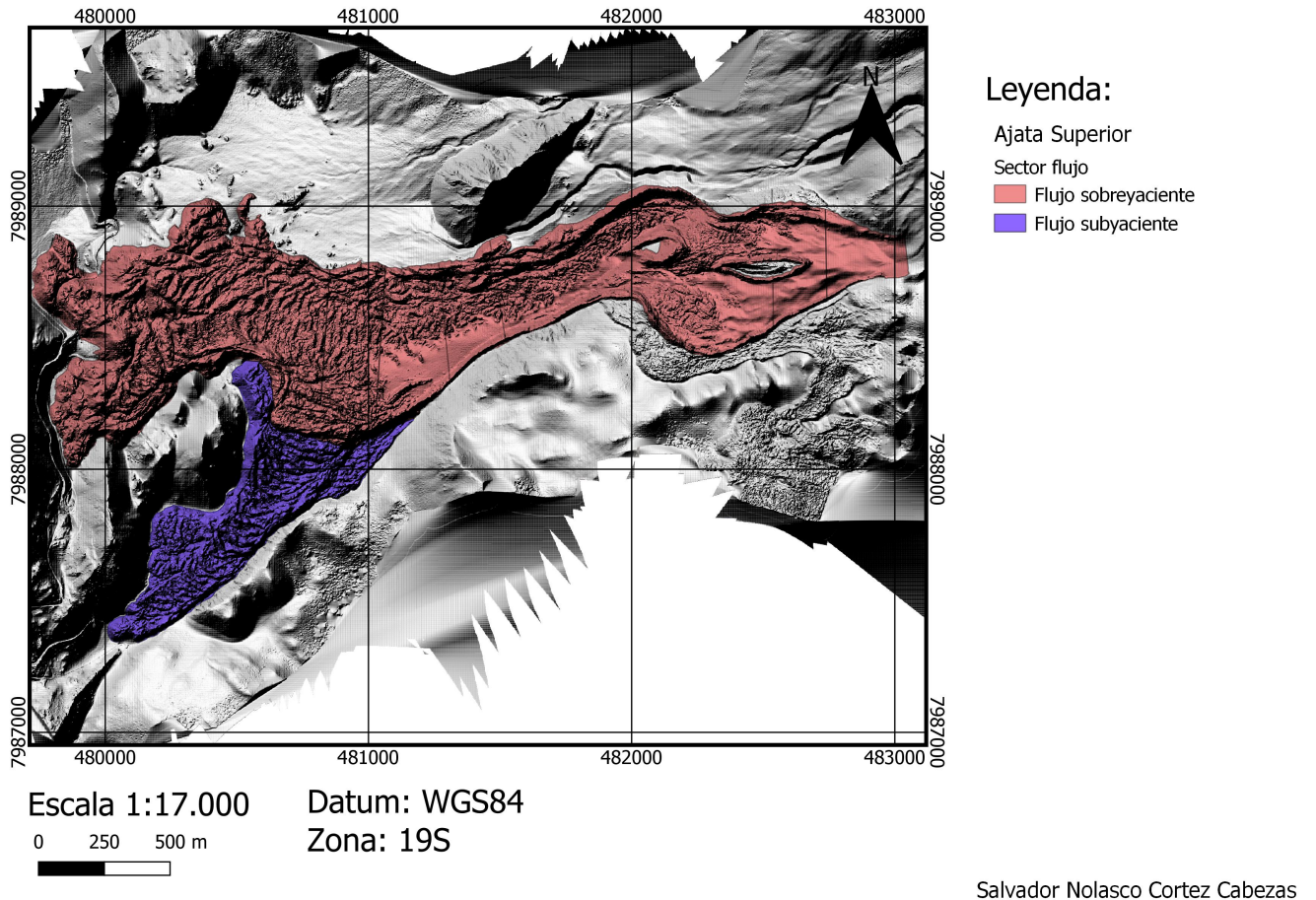


Figura 5.9: Mapa de los sectores de la colada Ajata superior. El polígono de color morado corresponde al flujo del sector sur de la colada que esta subyacente al polígono rojo que corresponde al flujo del sector norte

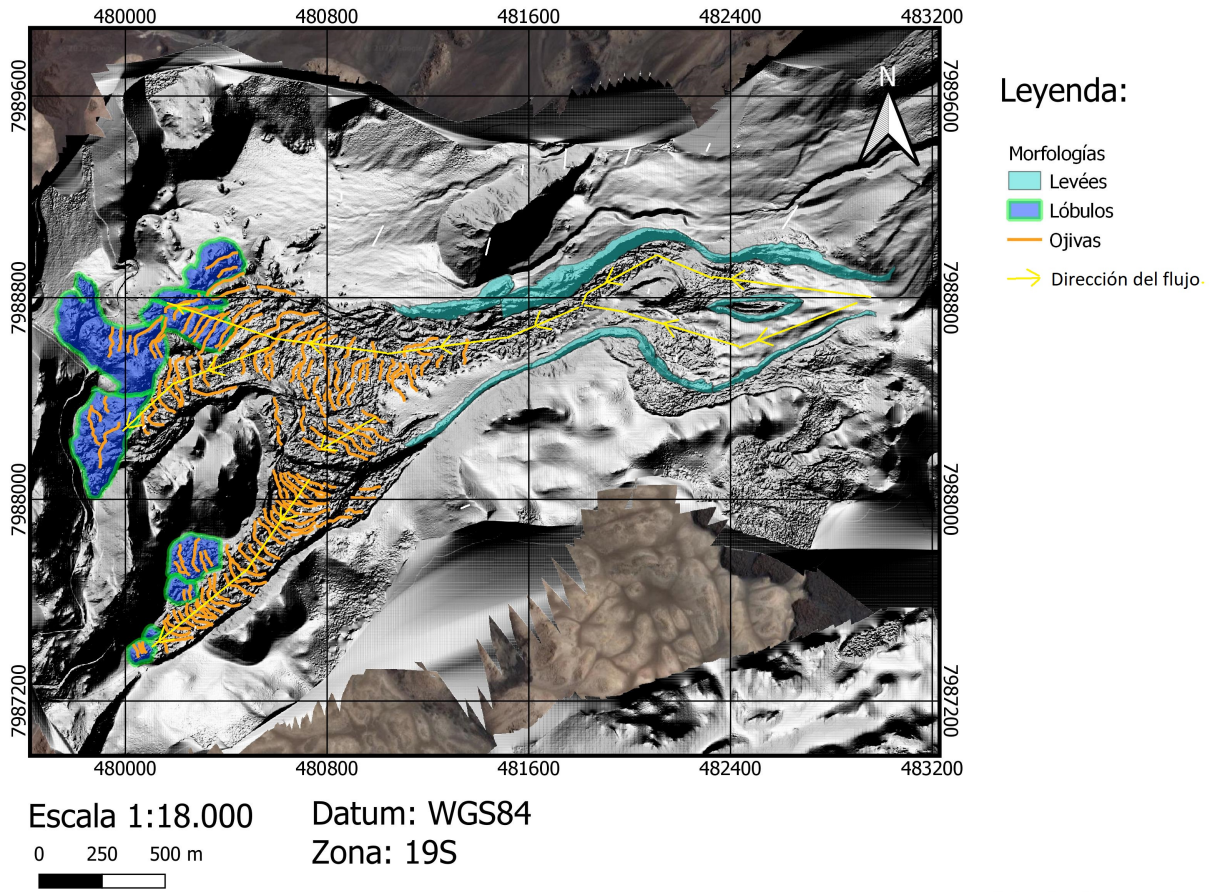
La pendiente de la superficie a través de la cual fluyó la colada, fue variando a lo largo de esta y se determinó de manera similar a la colada a3. Se aplicó en cuatro tramos, la zona proximal (que abarca los perfiles 17, 16, 15 y 14) con una pendiente de $9,3^\circ$, la zona media (perfiles 13, 12, 11, 10 y 9) con $6,7^\circ$ y dos en la zona de dispersión, uno en el sector norte (perfiles 8, 7, 6 y 5) y otro en el sector sur (perfiles 4, 3, 2 y 1), ambos con una pendiente de $4,3^\circ$.

Los bloques presentes en la colada varían en tamaño de 0.1 a 7 m. La colada presenta bloques más angulares con mayor fracturamiento, caras más lisas y poseen espesores altos, lo cual es característicos de las lavas de bloques pero también posee rugosidad en su superficie con un núcleo más masivo y liso (fig. 5.10), lo que es característicos de las lavas tipo A'a (Harris y Rowland, 2015; Macdonald, 1953). Es por eso, que de manera similar a la Ajata inferior, esta colada se considera una transición del tipo A'a a la de bloque.



Figura 5.10: Bloque de lava Ajata superior. Se observa la superficie rugosa de 2cm aproximadamente y un núcleo masivo. Se utiliza una libreta de 30 cm aproximadamente de escala.

A continuación, en las figuras 5.11 y 5.12, se presentan dos mapas, uno con las morfologías presentes en la colada y otro con las zonas del flujo definidas por Lipman y Banks (1987), ambas fueron identificadas por teledetección.



Salvador Nolasco Cortez Cabezas

Figura 5.11: Mapa de morfologías del Ajata superior. Las líneas de color naranjo corresponden a ojivas, lo encerrado en celeste a levées y lo azul son lóbulos frontales.

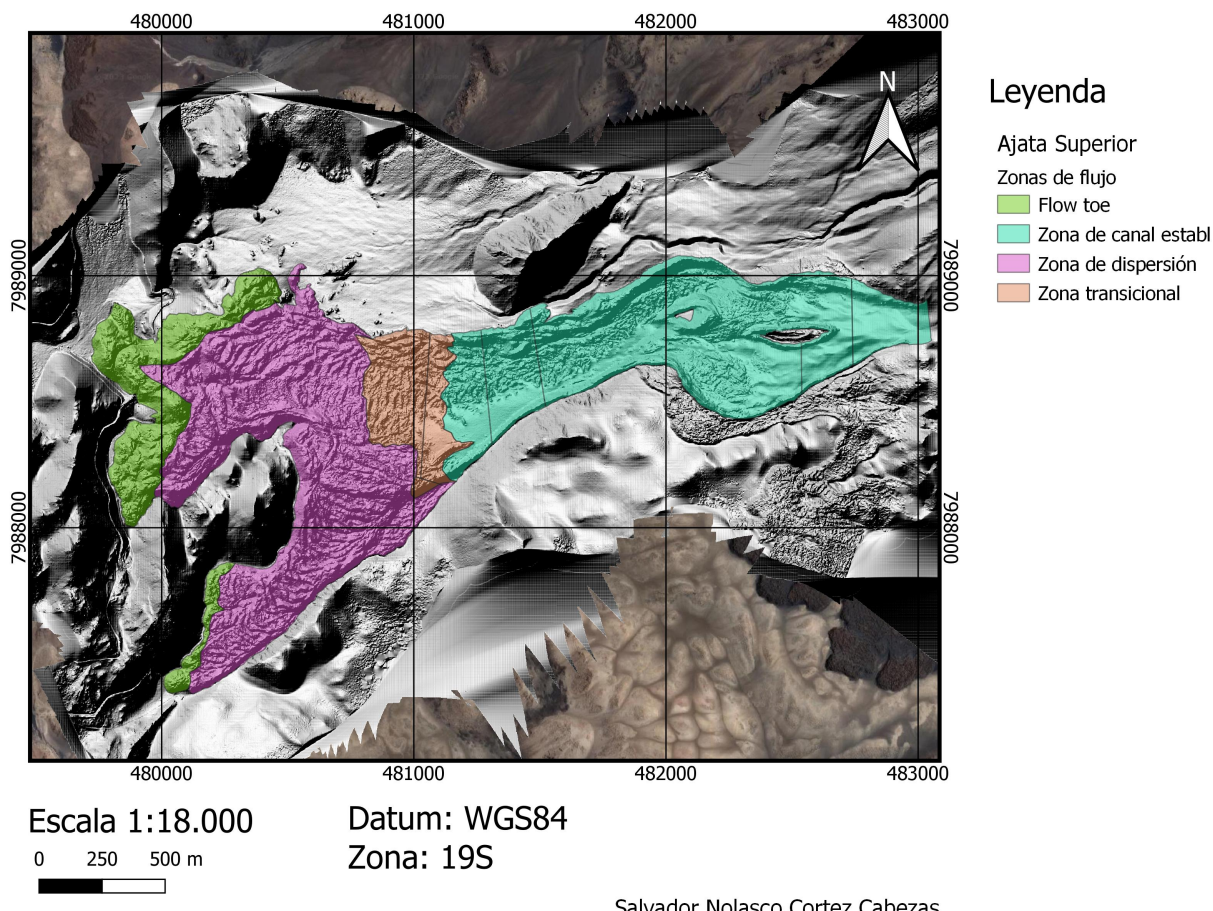


Figura 5.12: Mapa de las zonas del Ajata superior. Los polígonos verdes corresponden al flow toe, el morado a la zona de dispersión, el café claro a la zona transicional y el celeste es la zona de canal estable.

De manera similar que en la colada a3, las ojivas se encuentran mayoritariamente en la zona de dispersión con una menor cantidad de estas en la zona de canal estable. Pero, a diferencia de la colada anterior, la longitud de onda que estas presentan es similar tanto en el frente como en la zona de dispersión, transición y canal estable, con un λ de 27 m aproximadamente. Las alturas que estas poseen van aumentando de 4 m hasta 10 m desde la zona de canal estable a la de dispersión, pero, en el flow toe, estas disminuyen a 4 m aproximadamente.

5.2. Análisis petrográfico

Las muestras obtenidas en terreno fueron descritas con la finalidad de poder clasificarlas, complementando la descripción a muestra de mano con la descripción realizada por otros autores. En las figuras 5.13 y 5.14 se mostrarán los distintos lugares donde se tomaron las muestras en terreno y las tablas 5.1 y 5.2 indican las distancias de donde se tomaron las muestras a las fisuras de sus respectivas lavas.

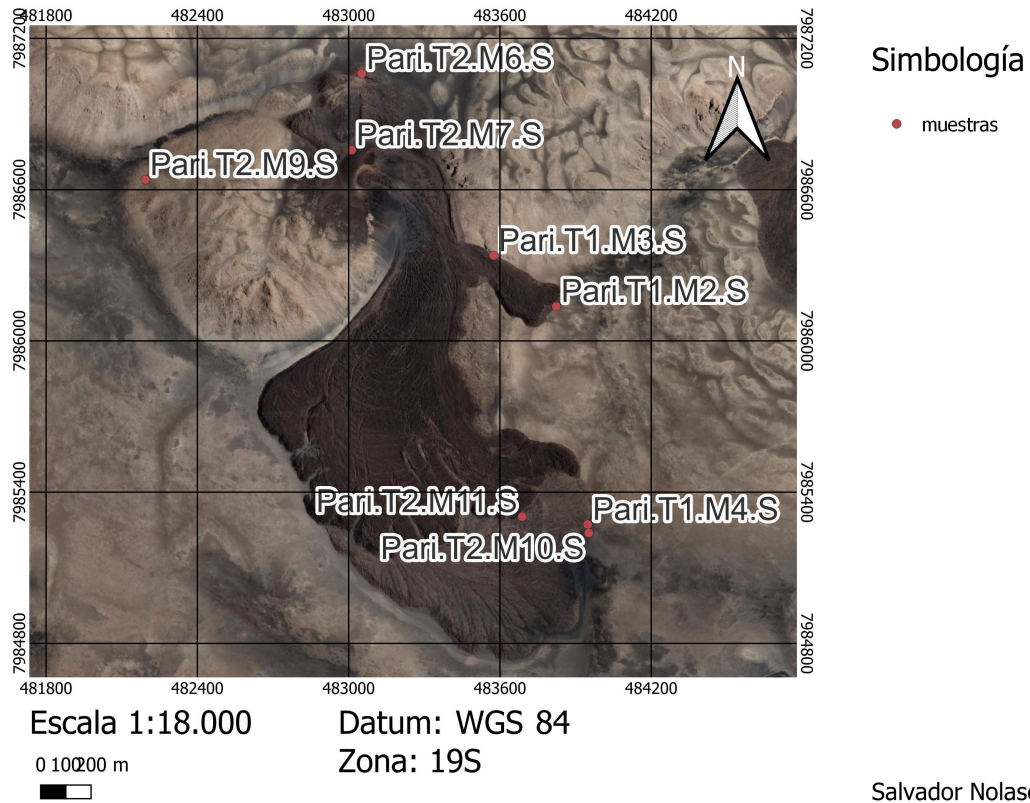


Figura 5.13: Muestra los sectores donde se tomaron las muestras en las lavas Ajata inferior (a3), domo y Ajata inferior (a2).

Tabla 5.1: Distancia desde la ubicación de las muestras hasta la fisura.

Muestra	Distancia de la fuente (m)
Pari.T1.M2.S	913
Pari.T1.M3.S	596
Pari.T2.M7.S	40
Pari.T2.M8.S	40
Pari.T2.M11.S	1483

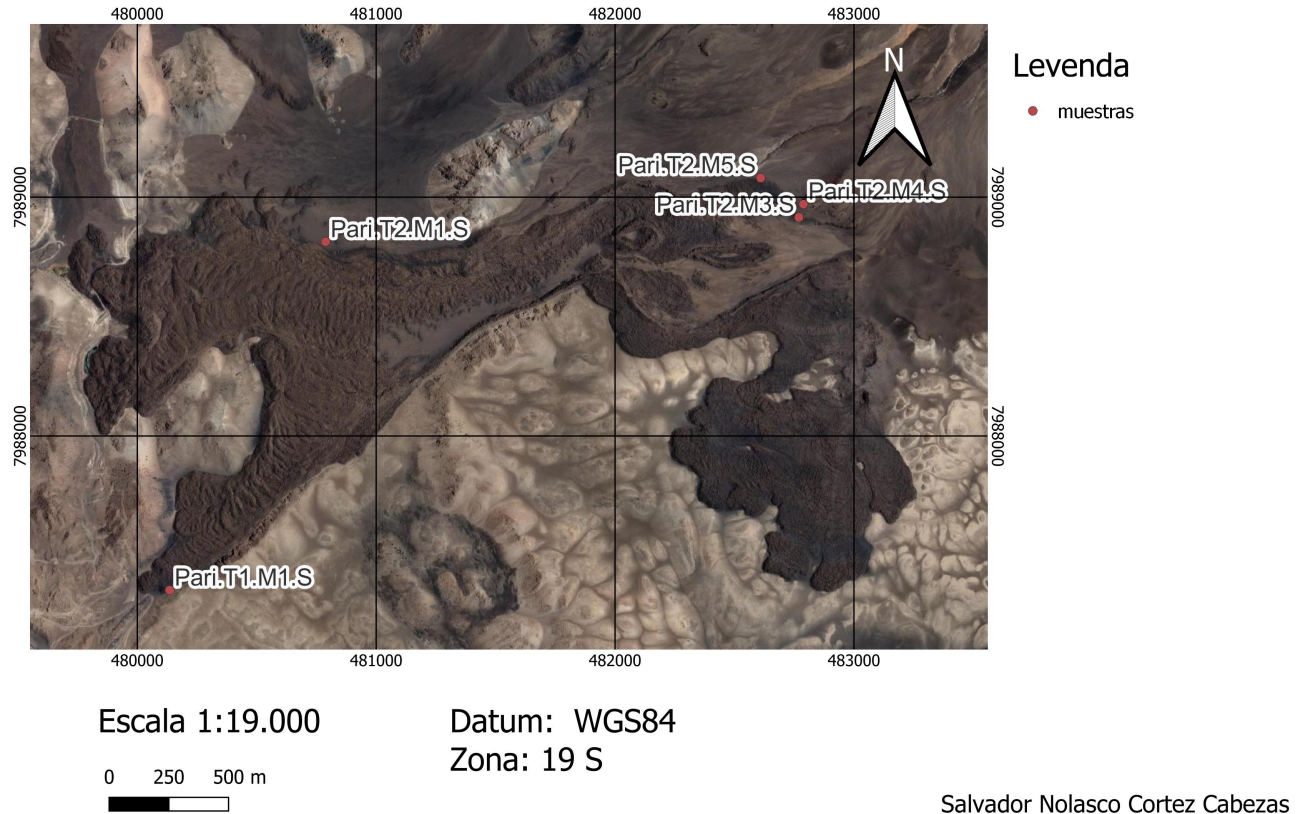


Figura 5.14: Muestra los sectores donde se tomaron las muestras en la lava Ajata superior (a4) y una muestra de un flujo subyacente al a4.

Tabla 5.2: Distancia desde la ubicación de las muestras hasta la fisura.

Muestra	Distancia de la fuente (m)
Pari.T1.M1.S	3327
Pari.T2.M1.S	2191
Pari.T2.M2.S	2251
Pari.T2.M3.S	271
Pari.T2.M4.S	218

5.2.1. Descripción a muestra de mano

De las muestras obtenidas en terreno se seleccionaron las menos afectadas por la meteorización para observarlas con mayor claridad y así describir el color, tamaño relativo de cristales, textura, tamaño de grano, estructuralidad de cristales, morfologías especiales, fábrica de la roca, su mineralogía, el contenido de cristales y de vesículas que posee, con la finalidad de clasificar la lava e identificar algunos factores que son relevantes para determinar algunas propiedades físicas de los flujos de lavas que sirven para obtener los parámetros eruptivos.

- Ajata inferior (a3)

A muestra de mano, se observa una roca con textura porfírica, con fábrica isotrópica, en la cual se aprecian fenocristales (2-10 %) de tamaño 1-5 mm inmersos en una masa fundamental (97-85 %) de color gris, con un 3% de vesículas aproximadamente. Los cristales que se observan se tratan de plagioclasas, olivinos y algunos anfíboles, en su mayoría son anhedrales a subhedrales a excepción de algunas plagioclasas que se observan sus caras bien definidas. En la figura 5.15 se observa una muestra de la colada a3.



Figura 5.15: Foto de la muestra T1.M2 de la colada Ajata inferior.

- Ajata superior (a4)

Las muestras obtenidas presentan una textura porfírica, fábrica isotrópica, con fenocristales (20-15 %) de 1 a 5 mm inmersos en una masa fundamental (80-85 %) de color gris-oscuro. Los cristales (plagioclasas y olivinos), de manera similar al flujo a3, son mayoritariamente anhedrales a subhedrales, con ciertos cristales de plagioclasa euhedrales. Las vesículas son escasas, entre 1-10 % aproximadamente. En la figura 5.16 se observa una muestra de la colada a4.



Figura 5.16: Foto de la muestra T2.M3 de la colada Ajata superior.

5.3. Dimensiones de los flujos

Para poder determinar los parámetros eruptivos de las coladas de Ajata hay que medir sus dimensiones de espesor, ancho, largo y pendiente de la superficie por la cual fluyó la colada, con lo cual se podrá estimar el volumen del flujo.

La colada a3 se dividió en dos, un flujo principal y un lóbulo en dirección al este. Del mismo modo, la colada a4 se dividió también en dos, un flujo norte y otro sur. La obtención del ancho y el espesor de los flujos a3 y a4 se realizaron a través del DEM que se creó a partir de las imágenes tomadas por el dron en terreno. Debido que los anchos y espesores de las coladas de lava van variando a lo largo de ellas, es que se realizaron distintos perfiles, perpendiculares a la dirección del flujo, y se midieron las dimensiones en cada uno de ellos (fig. 5.17 y 5.18).

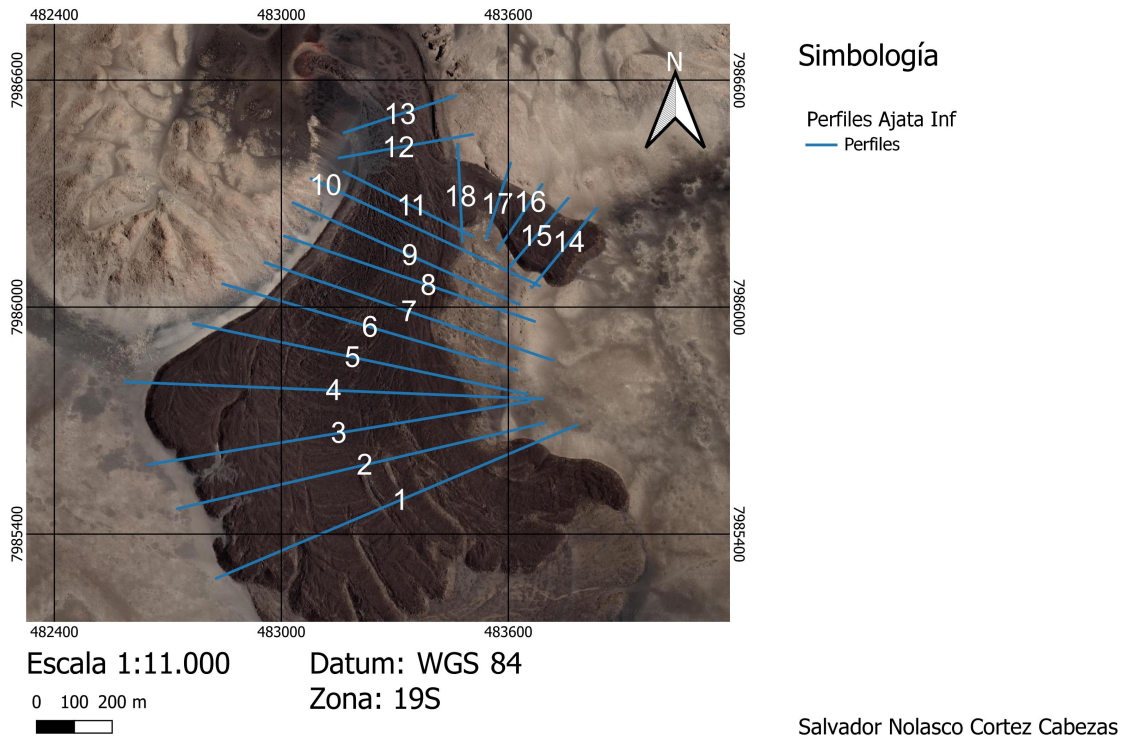


Figura 5.17: Mapa de perfiles del flujo Ajata inferior. Las líneas azules corresponden a perfiles que se realizaron al flujo a3. Se trazaron de manera perpendicular a la dirección del flujo.

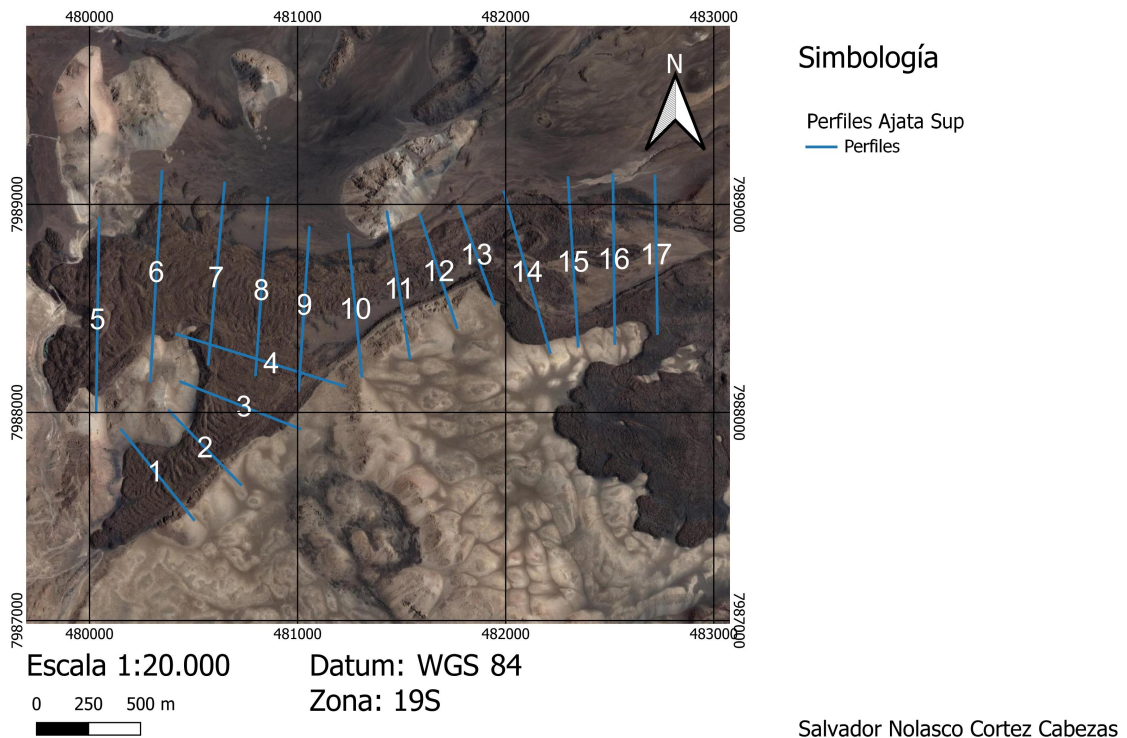


Figura 5.18: Mapa de perfiles del flujo Ajata superior. Las líneas azules corresponden a perfiles que se realizaron al flujo a4. Se trazaron de manera perpendicular a la dirección del flujo.

5.3.1. Ancho y largo del flujo

En el flujo de Ajata inferior el ancho fue aumentando a medida que avanzaba hacia el frente. Mientras que el flujo Ajata superior se observa un aumento rápido en su ancho, el cual luego se vio encajonado por un domo en la zona media, por lo que disminuye su ancho aumentando nuevamente hacia la zona de dispersión. Por otro lado, se obtuvo el largo de la colada realizando una medición por el medio del flujo desde el centro de efusión hasta el frente. Cabe destacar que en ambos flujos hay una separación en la colada, por lo que el largo varía dependiendo de cual separación se mida.

En la figura 5.19, se mostrará el gráfico que retrata la relación entre el logaritmo del ancho del flujo y su distancia de la fuente de emisión de ambos flujos de lava.

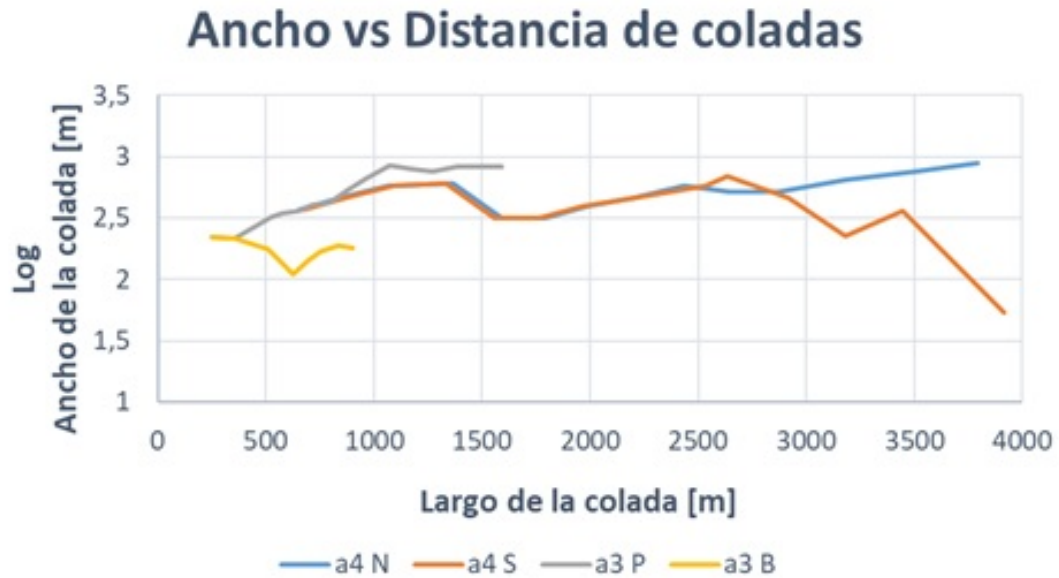


Figura 5.19: Gráfico del logaritmo del ancho vs. la distancia de las coladas. La línea azul corresponde al flujo Ajata superior, específicamente a la zona norte del flujo, la línea naranja corresponde a la zona sur del flujo Ajata superior, mientras que la línea gris corresponde al flujo principal del Ajata inferior y la línea amarillo representa al lóbulo del Ajata inferior.

Se puede observar que en a4 N y a3 P el ancho va aumentando a medida que va avanzando hacia el frente, a excepción de ciertas zonas en donde se ve encajonado por la topografía. Por otro lado, tanto a3 B como a4 S se ven influenciados en la zona media y de dispersión, respectivamente, por la presencia de torevas, domos y hummocks que hacen que su ancho disminuya.

5.3.2. Espesor del flujo

El espesor de las coladas se obtuvo con el DEM elaborado y con los perfiles realizados para medir el ancho. En estos, se utilizó la herramienta “profile tool”, la cual entrega la topografía del perfil, y midiendo desde la base hasta la parte más alta del levée o borde del flujo se obtuvo el espesor en cada lado.

Se utilizaron dos maneras diferentes en la determinación del espesor, las cuales se mostrarán a continuación. Primero está el caso en donde el flujo de lava avanza por una superficie que se encuentra a un nivel topográfico similar (misma altitud), como se ilustra en la figura 5.20. En este caso, se calculó el promedio de ambos lados y se obtuvo el espesor promedio en cada perfil.

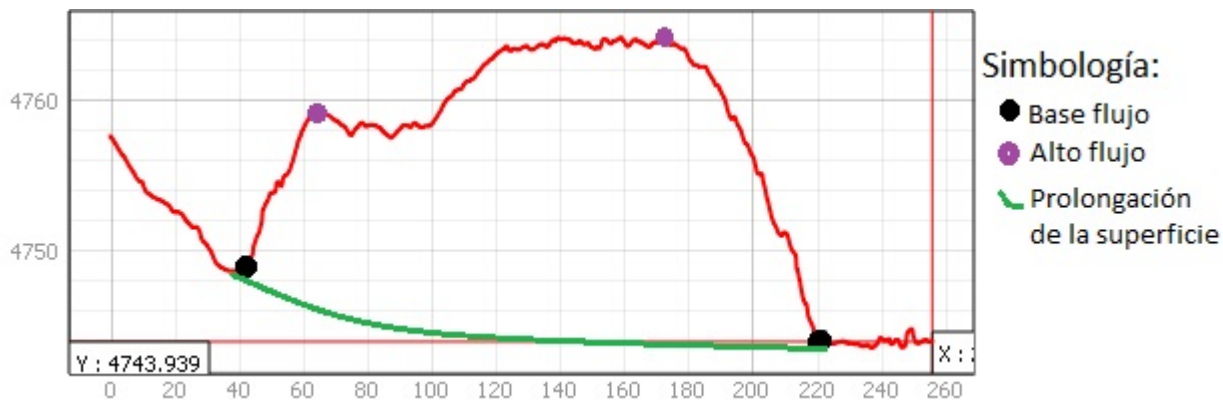


Figura 5.20: Ejemplo del perfil 18 del flujo a3. Los puntos negros corresponden a la base y los puntos morados representan la parte más alta de los bordes del flujo. La línea verde es una prolongación de la superficie.

Por otra parte, en el caso de que la colada iba fluyendo por una zona en donde un lado del flujo se encuentra a un nivel topográfico mayor que el otro (fig. 5.21), se consideró como espesor de la colada al lado con mayor potencia, pues se cree que era más representativo.

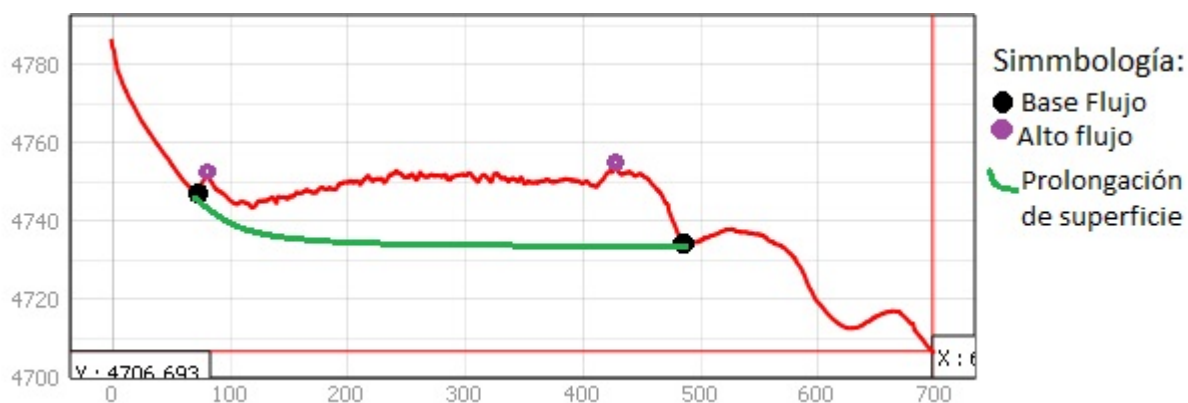


Figura 5.21: Ejemplo del perfil 8 del flujo a3. Los puntos negros corresponden a la base de donde comienza el levée y los puntos morados representan la parte más alta del levée. La línea verde es una prolongación de la superficie.

Cabe destacar que el contacto en la base de las coladas está cubierto por material fino, por lo que el espesor posee un margen de error ya que no se sabe cuánto es lo que está cubierto y no se está considerando. En los casos en que un lado del levée tiene una potencia mucho menor que el otro lado y esté relacionado a la deposición de material y no a la topografía, se utilizó como espesor de la colada la mayor potencia.

En la figura 5.22 se presenta el gráfico que muestra la relación de el espesor del flujo y su distancia de la fuente de emisión de ambos flujos de lava.



Figura 5.22: Gráfico de espesor vs. largo de las coladas. La línea azul corresponde al flujo Ajata superior, específicamente a la zona norte del flujo, la línea naranja corresponde a la zona sur del flujo Ajata superior, mientras que la línea gris corresponde al flujo principal del Ajata inferior y la línea amarillo representa al lóbulo del Ajata inferior.

Se puede observar en el gráfico que los espesores de las coladas tienen cierta tendencia de ir aumentando a medida que se van alejando de la fuente de emisión, pero hay variaciones en ciertas zonas en donde los espesores disminuyen. Estas disminuciones se pueden deber a que se haya depositado material posteriormente al emplazamiento de las coladas.

5.3.3. Volumen del flujo

Para la determinación del volumen, se realizó, en QGis, un polígono que cubriera todo el perímetro de la colada y se dividió en distintos segmentos coincidentes con los perfiles que se realizaron a lo largo del flujo (fig. 5.23 y 5.24).

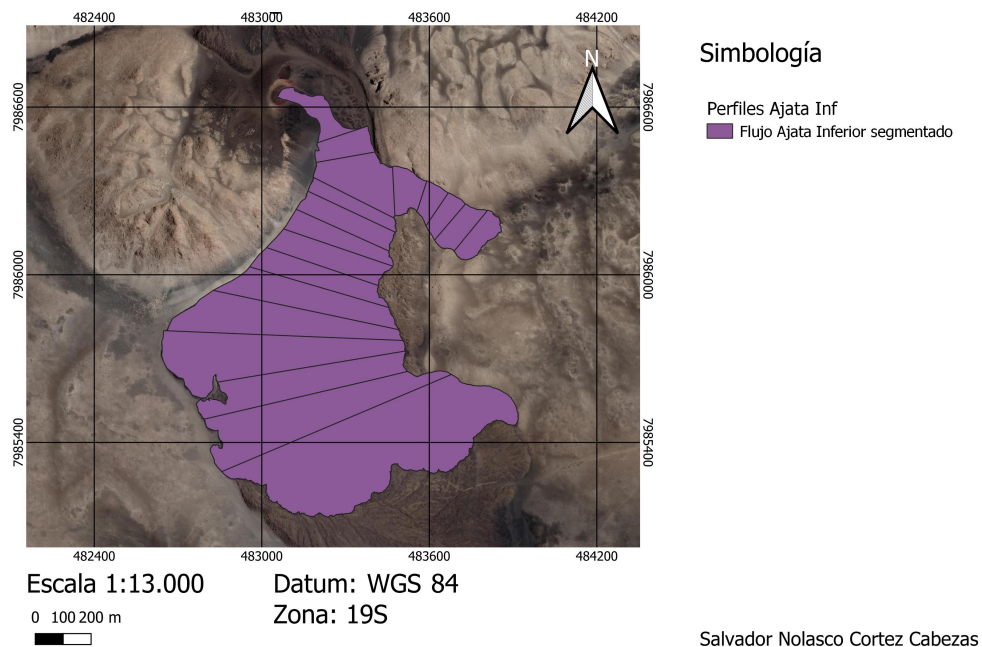


Figura 5.23: Mapa del flujo Ajata inferior segmentado por los perfiles realizados.

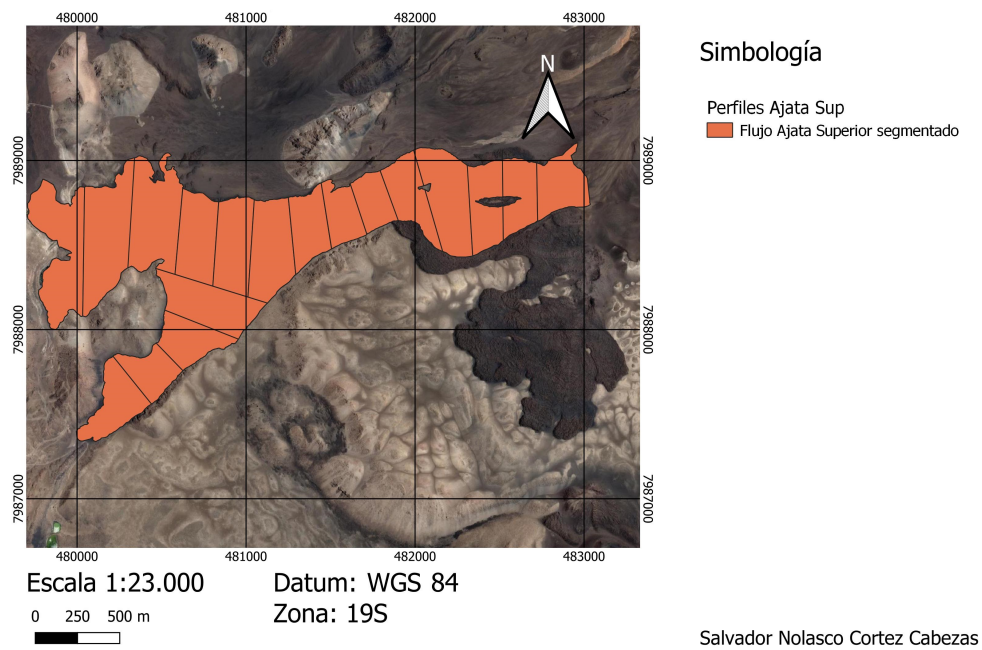


Figura 5.24: Mapa del flujo Ajata superior segmentado por los perfiles realizados.

Luego, con herramientas de QGis, se obtuvo el área de cada segmento y se multiplicó con el espesor promedio de los perfiles que dividen los segmentos, obteniendo así el volumen parcial de cada segmento (Anexo E). Cabe destacar que no se realizaron perfiles donde parte el flujo ni en el frente, por lo que para poder obtener el espesor promedio se sacó un promedio de distintas mediciones desde la base hasta la parte más alta del flujo en esas zonas. Sumando todos los volúmenes parciales de los segmentos, se obtuvo el volumen total de la erupción que fue emitido.

En la tabla 5.3, se muestran los volúmenes calculados para cada colada de lava:

Tabla 5.3: Volumen de lava emitido por las coladas.

Colada	Volumen (m^3)
a3	$1,6 \cdot 10^7$
a4	$3,6 \cdot 10^7$

5.4. Estimación de reología

Para determinar la reología de las lavas hay que conocer la composición, el contenido de volátiles y la temperatura de las lavas. Con todos estos datos, se puede estimar la tasa eruptiva y la velocidad de los flujos.

5.4.1. Temperatura

Debido a la ausencia de mediciones in situ, la temperatura que se utilizó para la determinación de la densidad y viscosidad de las lavas fue la calculada por Banaszak (2014), quién determinó la temperatura de las coladas de Ajata de tres maneras distintas. La primera fue con el geotermo-oxi-barómetro de Ridolfi y Renzulli (2011) y se determinó que las condiciones más oxidadas en la colada a3 se registran en el magnesio hastingsita de NNO+1.8 a NNO+3.6 a una temperatura de 949 a 986°C, mientras que en la colada a4 la t° es de 972 a 1026°C. El segundo es el geotermo-oxi-barómetro de Andersen y Lindsley (1985) que muestra que al aumentar la fugacidad de oxígeno de NNO+0,3 a NNO+1, la temperatura tiende a disminuir de 983 a 885 °C en la colada a3, mientras que en la colada a4 la temperatura es de 992 a 924 °C. El último es el geotermómetro de Holland y Blundy (1994) que se usa para la estimación de las temperaturas de cristalización registradas por pares de anfíboles plagioclasas, el cual entregó temperaturas de entre 817-936 °C para la colada a3 y de 901-976 °C para la colada a4.

De los distintos valores se calculó un promedio y se obtuvo que la temperatura para cada colada corresponde a los entregados en la tabla 5.4:

Tabla 5.4: Temperatura para cada colada.

Colada	T(°C)
a3	926±71
a4	965±71

5.4.2. Viscosidad

Para estimar la viscosidad del fundido se utiliza la ecuación (3.6), esta requiere del % en peso de los distintos óxidos mayores que componen el magma. Tal porcentaje se debe normalizar para luego calcular el % molar de los óxidos. El contenido de agua de este magma es 0 %, ya que, los componentes volátiles que se encuentran disueltos en el fundido del magma, se van exsolviendo en una fase gaseosa a medida que van ascendiendo a la superficie debido a la disminución de la presión (Edmonds et al., 2015). Por otro lado, se trabaja con una temperatura igual a 926 ± 71 °C para el Ajata inferior y 965 ± 71 °C para el Ajata superior. Con lo que se obtuvo (tabla 5.5):

Tabla 5.5: Viscosidad del fundido para cada colada.

Colada	η_{melt} (Pa*s)
a3	766,8
a4	14366,8

Luego, con la viscosidad del fundido se determinó la viscosidad del magma aplicando la ecuación (3.7). Para esto hay que calcular ϕ_0 que depende de la forma y tamaño de las facies cristalinas presentes (Mueller et al., 2010), pero debido a la complejidad de determinar estos valores es que en este trabajo se consideró que los cristales son esféricos y del mismo tamaño, con lo que se utilizó un $\phi_0 = 0,6$, pero esto no considera los efectos no newtonianos como el adelgazamiento por cizallamiento, el límite elástico ni el efecto de la distribución de tamaños (Castruccio et al., 2014).

El contenido de cristales está compuesto por los fenocristales, microfenocristales y por los microlitos de la masa fundamental. Por lo tanto, se determinó, de las muestras obtenidas en terreno, el contenido de fenocristales presentes (>1 mm). Para obtener este porcentaje se observó, a muestra de mano, todos los cristales que habían en la roca y se estimó un porcentaje para cada muestra. con lo que se obtuvo (tabla 5.6):

Tabla 5.6: Relación de masa fundamental y fenocristales (> 1 mm) para cada muestra.

Muestra	Masa fundamental	ϕ
Pari.T1.M1.S	0.8	0.2
Pari.T1.M2.S	0.93	0.07
Pari.T1.M3.S	0.9	0.1
Pari.T2.M1.S	0.85	0.15
Pari.T2.M2.S	0.83	0.17
Pari.T2.M3.S	0.85	0.15
Pari.T2.M4.S	0.85	0.15
Pari.T2.M5.S	0.85	0.15
Pari.T2.M6.S	0.85	0.15
Pari.T2.M7.S	0.97	0.03
Pari.T2.M8.S	0.98	0.02
Pari.T2.M11.S	0.95	0.05

Por lo que, se puede considerar un contenido de fenocristales promedio correspondiente a cada flujo. Dado que las muestras Pari.T1.M1.S, Pari.T2.M1.S, Pari.T2.M2.S, Pari.T2.M3.S y Pari.T2.M4.S corresponden al flujo Ajata superior, el contenido de fenocristales es igual a 0.16. Mientras que las muestras Pari.T1.M2.S, Pari.T1.M3.S, Pari.T2.M7.S, Pari.T2.M8.S y Pari.T2.M11.S corresponden al flujo Ajata inferior y su contenido de fenocristales es 0.07.

Por otro lado, Castruccio et al. (2014) propusieron una fórmula para obtener el ϕ , en donde determinaron el contenido de cristales vs. la distancia de la fuente, de acuerdo a unas muestras del flujo E de la erupción del 2002 del volcán Etna.

$$\phi = 0,32 + 0,28 \cdot (1 - e^{\frac{-x}{1,21}}) \quad (5.1)$$

Tal ecuación considera principalmente los microfenocristales, debido a que los fenocristales como los microlitos no representaron un patrón claro.

Debido a que en este trabajo no se contó con cortes transparentes para determinar el contenido de cristales presentes, se realizaron 3 fórmulas para determinar ϕ , para así ver como va variando la viscosidad de los flujos de lavas en distintos casos:

1. En este caso, se utiliza la ecuación propuesta por Castruccio et al. (2014), pero en vez de partir de 0,32 como base en el contenido de cristales, asume que el magma llega a la superficie con 0% de cristales y de ahí en adelante comienzan a cristalizar. La ecuación corresponde a:

$$\phi = 0,28 \cdot (1 - e^{\frac{-x}{1,21}}) \quad (5.2)$$

Se prosiguió a calcular ϕ en los distintos perfiles de cada flujo y se modeló en el siguiente gráfico (fig. 5.25).

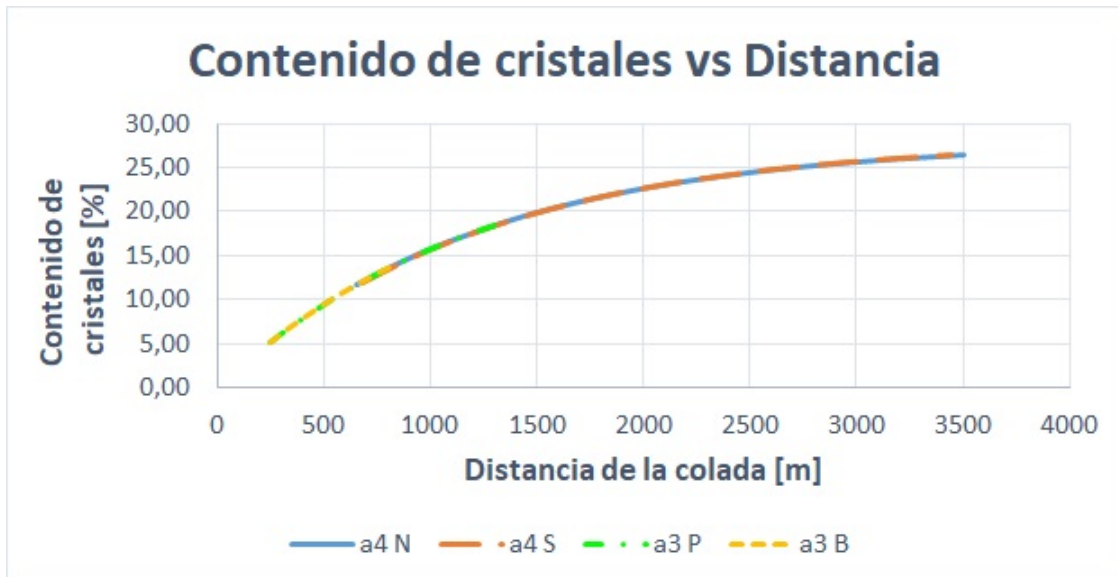


Figura 5.25: Gráfico que representa el contenido de cristales vs. la distancia de la colada en el primer caso. La línea azul corresponde al flujo Ajata superior, específicamente a la zona norte del flujo, la línea naranja corresponde a la zona sur del flujo Ajata superior, mientras que la línea verde corresponde al flujo principal del Ajata inferior y la línea amarillo representa al lóbulo del Ajata inferior.

Conocido el contenido de cristales, se procedió a determinar la viscosidad para este caso, obteniendo el gráfico mostrado en la figura 5.26:

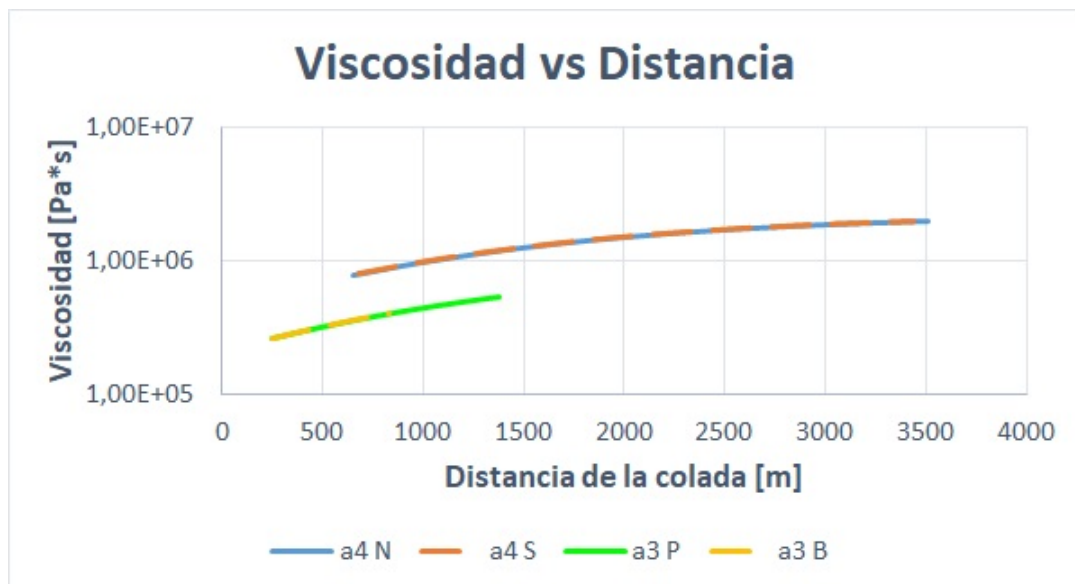


Figura 5.26: Gráfico de la viscosidad vs. la distancia de la colada Ajata inferior y superior para el caso 2. La línea de color amarillo corresponde al lóbulo de la colada a3, la de color verde es el flujo principal de la colada a3, la azul representa el sector norte de la colada a4 y la de color naranja el sector sur de la colada a4.

2. En este otro caso, también se utilizó la ecuación (5.1), pero en vez de que el magma llegue a superficie con 32 % de cristales, se consideró que el magma llega a superficie con el % de fenocristales calculados anteriormente (0,07 y 0,16 para la colada a3 y a4 respectivamente). Por lo que la ecuación queda de la siguiente forma:

$$\phi = \text{fenocristales} + 0,28 \cdot (1 - e^{\frac{-x}{1,21}}) \quad (5.3)$$

Con esta fórmula se calcularon los ϕ para los distintos perfiles de cada flujo y se graficó su valor a lo largo de la colada, obteniendo (fig. 5.27):

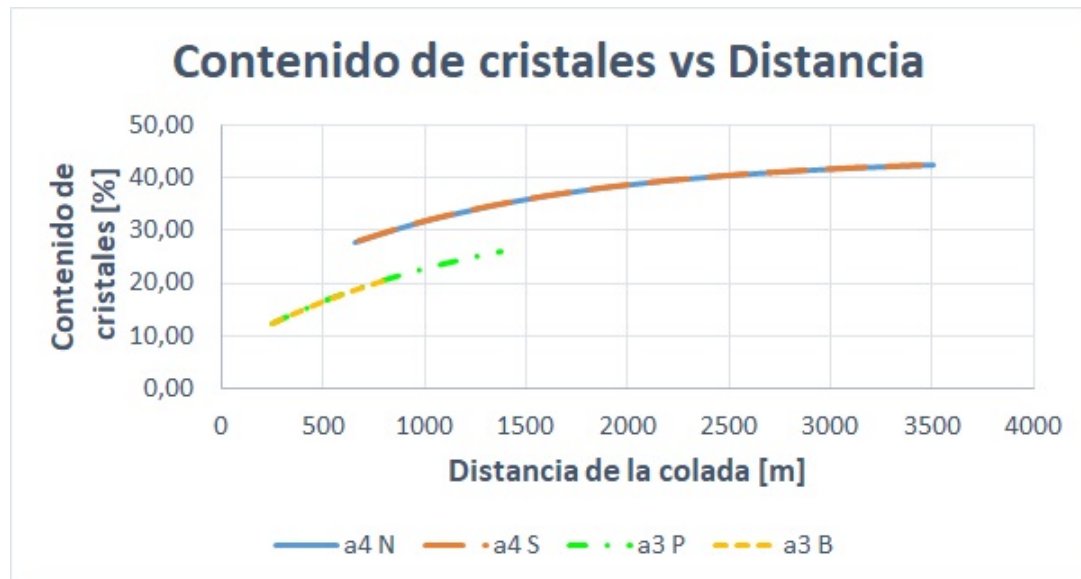


Figura 5.27: Gráfico que representa el contenido de cristales vs. la distancia de la colada en el segundo caso. La línea azul corresponde al flujo Ajata superior, específicamente a la zona norte del flujo, la línea de color naranja corresponde a la zona sur del flujo Ajata superior, mientras que la línea verde corresponde al flujo principal del Ajata inferior y la línea amarillo representa al lóbulo del Ajata inferior.

Conocido el contenido de cristales, se prosiguió a determinar la viscosidad para este caso y se graficaron sus valores, con lo que se obtuvo (fig. 5.28):

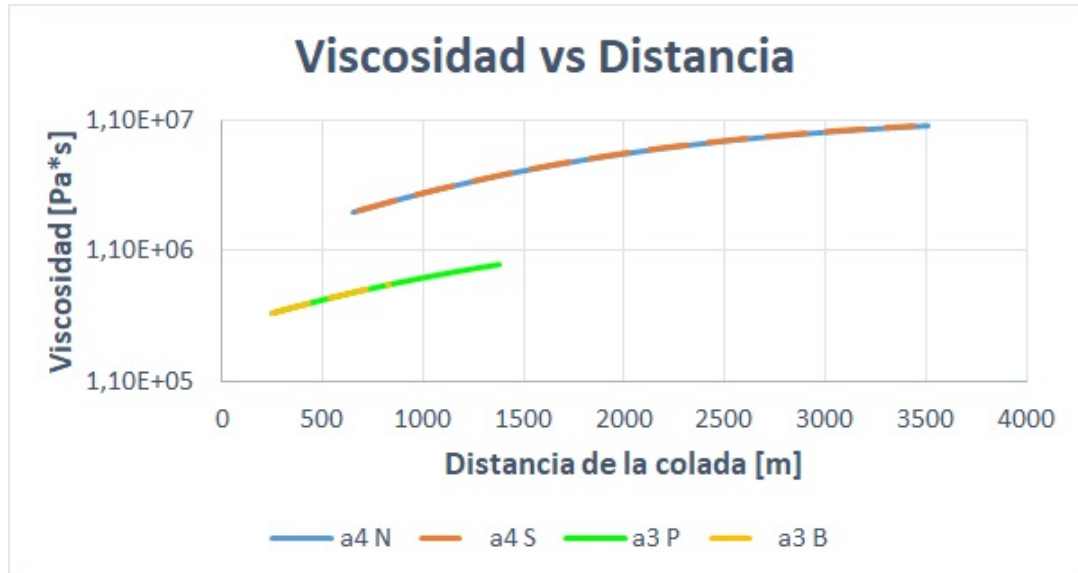


Figura 5.28: Gráfico de la viscosidad vs. la distancia de la colada Ajata inferior y superior para el caso 2. La línea de color amarillo corresponde al lóbulo de la colada a3, la de color verde es el flujo principal de la colada a3, la azul representa el sector norte de la colada a4 y la de color naranja el sector sur de la colada a4.

3. En este último caso, se utilizó la ecuación (5.1) tal como la propusieron Castruccio et al. (2014), considerando que el 32 % está compuesto por los fenocristales y los microfeno-cristales formados antes de la llegada del magma a la superficie.

$$\phi = 0,32 + 0,28 \cdot (1 - e^{\frac{-x}{1,21}}) \quad (5.4)$$

Luego, se determinó el ϕ para todos los perfiles de cada flujo y se graficó sus valores (fig. 5.29):

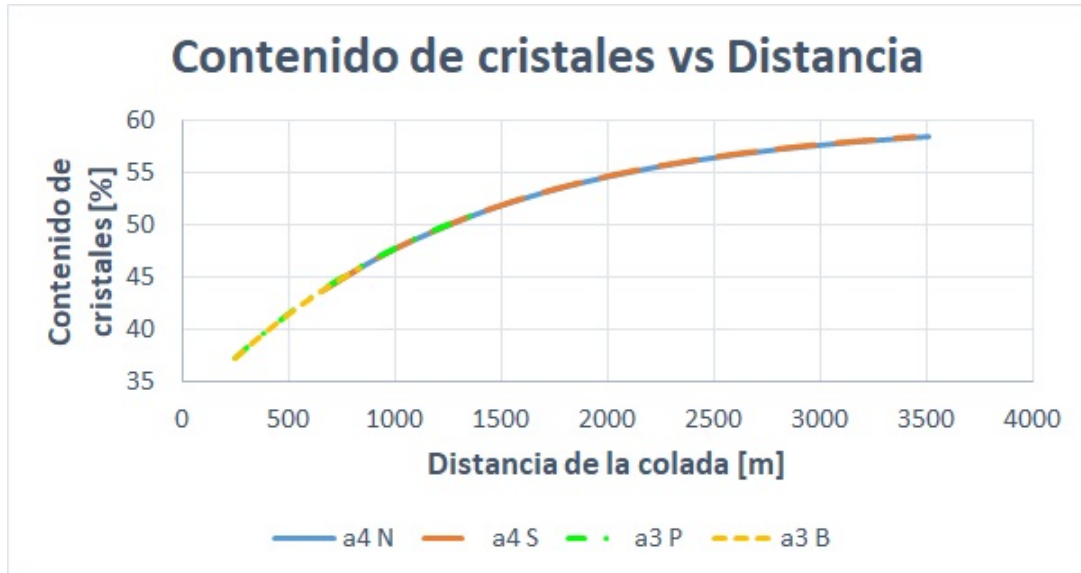


Figura 5.29: Gráfico que representa el contenido de cristales vs. la distancia de la colada en el tercer caso. La línea de color amarillo corresponde al lóbulo de la colada a3, la de color verde es el flujo principal de la colada a3, la azul representa el sector norte de la colada a4 y la de color naranja el sector sur de la colada a4.

Con esto se obtuvo que la viscosidad de las coladas para este caso, la cual se gráfico en la figura 5.30:

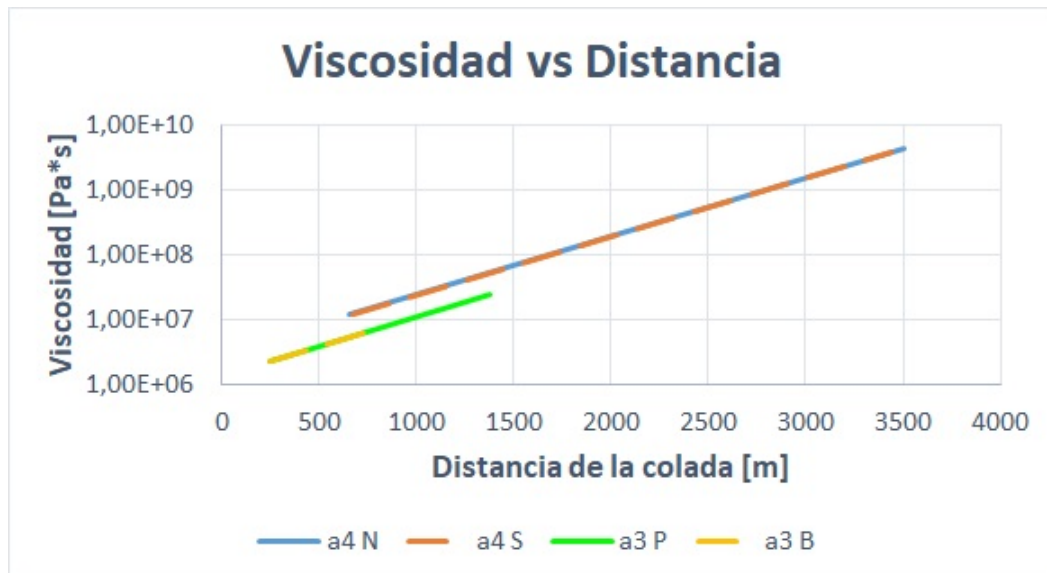


Figura 5.30: Gráfico de la viscosidad vs. la distancia de la colada Ajata inferior y superior para el caso 3. La línea de color amarillo corresponde al lóbulo de la colada a3, la de color verde es el flujo principal de la colada a3, la azul representa el sector norte de la colada a4 y la de color naranja, el sector sur de la colada a4.

Se puede observar que en todos los modelos, la viscosidad de las coladas de lava va aumen-

tando a medida que se alejan de la fuente de emisión, pero, los primeros dos casos aumentan con un crecimiento logístico, mientras que el tercer caso aumenta con un crecimiento exponencial.

Cabe destacar que tanto la viscosidad como la consistencia se calculan con la misma fórmula, por lo que para el caso Herschel-Bulkley se utilizarían como valores de consistencia los mismos que se determinaron para la viscosidad.

5.4.3. Densidad

Debido a que no se puede medir directamente la densidad del magma en profundidad, se debe estimar con las propiedades termodinámicas de los constituyentes del magma. Cabe destacar que la densidad de un magma difiere de la de un fundido silicatado ya que este último no considera los cristales, burbujas y fragmentos de rocas que alteran la densidad del magma. La densidad de un fundido silicatado se puede calcular con la ecuación (3.10), conociendo la composición química (% de óxidos) que se utiliza para determinar la fracción molar, la masa molecular y la fracción de volumen molar de cada óxido en la masa fundida, en condiciones específicas de temperatura y presión.

Para esto, se utilizó como P la presión atmosférica (101325 Pa) y la T de 926°C para la colada a3 y 965°C para la colada a4. Por otro lado, los valores del coeficiente de expansión térmica y el coeficiente de compresibilidad isotérmica de cada óxido fueron obtenidos de bibliografía (Sigurdsson et al., 1999) donde fueron estimados a partir de experimentos de laboratorios. El volumen molar parcial también se obtuvo de bibliografía. Todos estos datos salen con mayor detalle en el anexo F.

A continuación, en la tabla 5.7, se presentan las densidades obtenidas para cada colada:

Tabla 5.7: Densidad de las coladas de lava.

Colada	Densidad (kg/m^3)
a3	$2,63 \cdot 10^3$
a4	$2,54 \cdot 10^3$

5.5. Estimación de parámetros eruptivos

Los parámetros eruptivos que se calcularán en esta sección corresponden a la velocidad y la tasa eruptiva de cada colada y su variación en el tiempo. Para esto, se modeló cada flujo en 4 de los 5 distintos casos para el comportamiento de las coladas mencionados en el marco teórico, para luego compararlos y discutir.

La estimación de los parámetros eruptivos se realizó en todos los perfiles de ambas lavas, para ir observando cómo fue evolucionando en el tiempo. Debido a que no se sabe con exactitud cuál fue la viscosidad que presentaba la colada de lava al momento de emplazarse, se probaron los tres casos de viscosidad en los distintos modelos.

5.5.1. Ajata inferior

5.5.1.1. Caso newtoniano

La determinación de los parámetros eruptivos en este caso se realizó con la ecuación (3.16), en la cual se reemplazó el volumen por $V_i = W_i \cdot H_i \cdot L_i$, con W el ancho de la colada, H el espesor y L el largo. Luego se despejó H_i y se obtuvo:

$$H_i = \sqrt{\frac{L \cdot \mu}{t_i \cdot \rho \cdot g \cdot \text{sen}(\beta_i)}} \quad (5.5)$$

con L la distancia de la fuente hasta el perfil, μ la viscosidad de la lava, t_i el tiempo, ρ la densidad de la lava, g la gravedad y β_i la pendiente de la superficie.

Debido a que ya se tenían los espesores medidos, se intentó que los espesores calculados fueran lo más similares posible. Para esto, se estimó un tiempo que tenía que cumplir la condición de que cada vez iba a ser mayor que el anterior. Luego se calculó el tiempo por tramo restando el tiempo de un perfil con el del perfil anterior y se determinó la velocidad por tramo con la que el frente de la lava iba fluyendo en cada perfil con la ecuación de $\vec{v} = \frac{\text{DistanciaPorTramo}}{\text{TiempoPorTramo}}$. Posteriormente, se determinó la tasa eruptiva por tramo con la ecuación (3.12).

- 1^{er} caso de viscosidad

En este caso los valores de la velocidad y tasa eruptiva graficados vd. el largo de la colada se muestran en las figuras 5.31 y 5.32 respectivamente.

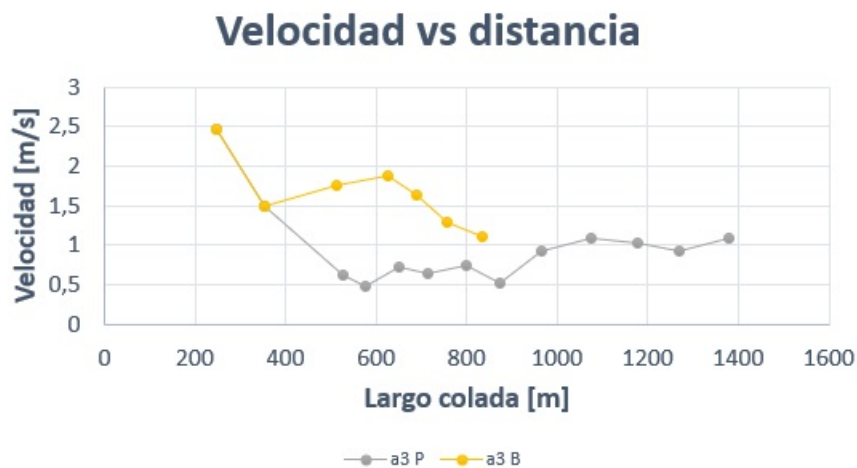


Figura 5.31: Gráfico de la velocidad vs. largo de la colada Ajata inferior, para el primer caso de viscosidad. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.

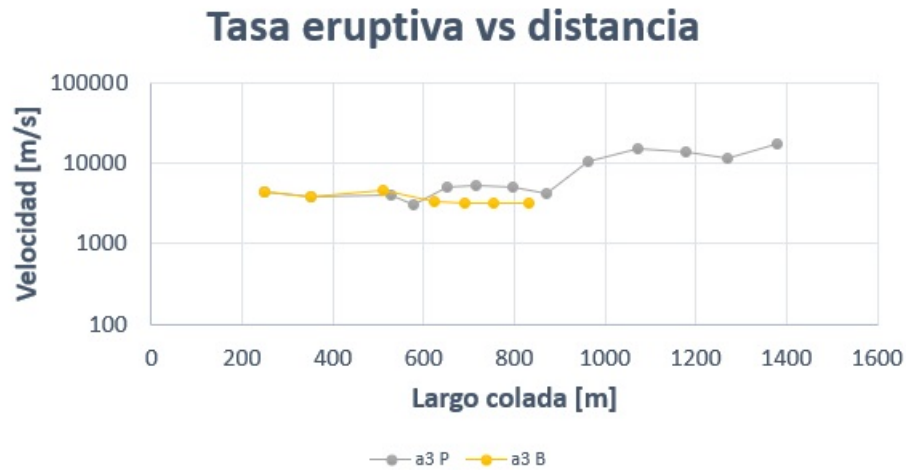


Figura 5.32: Gráfico de la tasa eruptiva vs. largo de la colada Ajata inferior, para el primer caso de viscosidad. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.

La velocidad para cada tramo de la colada a3 tiende a ir disminuyendo debido a que la razón distancia-tiempo de un perfil al otro va siendo cada vez menor porque el espesor de la colada va aumentando a medida que se aleja de la fuente y a la colada le va tomando mayor tiempo alcanzar esos espesores. En la zona de dispersión la velocidad aumenta un poco a causa de que la viscosidad en esos puntos es baja, por lo que le toma menos tiempo al flujo alcanzar tales espesores. Por otro lado, mientras que la tasa eruptiva del lóbulo de la colada va disminuyendo hacia el frente, la del flujo principal va aumentando. Esto se debe a que los anchos y espesores del flujo van en aumento hacia el frente. La duración de las erupciones que entrega este modelo en este caso es de 8 minutos para el lóbulo y 25 minutos para el flujo principal. Estas duraciones tan cortas se deben a las altas tasas eruptivas que entrega este modelo.

- 2^{do} caso de viscosidad

Para este caso la representación gráfica de los parámetros eruptivos corresponden a (fig. 5.33 y 5.34):

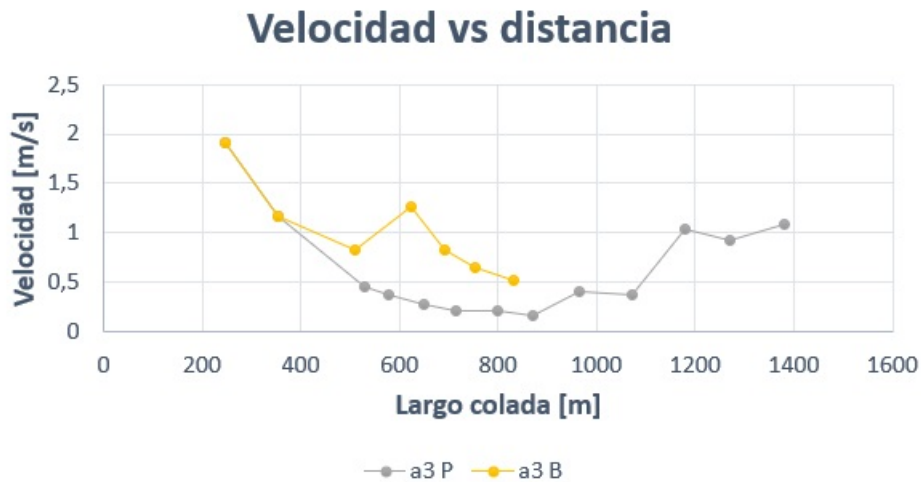


Figura 5.33: Gráfico de la velocidad vs. largo de la colada Ajata inferior, para el segundo caso de viscosidad. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.

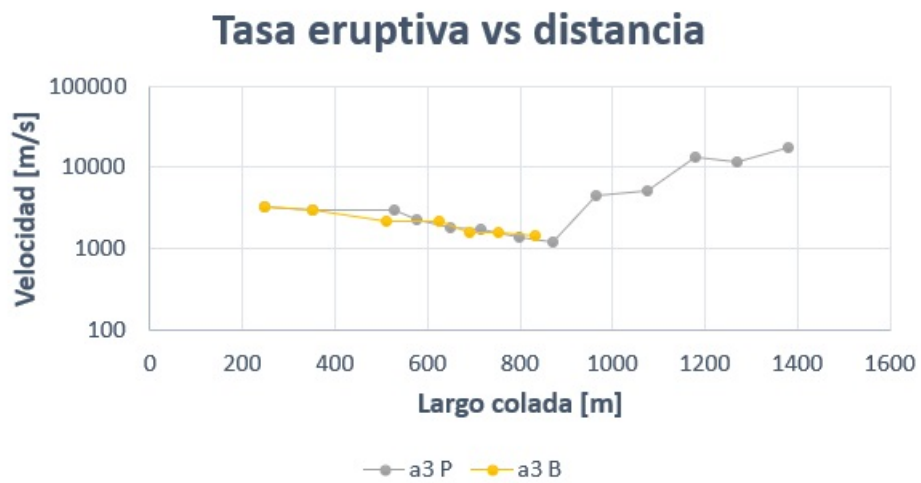


Figura 5.34: Gráfico de la tasa eruptiva vs. largo de la colada Ajata inferior, para el segundo caso de viscosidad. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.

Esta colada posee velocidades y tasas eruptivas muy similares a las del primer caso con una duración de emplazamiento de 50 y 14 minutos para el flujo principal y lóbulo respectivamente. Esta duración es mayor ya que la viscosidad para este caso es mayor.

- 3^{er} caso de viscosidad

Los valores de los parámetros eruptivos se modelaron de manera gráfica, obteniendo (fig. 5.35 y 5.36):

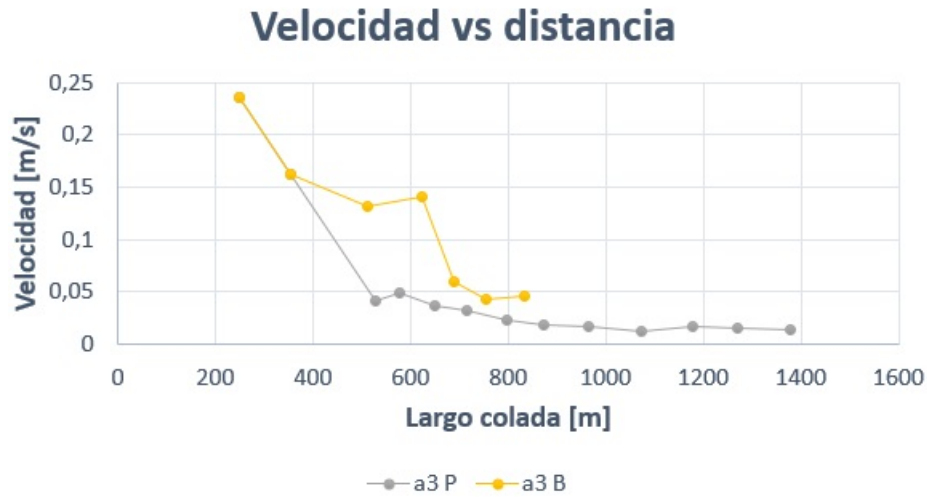


Figura 5.35: Gráfico de la velocidad vs. largo de la colada Ajata inferior, para el tercer caso de viscosidad. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.

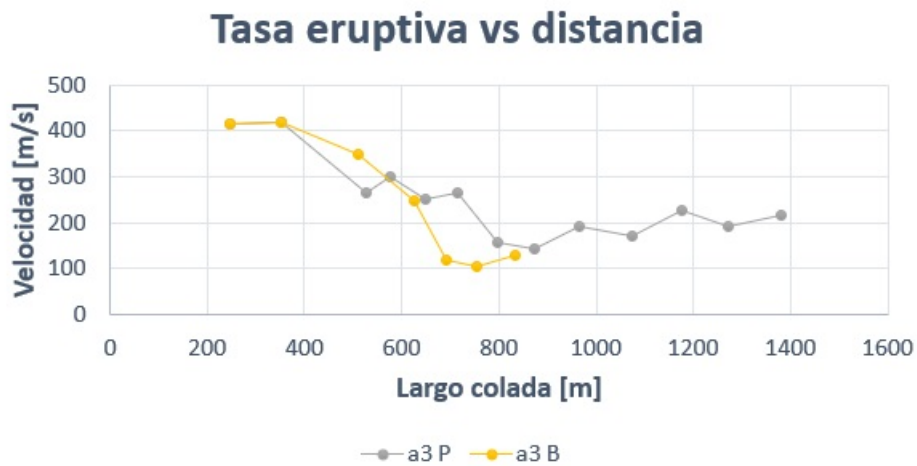


Figura 5.36: Gráfico de la tasa eruptiva vs. largo de la colada Ajata inferior, para el tercer caso de viscosidad. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.

La velocidad y la tasa eruptiva tienden a disminuir desde la zona proximal a la fuente hasta el frente del flujo, lo que se puede deber al crecimiento exponencial de la viscosidad. El tiempo que tardan en emplazarse corresponde a 14,7 y 2,2 horas para el flujo principal y lóbulo, respectivamente.

5.5.1.2. Caso Bingham

Las ecuaciones a utilizar para determinar la velocidad y tasa eruptiva son la (3.19) y (3.12) que corresponden a:

$$\vec{v} = \frac{H^2 \cdot \rho \cdot g \cdot \sin(\beta)}{3 \cdot \mu} \cdot \left(\frac{3}{2 \cdot H^3}\right) \cdot (H \cdot (H - h_c)^2 - \frac{1}{3}(H - h_c)^3) \quad (5.6)$$

$$Q = H \cdot w \cdot \left(\frac{H^2 \cdot \rho \cdot g \cdot \sin(\beta)}{3 \cdot \mu}\right) \cdot \left(\frac{3}{2 \cdot H^3}\right) \cdot (H \cdot (H - h_c)^2 - \frac{1}{3}(H - h_c)^3) \quad (5.7)$$

Para poder determinar la velocidad, hay que determinar h_c en la ecuación (3.20), la cual requiere del *yield strength* que se determina con la ecuación (3.8). Se determinaron estos valores en los distintos perfiles realizados a lo largo de las coladas. Para esto se midieron los anchos del levée de cada perfil y se calculó un promedio de estos (Anexo D). Cabe destacar que no en todos los perfiles se logró determinar bien los anchos de los levées porque no estaban bien definidos y en otros perfiles no se detectó la existencia de levées (zonas de dispersión y frente), por lo que se realizó una ecuación de los anchos del levée vs. el largo del flujo a cada colada, para ver cómo evoluciona y así poder estimar los anchos de los levées en las zonas donde no presentara (Anexo D). Mientras que la pendiente que se utilizó en cada perfil fue la obtenida anteriormente.

En la figura 5.37 se aprecia el *yield strength* calculado para cada perfil:

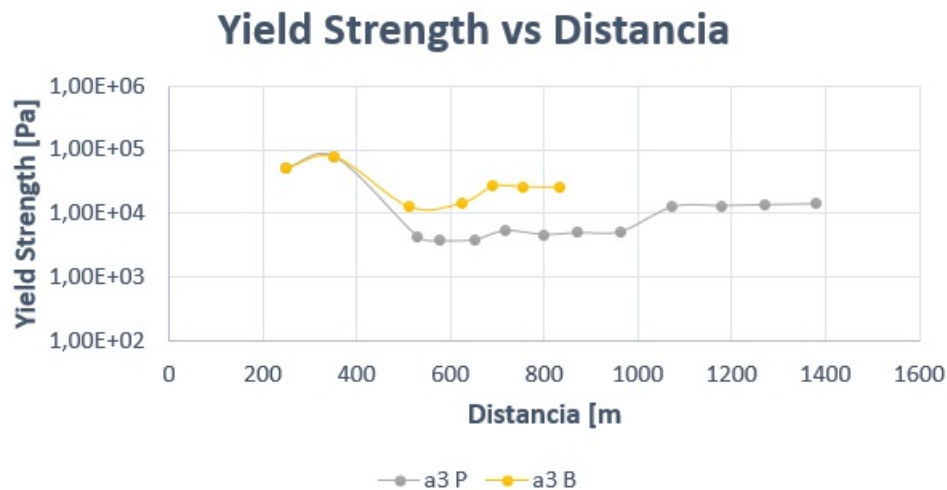


Figura 5.37: Gráfico del *yield strength* vs. la distancia de la colada para el Ajata inferior. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.

- 1^{er} Caso de viscosidad

Para este caso los valores se modelaron de manera gráfica para representar la velocidad y la tasa eruptiva vs. la distancia de la fuente, obteniendo (fig. 5.38 y 5.39):

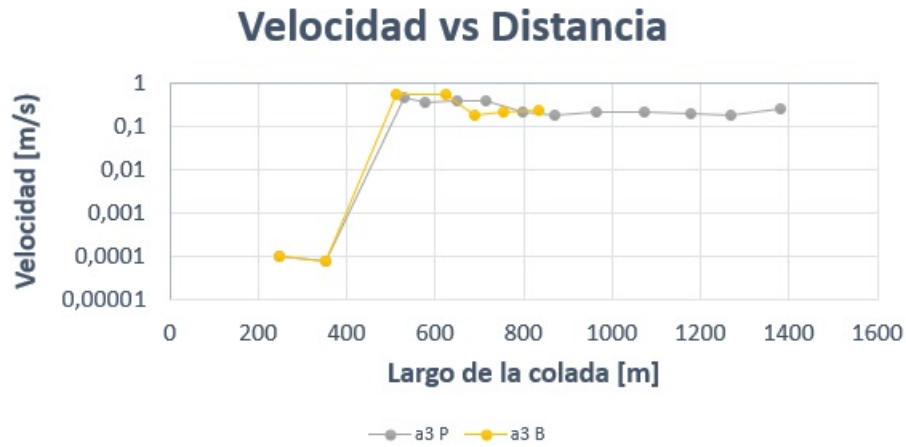


Figura 5.38: Gráfico de la velocidad vs.. largo de la colada Ajata inferior, para el primer caso de viscosidad. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.

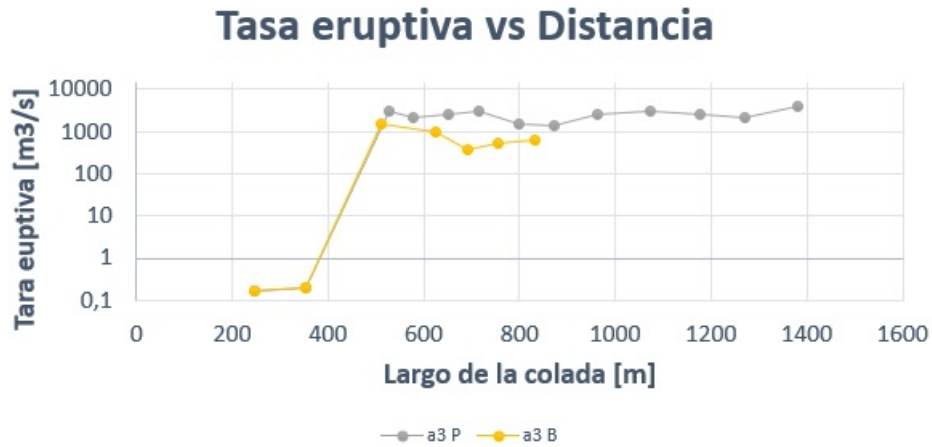


Figura 5.39: Gráfico de la tasa eruptiva vs.. largo de la colada Ajata inferior, para el primer caso de viscosidad. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.

Se puede notar que en la zona proximal a la fisura, los valores de la velocidad son muy bajos debido a que el *yield strength* es grande, implicando que el h_c sea grande. Luego sufre un aumento debido a que el h_c se hizo más pequeño y su espesor aumentó. Posterior a esto, la velocidad se mantuvo casi constante. Esto implicó un comportamiento similar de la tasa eruptiva, pero con un crecimiento hacia el frente del flujo causado principalmente por el aumento del ancho. Para este caso, con este modelo, la erupción tuvo una duración de 46 días.

- 2^{do} caso de viscosidad

La velocidad y tasa eruptiva vs. el largo de la colada corresponden a (fig. 5.40 y 5.41):

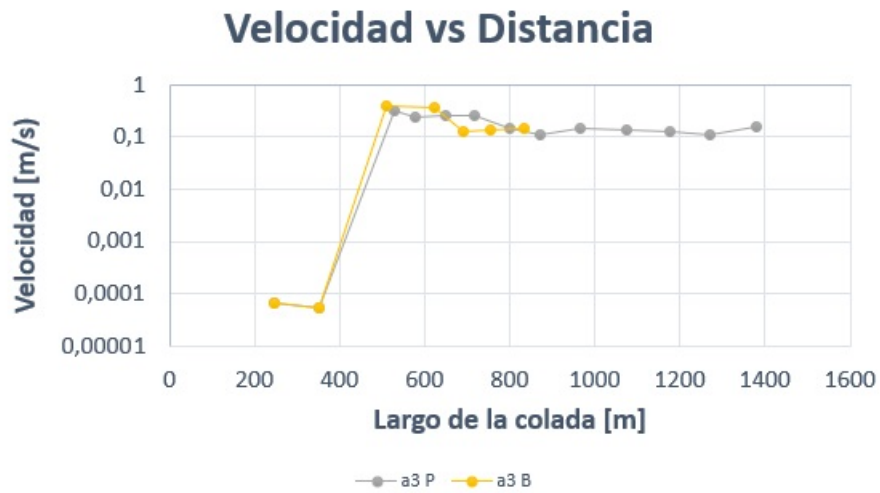


Figura 5.40: Gráfico de la velocidad vs. largo de la colada Ajata inferior, para el segundo caso de viscosidad. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.

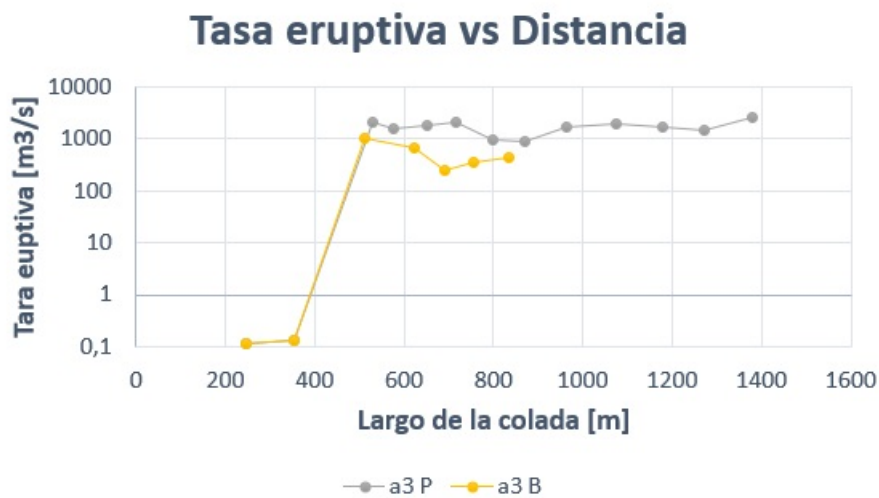


Figura 5.41: Gráfico de la tasa eruptiva vs. largo de la colada Ajata inferior, para el segundo caso de viscosidad. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.

En este caso, la velocidad y tasa eruptiva se comportan de manera similar al caso anterior, solo que los valores son más pequeños, debido a que las viscosidades son mayores. La duración de la erupción con esta viscosidad es de 65 días.

- 3^{er} caso de viscosidad

La velocidad y tasa eruptiva de la colada en este caso es (fig. 5.42 y 5.43):

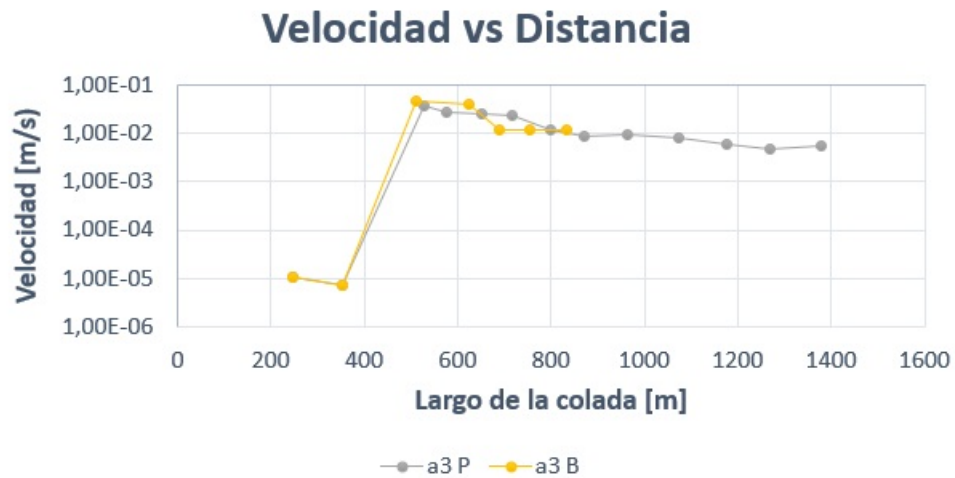


Figura 5.42: Gráfico de la velocidad vs. largo de la colada Ajata inferior, para el tercer caso de viscosidad. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.

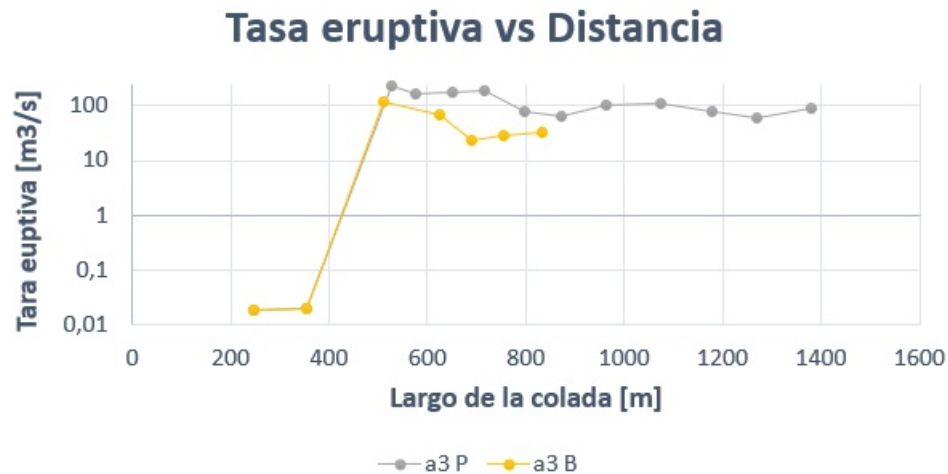


Figura 5.43: Gráfico de la tasa eruptiva vs. largo de la colada Ajata inferior, para el tercer caso de viscosidad. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.

Al comienzo posee un comportamiento similar a los casos anteriores, pero luego comienza a disminuir progresivamente a medida que se va alejando de la fuente, esto debido a que la viscosidad va aumentando de manera exponencial. Lo mismo ocurre con la tasa eruptiva, pero esta se ve más influenciada por el ancho de la colada. Para este modelo, el tiempo que demoró la colada de lava en emplazarse fue de 1,2 años, tanto para el flujo principal como para el lóbulo.

5.5.1.3. Caso Herschel-Bulkley

Para la utilización de este modelo, se requiere que la relación de aspecto “ancho/espesor” de la colada sea lo suficientemente grande como para que los efectos de la pared se puedan

despreciar (Castruccio et al., 2014). La velocidad se determinó con la ecuación (3.21) mientras que la tasa eruptiva se calculó con la ecuación (3.12) reemplazando la velocidad. Tales ecuaciones corresponden a:

$$\vec{v} = \frac{H^2 \cdot \rho \cdot g \cdot \sin(\beta)}{3K} \cdot \left(\frac{3n}{H^3 \cdot (n+1)} \left(\frac{\rho \cdot g \cdot \sin(\beta)}{K} \right)^{\frac{(1-n)}{n}} \right) \cdot \left(H \cdot (H-h_c)^{\frac{n+1}{n}} - \frac{n}{2n+1} (H-h_c)^{\frac{2n+1}{n}} \right) \quad (5.8)$$

$$Q = \frac{H^3 \cdot w \cdot \rho \cdot g \cdot \sin(\beta)}{3K} \cdot \left(\frac{3n}{H^3 \cdot (n+1)} \left(\frac{\rho \cdot g \cdot \sin(\beta)}{K} \right)^{\frac{(1-n)}{n}} \right) \cdot \left(H \cdot (H-h_c)^{\frac{n+1}{n}} - \frac{n}{2n+1} (H-h_c)^{\frac{2n+1}{n}} \right) \quad (5.9)$$

De manera similar que en el caso Bingham, se determinó el *yield strength* y se midieron las dimensiones de la colada de lava y los levées. Con esto, se pudo determinar los parámetros eruptivos para la colada a3.

En este caso los valores de viscosidad determinados anteriormente se utilizan para la consistencia. Otro parámetro que hay que determinar es el n. El valor de n es adimensional y es uno de los parámetros requeridos para la determinación de los parámetros eruptivos. Para calcularlo se cuenta con la fórmula (3.4).

Se utilizó un $\phi_m = 0,6$, por lo que ϕ_c equivale a 0,264; mientras que el ϕ que se utilizó fue variando dependiendo el caso, como se mencionó anteriormente. Por lo tanto, el parámetro n va variando.

- 1^{er} caso de viscosidad

En este caso el valor de n es igual a 1 a lo largo de todo el flujo. Con esto se pudo determinar los parámetros eruptivos para la colada, los que se resumen en las figuras 5.44 y 5.45:

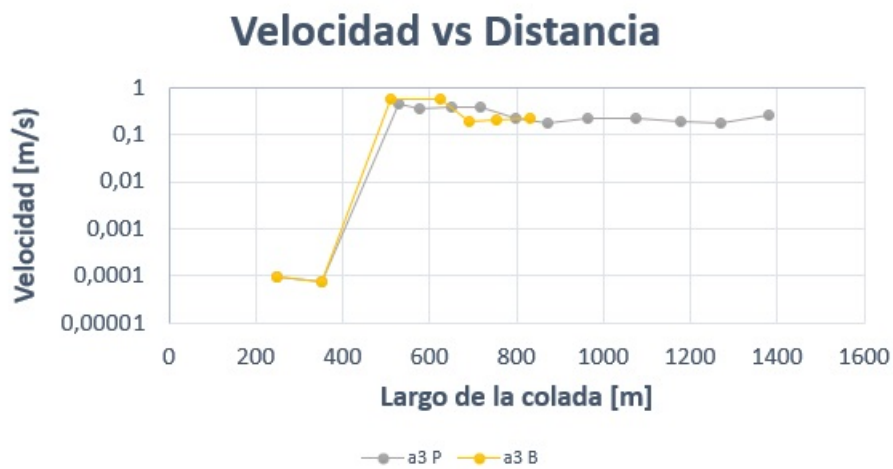


Figura 5.44: Gráfico de la velocidad vs. largo de la colada Ajata inferior, para el primer caso de viscosidad. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.

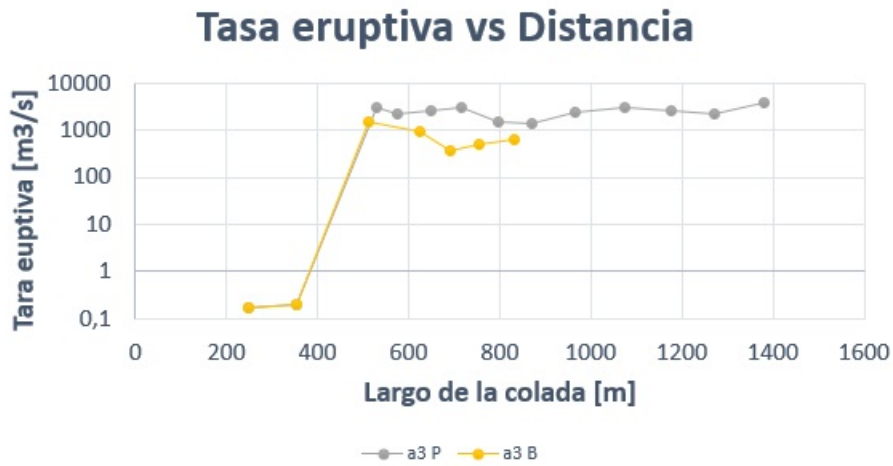


Figura 5.45: Gráfico de la tasa eruptiva vs. largo de la colada Ajata inferior, para el primer caso de viscosidad. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.

Este caso es igual al de Bingham en el primer caso de viscosidad, debido a que el valor de $n = 1$, por lo que la fórmula para determinar la velocidad es la misma y con ello la tasa eruptiva igual. El tiempo de duración que entrega este modelo también es el mismo, 46 días.

- 2^{do} caso de viscosidad

De manera similar al primer caso, los valores de n a lo largo de la colada son iguales a 1. Por lo que, los valores de los parámetros eruptivos graficados vs. el largo de la colada son (fig. 5.46 y 5.47):

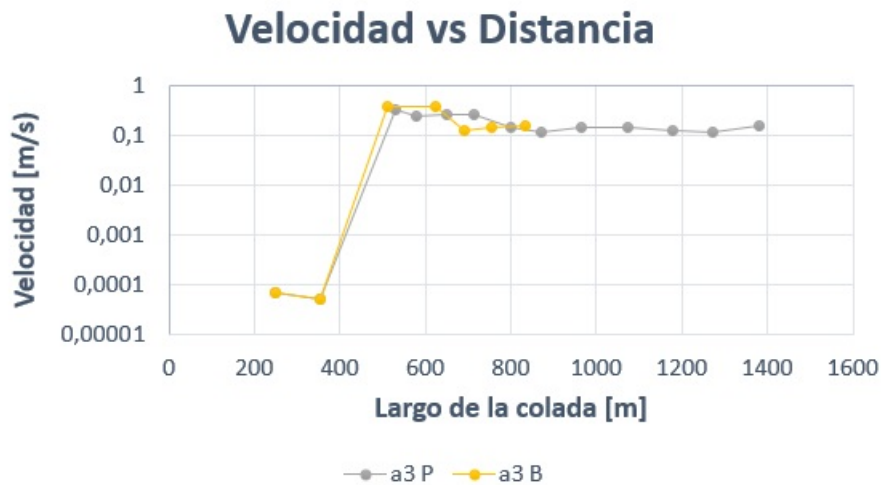


Figura 5.46: Gráfico de la velocidad vs. largo de la colada Ajata inferior, para el segundo caso de viscosidad. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.

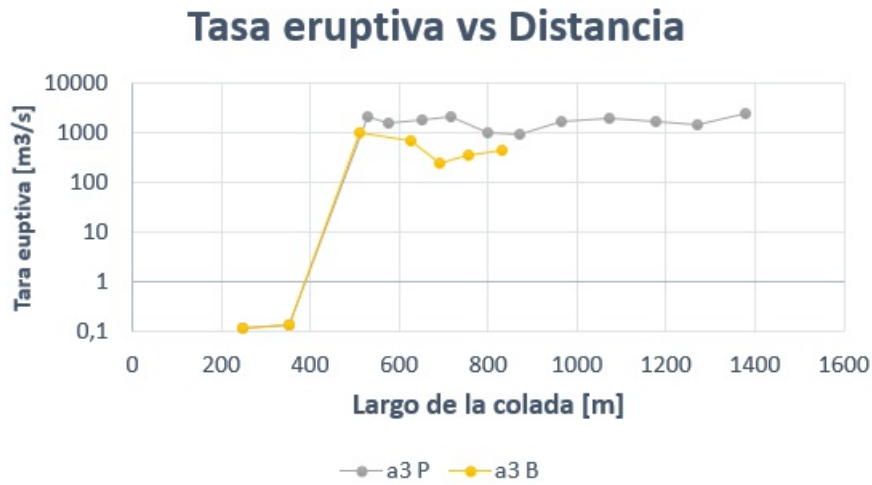


Figura 5.47: Gráfico de la tasa eruptiva vs. largo de la colada Ajata inferior, para el segundo caso de viscosidad. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.

En este caso, la colada a3 posee los mismos parámetros eruptivos que en el segundo caso del modelo de Bingham ya que el valor de $n = 1$, por lo que su tiempo de emplazamiento es de 65 días.

- 3^{er} caso de viscosidad

Para este caso, el valor de n varía entre $[0,47-0,77]$. Por lo que, los valores de la velocidad y tasa eruptiva vs. el largo de la colada se muestran en las figuras 5.48 y 5.49 respectivamente:

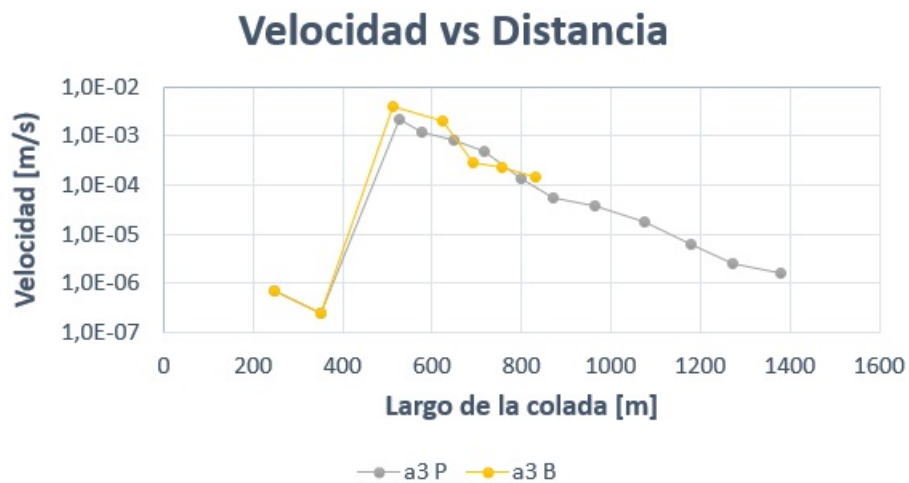


Figura 5.48: Gráfico de la velocidad vs. largo de la colada Ajata inferior, para el tercer caso de viscosidad. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.

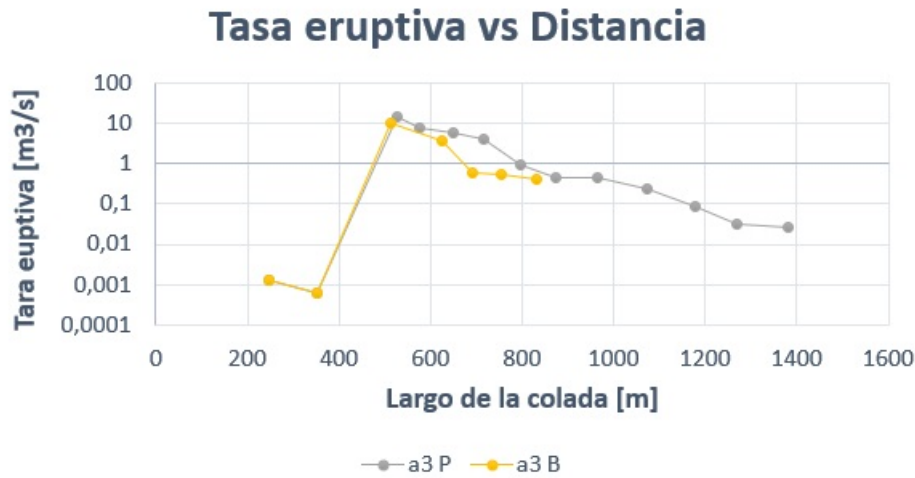


Figura 5.49: Gráfico de la tasa eruptiva vs. largo de la colada Ajata inferior, para el tercer caso de viscosidad. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.

En los dos primeros perfiles la velocidad es muy baja debido a los altos valores de *yield strength* y los bajos espesores. Luego tanto la velocidad como la tasa eruptiva aumentan abruptamente al comienzo, tanto por el aumento del espesor de la colada como por la baja del *yield strength*, para posteriormente ir disminuyendo, a causa del crecimiento exponencial de la consistencia, hasta que se detiene. Este modelo nos indica que el flujo principal y el lóbulo de la colada se han demorado 28 y 24 años en alcanzar su largo final, debido a las bajas velocidades al comienzo de la erupción.

5.5.1.4. Caso yield strength en la corteza

Para poder determinar los parámetros eruptivos de este caso, se utilizó la ecuación (3.26). En esta ecuación se reemplazó el volumen por $V_i = W_i \cdot H_i \cdot L_i$, con W el ancho, H el espesor y L el largo de la colada. Luego se despejó el espesor obteniendo:

$$H = \sqrt{\frac{\tau_{ci} \cdot \sqrt{k \cdot t}}{\rho \cdot g \cdot \text{sen}(\beta_i)}} \quad (5.10)$$

Se contaba con los datos de los espesores medidos en cada perfil, por lo que se ajustó un valor del *yield strength* en la corteza que fuera razonable y entregara un número de Graetz cercano a los 300 en el frente de la colada. También se ajustaron valores del tiempo para que los espesores calculados pudieran concordar con los datos de los espesores medidos. Para esto, había una condición que cumplir: que el tiempo siempre fuera mayor al tiempo anterior, debido a que ese tiempo representa al tiempo del crecimiento de la corteza proveniente de la ecuación (3.24) y es un tiempo acumulativo.

El valor del *yield strength* en la corteza fue constante a lo largo de todo el flujo, con un valor de $1,90 \cdot 10^6$ Pa. Luego, se prosiguió a determinar la velocidad con $v = \frac{\text{DistanciaPorTramo}}{\text{TiempoPorTramo}}$ y se determinó la tasa eruptiva con la fórmula (3.12). En este modelo no se requiere de la viscosidad, por lo que solo hay un caso. Los valores de los parámetros eruptivos se represen-

taron de manera gráfica en las figuras 5.50 y 5.51).

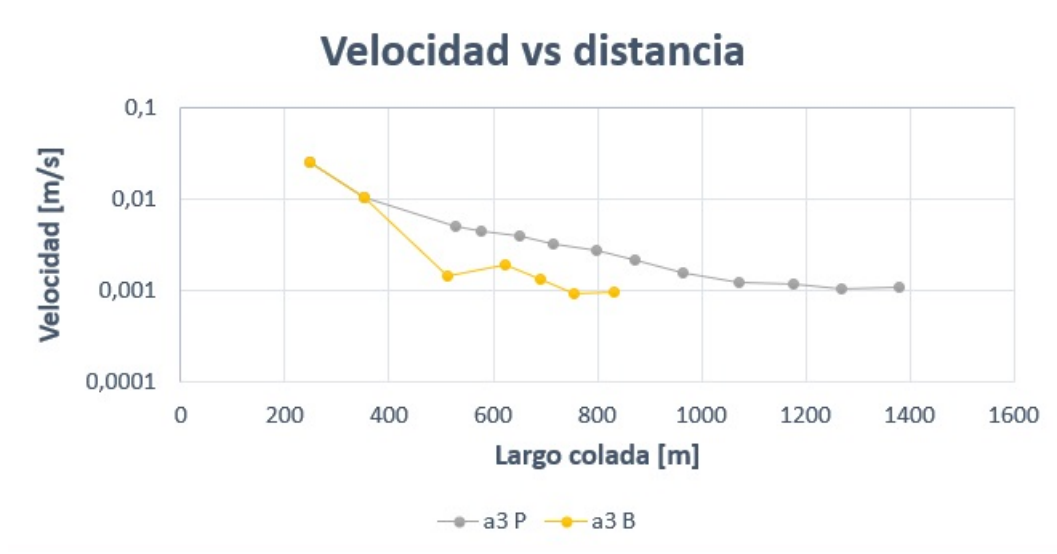


Figura 5.50: Gráfico de la velocidad vs. largo de la colada Ajata inferior. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.

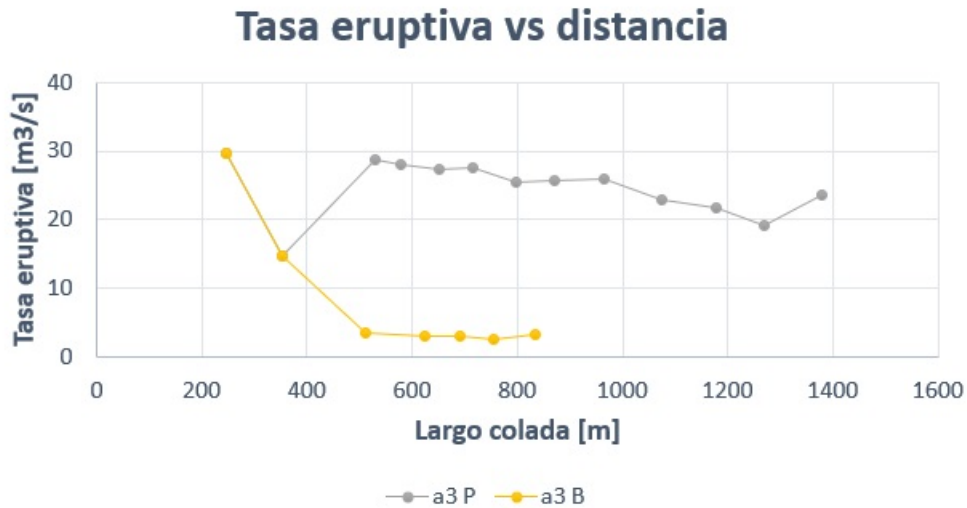


Figura 5.51: Gráfico de la tasa eruptiva vs. largo de la colada Ajata inferior. La línea de color gris representa el flujo principal de la colada y la de color amarillo representa el lóbulo de la colada.

La velocidad tiende a ir disminuyendo desde la fuente hasta el frente debido que los espesores de la colada van aumentando hacia el frente y el tiempo que le toma a la lava alcanzar esos espesores va siendo cada vez mayor. La tasa eruptiva tiene un comportamiento muy similar debido a que se encuentra principalmente influenciada por la velocidad, pero, en el tercer perfil del flujo principal se observa un aumento de la velocidad, generado principalmente por el cambio abrupto de pendiente que hay en esa zona, de 14,5° a 3,2°. La duración de la

erupción corresponde a 7 y 4 días para el flujo principal y lóbulo de la colada, respectivamente.

En las figuras 5.52 y 5.53 se presentan dos gráficos que resumen las velocidades y tasas eruptivas promedio para las distintas combinaciones de los modelos utilizados en los tres casos de viscosidad para el flujo principal y lóbulo de la colada Ajata inferior.

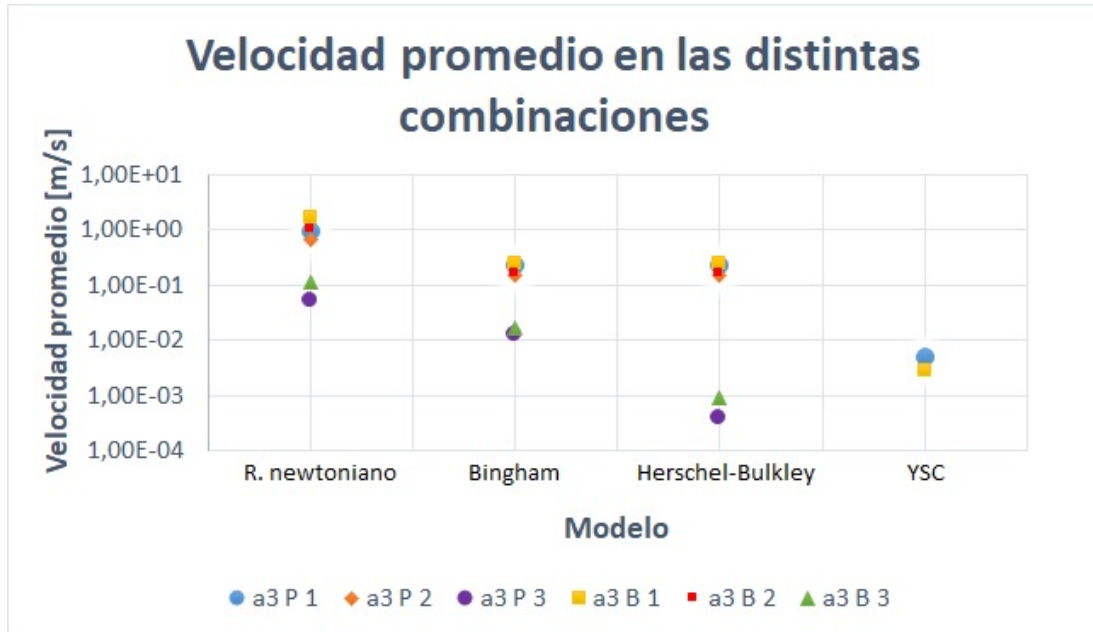


Figura 5.52: Gráfico de la velocidad promedio para los distintos modelos en el 1^{er}, 2^{do} y 3^{er} caso de viscosidad de la colada Ajata inferior.

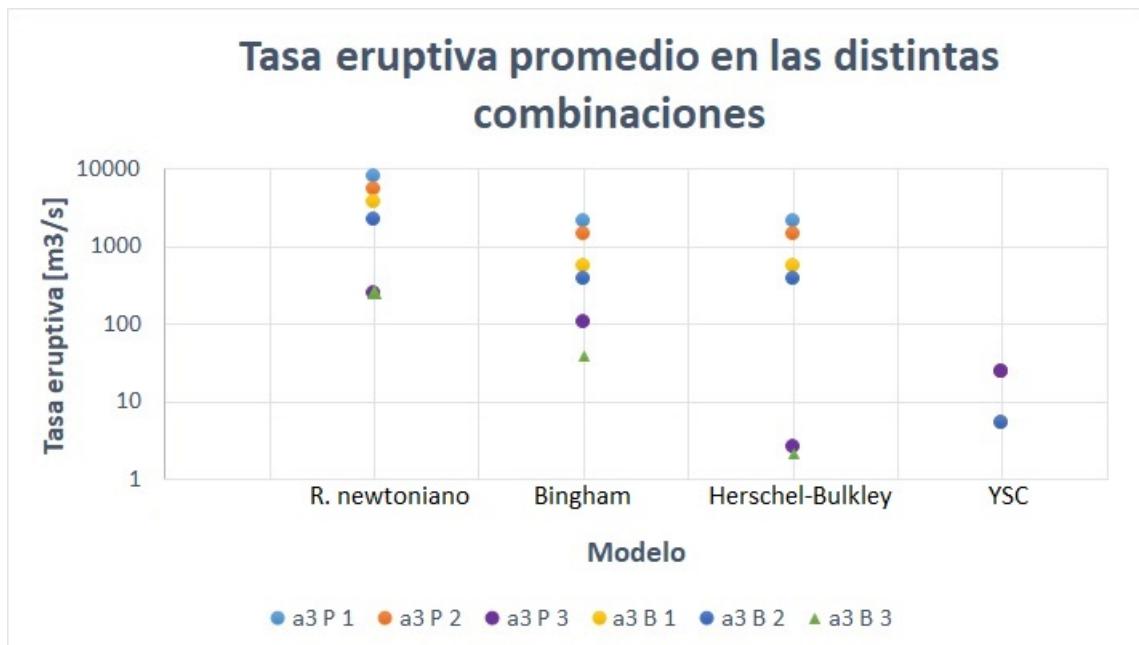


Figura 5.53: Gráfico de la tasa eruptiva promedio para los distintos modelos en el 1^{er}, 2^{do} y 3^{er} caso de viscosidad de la colada Ajata inferior.

5.5.2. Ajata superior

5.5.2.1. Caso newtoniano

La determinación de los parámetros eruptivos en este caso se realizó con la ecuación (3.16), en la cual se reemplazó el volumen por $V_i = W_i \cdot H_i \cdot L_i$, con W el ancho de la colada, H el espesor y L el largo. Luego se despejó H_i y se obtuvo:

$$H_i = \sqrt{\frac{L \cdot \mu}{t_i \cdot \rho \cdot g \cdot \text{sen}(\beta_i)}} \quad (5.11)$$

con L la distancia de la fuente hasta el perfil, μ la viscosidad de la lava, t_i el tiempo, ρ la densidad de la lava, g la gravedad y β_i la pendiente de la superficie.

Debido a que ya se tenían los espesores medidos, se intentó que los espesores calculados fueran lo más similares posible. Para esto, se estimó un tiempo que tenía que cumplir la condición de que cada vez iba a ser mayor que el anterior. Luego se calculó el tiempo por tramo restando el tiempo de un perfil con el del perfil anterior y se determinó la velocidad por tramo con la que el frente de la lava iba fluyendo en cada perfil con la ecuación de $v = \frac{\text{DistanciaPorTramo}}{\text{TiempoPorTramo}}$. Posteriormente, se determinó la tasa eruptiva por tramo con la ecuación (3.12).

- 1^{er} caso de viscosidad

En este caso las representaciones gráficas de la velocidad y tasa eruptiva vs. el largo de la colada son las siguientes (fig. 5.54 y 5.55):

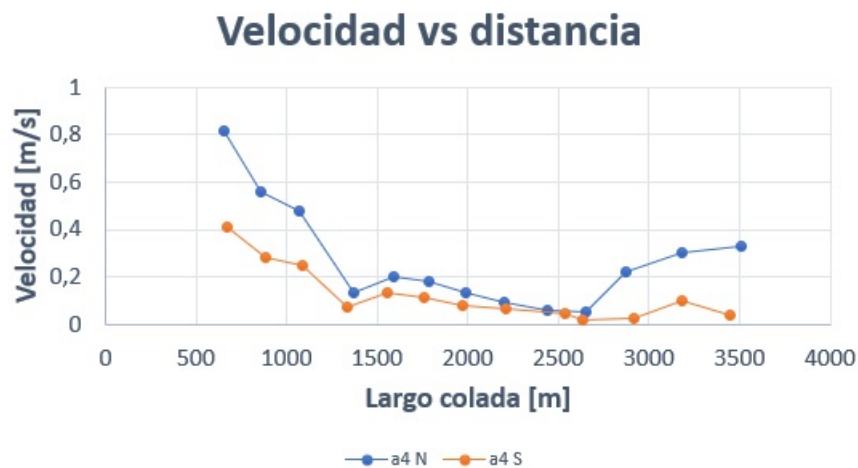


Figura 5.54: Gráfico de la velocidad vs. largo de la colada Ajata superior, para el primer caso de viscosidad. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.

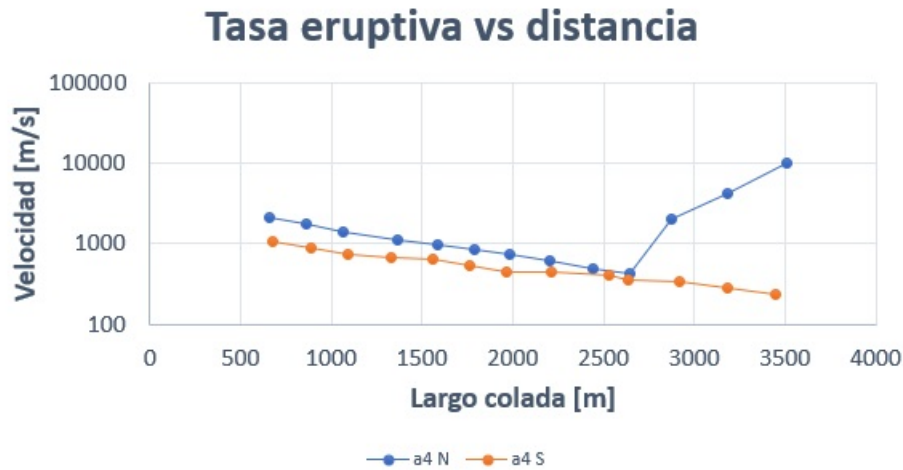


Figura 5.55: Gráfico de la tasa eruptiva vs. largo de la colada Ajata superior, para el primer caso de viscosidad. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.

La velocidad de la colada a4 tiende a ir disminuyendo ya que los tiempos que requiere, para alcanzar los espesores que van en aumento hacia el frente, son cada vez mayores, a excepción del último tramo del sector norte, donde aumenta un poco la velocidad, debido a que la viscosidad no es tan grande, por lo que le toma menos tiempo alcanzar esos espesores. La tasa eruptiva, por su parte, tiende a ir disminuyendo hasta la misma zona donde la velocidad aumentó, en donde comienza a aumentar a causa del aumento de la velocidad y se ve amplificado por el aumento del ancho y espesor de la colada. La duración de la erupción que entrega este modelo en este caso es de 6 horas para el sector norte y 13 para el sector sur del Ajata superior. Estas duraciones tan cortas se deben a las altas tasas eruptivas que entrega este modelo.

- 2^{do} caso de viscosidad

Para este caso, la representación gráfica de la velocidad y tasa eruptiva vs. tiempo se muestran en las figuras 5.56 y 5.57:

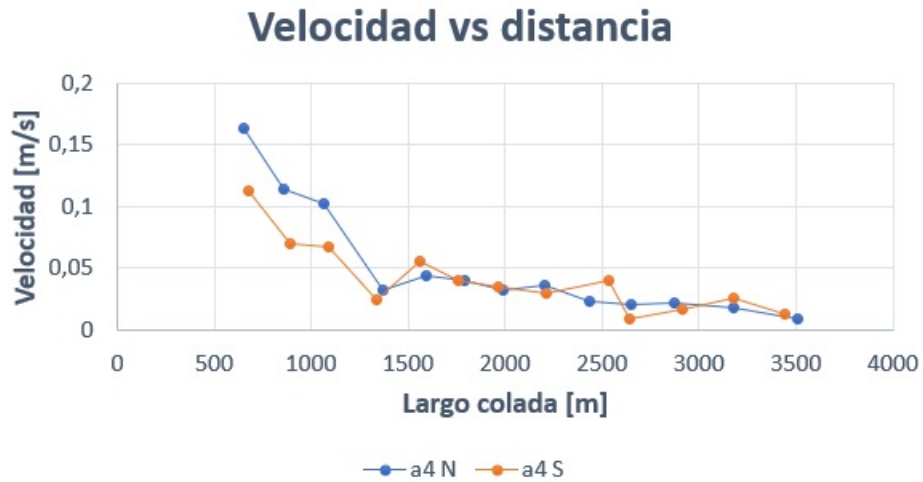


Figura 5.56: Gráfico de la velocidad vs. largo de la colada Ajata superior, para el segundo caso de viscosidad. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.

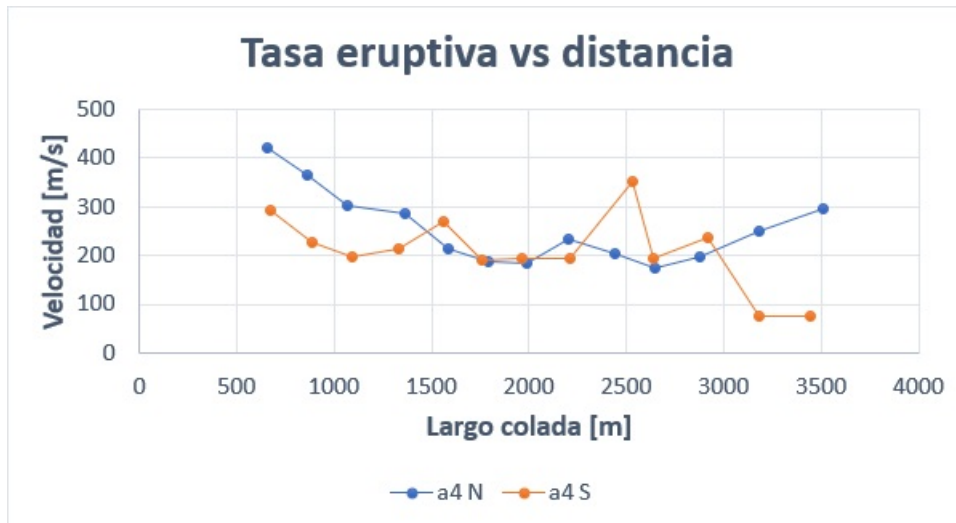


Figura 5.57: Gráfico de la tasa eruptiva vs. largo de la colada Ajata superior, para el segundo caso de viscosidad. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.

La velocidad de la colada a4 va disminuyendo a medida que avanza hacia el frente, pero la tasa eruptiva se comporta distinto. En el sector norte tiende a ir disminuyendo hasta la zona de dispersión donde comienza a aumentar, principalmente a causa del aumento del espesor y ancho de la colada, mientras que en el sector sur la tasa eruptiva disminuye muy suavemente hasta un punto en que aumenta abruptamente debido al ancho y espesor y luego disminuye a causa de la disminución de los mismos factores. El tiempo de emplazamiento de la lava fue de 1,4 días aproximadamente tanto para el sector norte como el sector sur.

- 3^{er} caso de viscosidad

Los parámetros eruptivos graficados corresponden a (fig. 5.58 y 5.59):

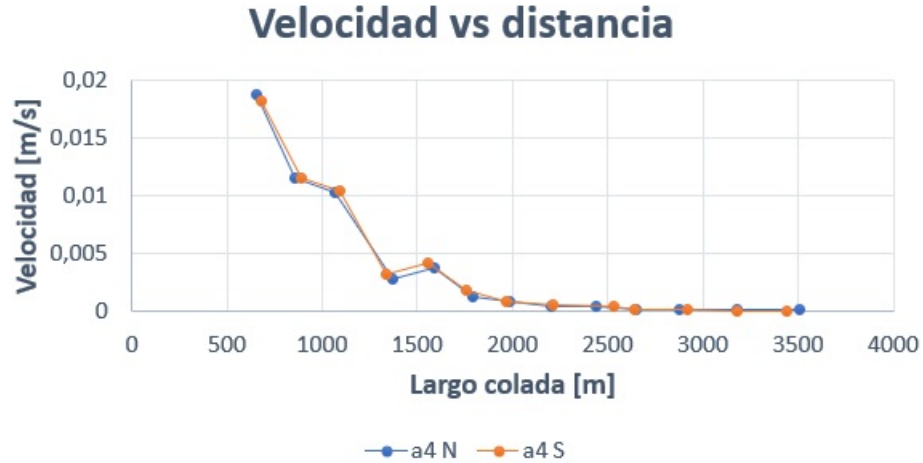


Figura 5.58: Gráfico de la velocidad vs. largo de la colada Ajata superior, para el tercer caso de viscosidad. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.

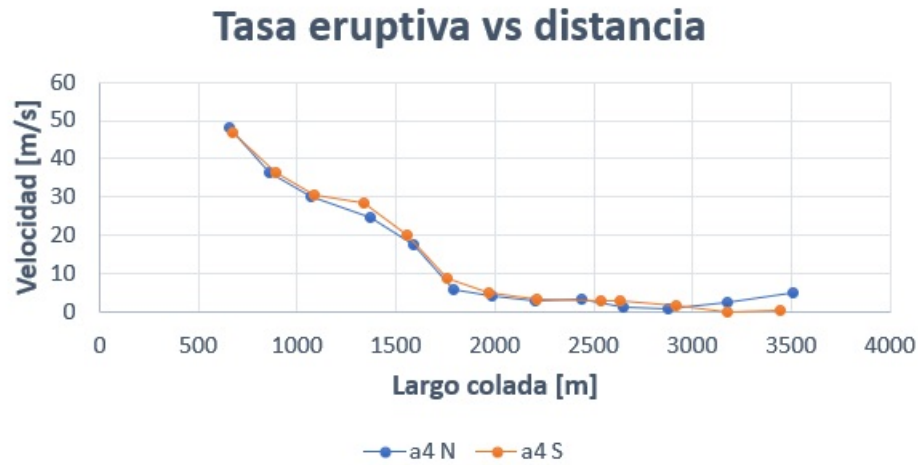


Figura 5.59: Gráfico de la tasa eruptiva vs. largo de la colada Ajata superior, para el tercer caso de viscosidad. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.

La velocidad y la tasa eruptiva tienden a disminuir desde la zona proximal a la fuente hasta el frente del flujo, lo que se puede deber tanto al crecimiento exponencial de la viscosidad como a que le va tomando mayor tiempo alcanzar los espesores que van en aumento hacia el frente. El tiempo que tardan en emplazarse corresponde a 104 y 174 días para el sector norte y sur respectivamente de la colada a4.

5.5.2.2. Caso Bingham

Las ecuaciones a utilizar para determinar la velocidad y tasa eruptiva son la (3.19) y (3.12) que corresponden a:

$$\vec{v} = \frac{H^2 \cdot \rho \cdot g \cdot \sin(\beta)}{3 \cdot \mu} \cdot \left(\frac{3}{2 \cdot H^3}\right) \cdot (H \cdot (H - h_c)^2 - \frac{1}{3}(H - h_c)^3) \quad (5.12)$$

$$Q = H \cdot w \cdot \left(\frac{H^2 \cdot \rho \cdot g \cdot \sin(\beta)}{3 \cdot \mu}\right) \cdot \left(\frac{3}{2 \cdot H^3}\right) \cdot (H \cdot (H - h_c)^2 - \frac{1}{3}(H - h_c)^3) \quad (5.13)$$

De manera similar que en la colada a3, para determinar la velocidad, hay que calcular el *yield strength* con la ecuación (3.8) y h_c con la ecuación (3.20), en los distintos perfiles realizados a lo largo de las coladas. Para esto, se midieron los anchos del levée de cada perfil y se calculó el promedio de estos. En los casos que no estuvieran bien definidos se procedió de la misma manera que para el Ajata inferior (Anexo D). La pendiente utilizada en cada perfil fue la obtenida anteriormente.

El valor del *yield strength* para esta colada corresponde a (fig. 5.60):

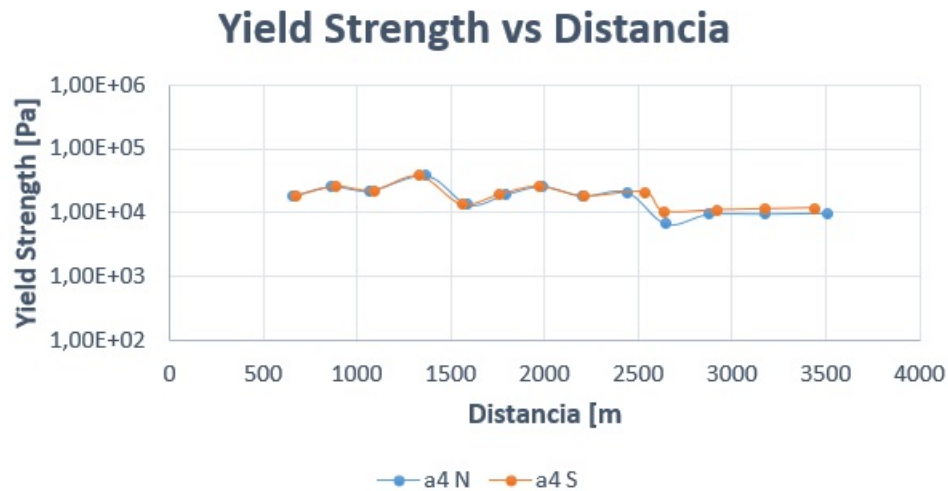


Figura 5.60: Gráfico del *yield strength* vs. el largo de la colada Ajata superior. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.

- 1^{er} Caso de viscosidad

Para este caso, los gráficos de la velocidad y tasa eruptiva vs. el largo de la colada se ilustran en las figuras 5.61 y 5.62 respectivamente:



Figura 5.61: Gráfico de la velocidad vs.. largo de la colada Ajata superior, para el primer caso de viscosidad. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.



Figura 5.62: Gráfico de la tasa eruptiva vs.. largo de la colada Ajata superior, para el primer caso de viscosidad. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.

Se observa una disminución abrupta de la velocidad en el tercer perfil a causa de los espesores bajos y de que el h_c es muy cercano a estos. Luego volvió a aumentar debido al aumento del espesor, pero sufre ciertos cambios a lo largo del flujo debido a los cambios de espesor, hasta cuando llega a la zona de dispersión donde la velocidad aumenta de manera más notoria en el sector sur y en el frente del sector norte causado principalmente porque el espesor en esa zona se duplica. La tasa eruptiva posee un comportamiento similar pero se ve influenciada por el ancho. Para este caso, con este modelo, la erupción tuvo una duración de 110 años para el Ajata superior. Esta cantidad de años se debe a las bajas velocidades al principio de la colada a causa de los bajos espesores medidos.

- 2^{do} caso de viscosidad

Los valores de la velocidad y tasa eruptiva de las coladas graficados corresponden a (fig.

5.63 y 5.64):

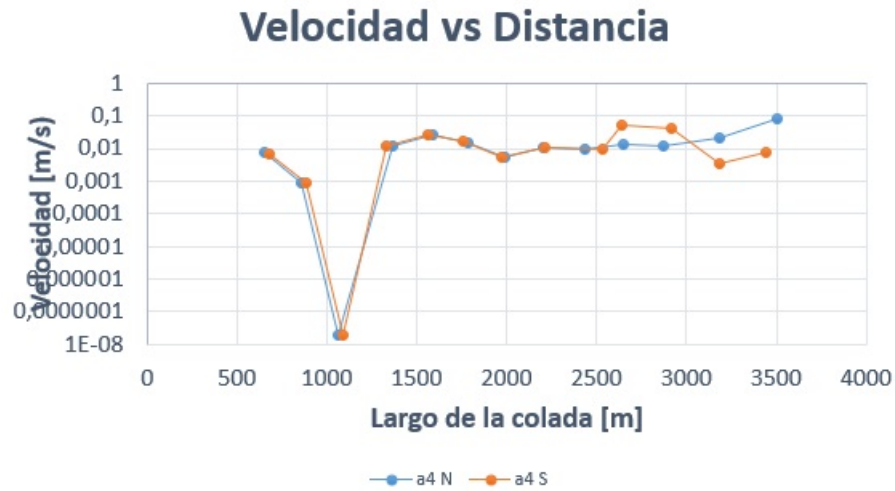


Figura 5.63: Gráfico de la velocidad vs. largo de la colada Ajata superior, para el segundo caso de viscosidad. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.

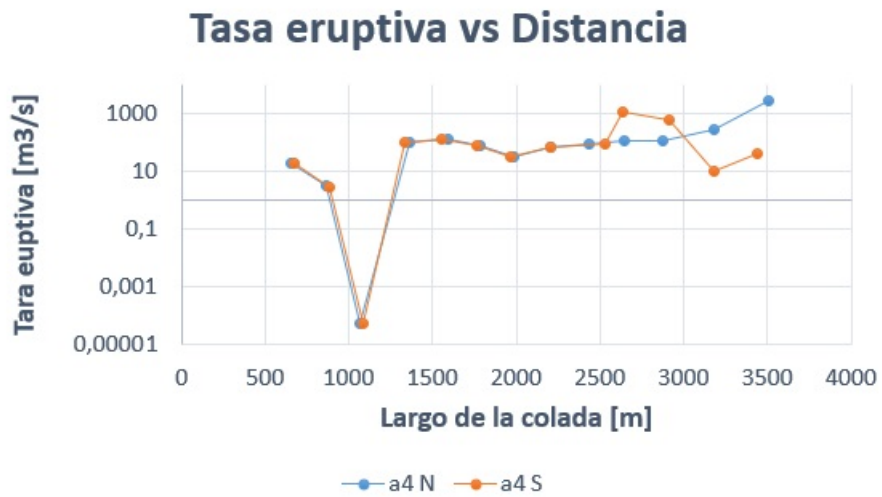


Figura 5.64: Gráfico de la tasa eruptiva vs. largo de la colada Ajata superior, para el segundo caso de viscosidad. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.

En este caso, la velocidad y tasa eruptiva se comportan de manera similar al caso anterior, solo que los valores son más pequeños, debido a que las viscosidades son mayores. La duración de las erupciones en este caso es de 346 años para la colada a4. Esta larga duración que entrega este modelo se debe a las bajas velocidades calculadas al comienzo de la erupción.

- 3^{er} caso de viscosidad

La velocidad y tasa eruptiva de las coladas en este caso son (fig. 5.65 y 5.66):

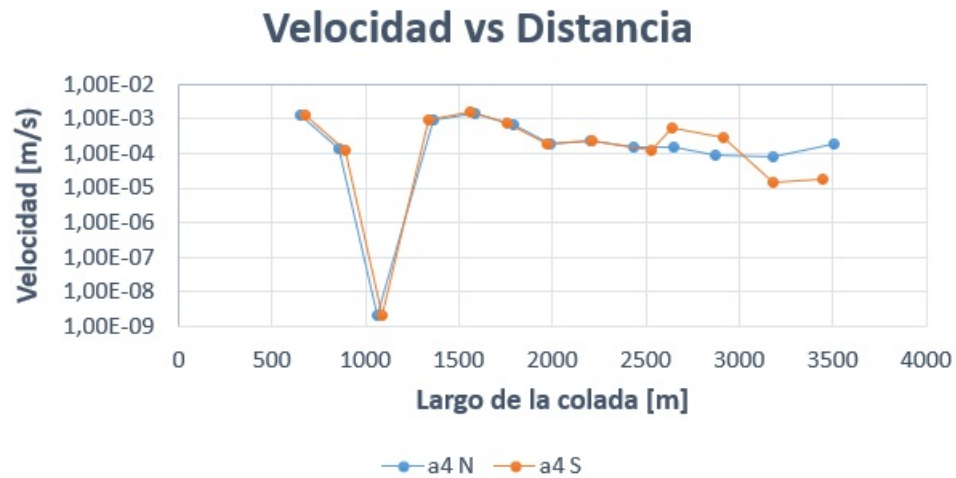


Figura 5.65: Gráfico de la velocidad vs. largo de la colada Ajata superior, para el tercer caso de viscosidad. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.

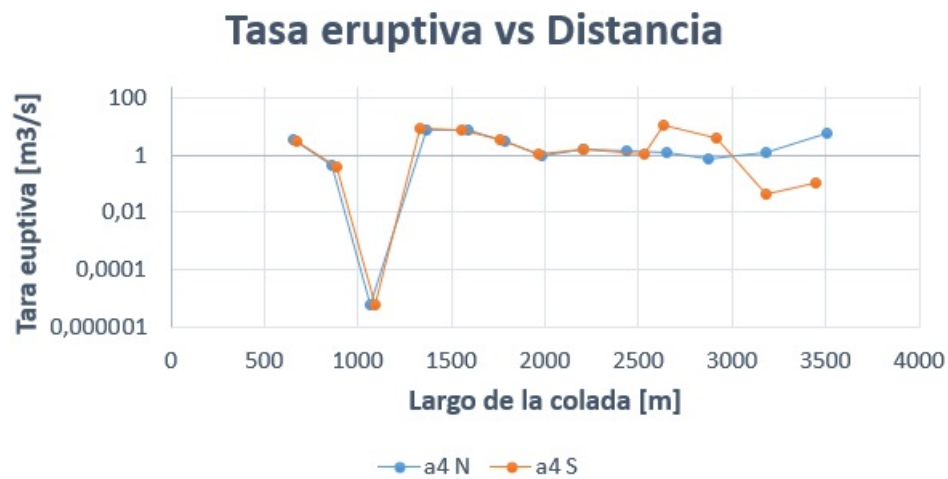


Figura 5.66: Gráfico de la tasa eruptiva vs. largo de la colada Ajata superior, para el tercer caso de viscosidad. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.

La velocidad y tasa eruptiva tienen un comportamiento muy similar a los casos anteriores, solo que desde el cuarto punto en vez de mantenerse constante, tienden a disminuir debido al crecimiento exponencial de la viscosidad. El tiempo de duración que entrega este modelo para esta colada es de 3100 años. Al igual que los casos anteriores, estos tiempos tan grandes se deben a las bajas velocidades del comienzo del flujo.

5.5.2.3. Caso Herschel-Bulkley

Para la utilización de este modelo, se requiere que la relación de aspecto “ancho/espesor” de la colada sea lo suficientemente grande como para que los efectos de la pared se puedan despreciar (Castruccio et al., 2014). La velocidad se determinó con la ecuación (3.21) mientras que la tasa eruptiva se calculó con la ecuación (3.12) reemplazando la velocidad. Tales ecuaciones corresponden a:

$$\vec{v} = \frac{H^2 \cdot \rho \cdot g \cdot \sin(\beta)}{3K} \cdot \left(\frac{3n}{H^3 \cdot (n+1)} \left(\frac{\rho \cdot g \cdot \sin(\beta)}{K} \right)^{\frac{(1-n)}{n}} \right) \cdot \left(H \cdot (H-h_c)^{\frac{n+1}{n}} - \frac{n}{2n+1} (H-h_c)^{\frac{2n+1}{n}} \right) \quad (5.14)$$

$$Q = \frac{H^3 \cdot w \cdot \rho \cdot g \cdot \sin(\beta)}{3K} \cdot \left(\frac{3n}{H^3 \cdot (n+1)} \left(\frac{\rho \cdot g \cdot \sin(\beta)}{K} \right)^{\frac{(1-n)}{n}} \right) \cdot \left(H \cdot (H-h_c)^{\frac{n+1}{n}} - \frac{n}{2n+1} (H-h_c)^{\frac{2n+1}{n}} \right) \quad (5.15)$$

Del mismo modo que en el caso Bingham, se determinó el *yield strength* y se midieron las dimensiones de la colada de lava y los levées. Con esto se determinó los parámetros eruptivos para la colada a4.

En este modelo los valores de viscosidad determinados anteriormente se utilizan para la consistencia. Además, hay que determinar el valor de n, el cual es requerido para la determinación de los parámetros eruptivos. Para calcularlo se cuenta con la fórmula (3.4).

Se utilizó un $\phi_m = 0,6$, por lo que ϕ_c equivale a 0,264; mientras que el ϕ que se utilizó fue variando dependiendo el caso, como se mencionó anteriormente. Por lo tanto, el parámetro n va variando.

- 1^{er} caso de viscosidad

El valor de n para cada sector de la colada en este caso es igual a 1. Con esto se pudo determinar los parámetros eruptivos para la colada. Los cuales, graficados se muestran en las figuras 5.67 y 5.68:

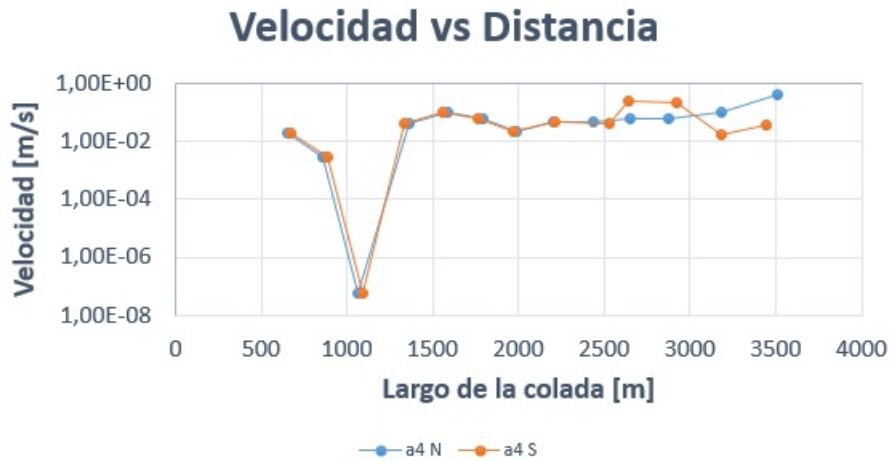


Figura 5.67: Gráfico de la velocidad vs. largo de la colada Ajata superior, para el primer caso de viscosidad. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.

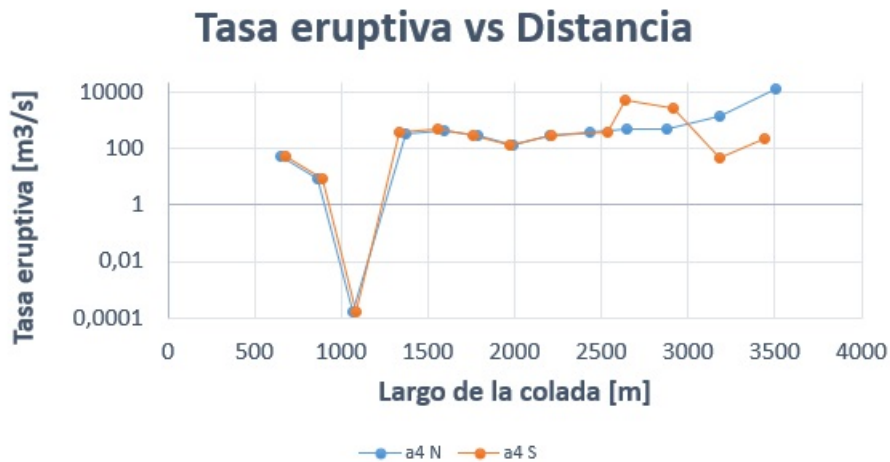


Figura 5.68: Gráfico de la tasa eruptiva vs. largo de la colada Ajata superior, para el primer caso de viscosidad. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.

Este caso es igual al de Bingham en el primer caso de viscosidad, debido a que el valor de $n = 1$, por lo que la fórmula para determinar la velocidad es la misma y con ello la tasa eruptiva igual. El tiempo de duración que entrega este modelo también es el mismo, 110 años.

- 2^{do} caso de viscosidad

En este caso los valores de n varían entre $[0,65-0,97]$. Por lo que, los valores de los parámetros eruptivos graficados vs. el largo de la colada se ilustran en las figuras 5.69 y 5.70:

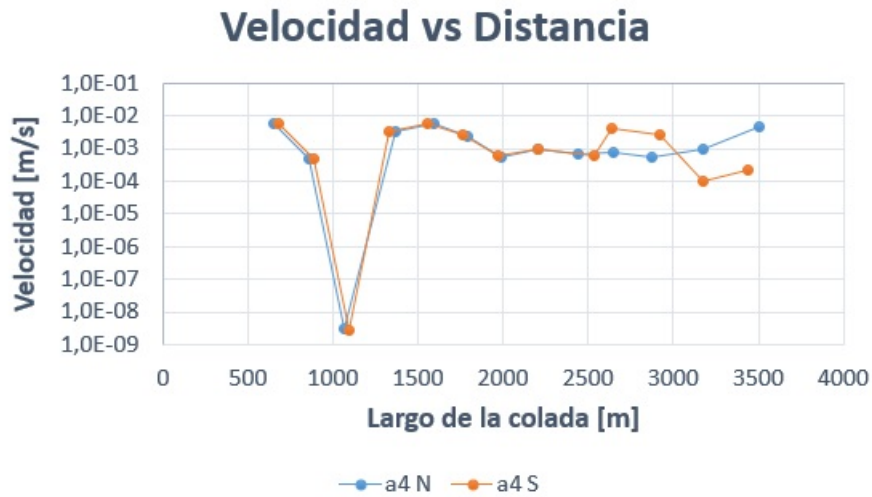


Figura 5.69: Gráfico de la velocidad vs. largo de la colada Ajata superior, para el segundo caso de viscosidad. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.

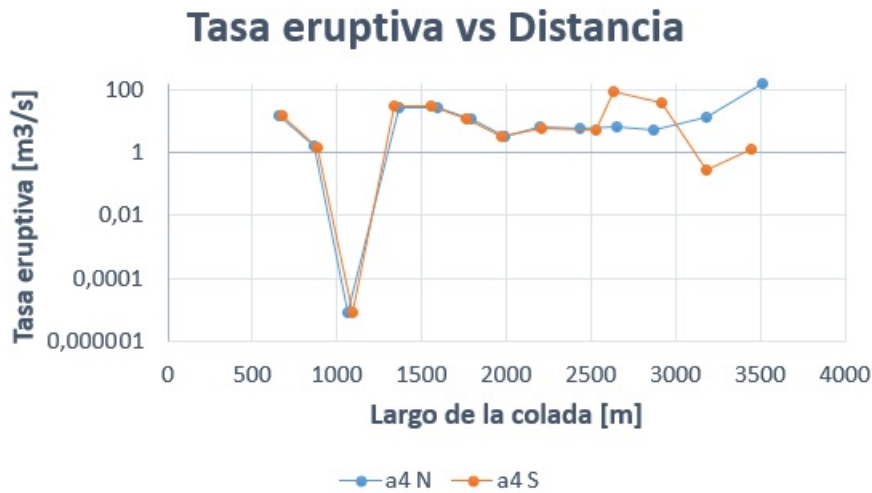


Figura 5.70: Gráfico de la tasa eruptiva vs. largo de la colada Ajata superior, para el segundo caso de viscosidad. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.

Al comienzo disminuye su velocidad a valores muy bajos debido a que el valor de h_c es muy cercano al del espesor de la colada. Luego aumenta su velocidad abruptamente a causa del aumento de los espesores, para posteriormente ir disminuyendo su velocidad debido al crecimiento exponencial de la consistencia. La colada a4 S vuelve a sufrir un aumento en la velocidad llegando a la zona de dispersión y la colada a4 N también pero en el frente del flujo. Esto se debe exclusivamente a que el espesor de la colada aumenta al doble. Para este modelo y en este caso, la erupción duró 2370 años. La larga duración está relacionada a las bajas velocidades al comienzo de la erupción.

- 3^{er} caso de viscosidad

Para este caso, el valor de n de la colada varía entre $[0,31-0,63]$. Por lo tanto, los valores de la velocidad y tasa eruptiva graficados vs. el largo de la colada se ilustran en las figuras 5.71 y 5.72:

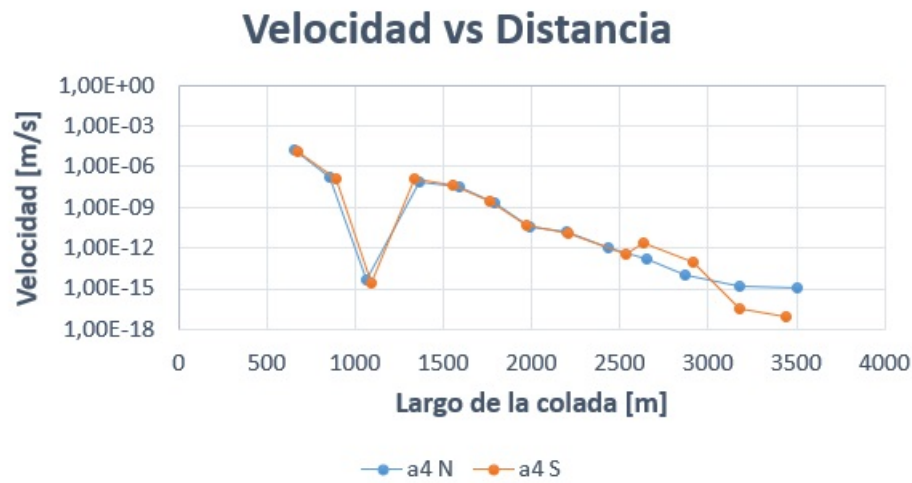


Figura 5.71: Gráfico de la velocidad vs. largo de la colada Ajata superior, para el tercer caso de viscosidad. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.

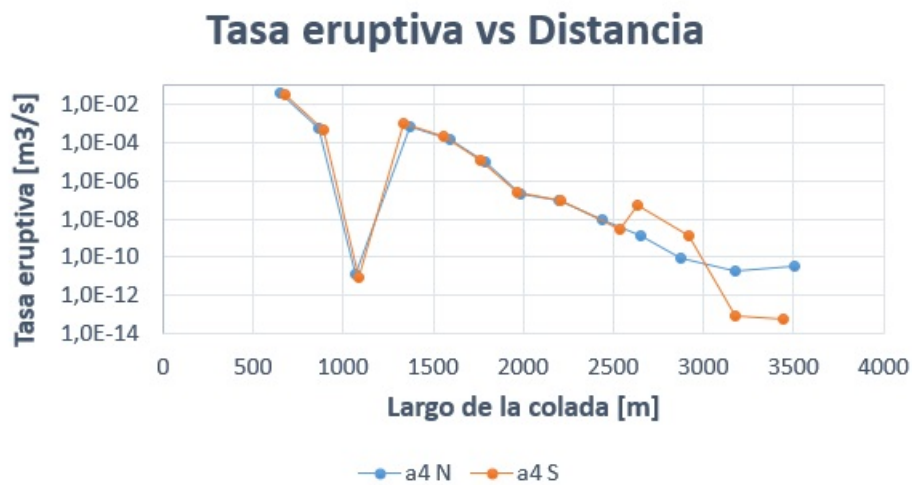


Figura 5.72: Gráfico de la tasa eruptiva vs. largo de la colada Ajata superior, para el tercer caso de viscosidad. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.

La velocidad y tasa eruptiva de la colada a4 tienden a ir disminuyendo desde la fuente hasta el frente, demorándose $1,8 \cdot 10^{10}$ y $1,1 \cdot 10^{12}$ años para el sector norte y sur respectivamente. Esta disminución se debe principalmente al crecimiento exponencial que posee la viscosidad en este caso y, sus altos valores, implican que la duración de los flujos para este modelo sean muy grandes. Cabe destacar que en el tercer perfil, la velocidad y tasa eruptiva sufren una disminución abrupta a causa de que la altura crítica es muy cercana al espesor de

la colada.

5.5.2.4. Caso yield strength en la corteza

Para poder determinar los parámetros eruptivos de este caso, se utilizó la ecuación (3.26). En esta ecuación se reemplazó el volumen por $V_i = W_i \cdot H_i \cdot L_i$, con W el ancho, H el espesor y L el largo de la colada. Luego se despejó el espesor obteniendo:

$$H = \sqrt{\frac{\tau_{ci} \cdot \sqrt{k \cdot t}}{\rho \cdot g \cdot \text{sen}(\beta_i)}} \quad (5.16)$$

Se contaba con los datos de los espesores medidos en cada perfil, por lo que se ajustó un valor del *yield strength* en la corteza que fuera razonable y entregara un número de Graetz cercano a los 300 en el frente de la colada. También se ajustaron valores del tiempo para que los espesores calculados pudieran concordar con los datos de los espesores medidos. Para esto, había una condición que cumplir: que el tiempo siempre fuera mayor al tiempo anterior, debido a que ese tiempo representa al tiempo del crecimiento de la corteza proveniente de la ecuación (3.24) y es un tiempo acumulativo.

El valor del *yield strength* en la corteza fue constante a lo largo de todo el flujo y su valor es de $1,55 \cdot 10^6$ Pa. Luego, se prosiguió a determinar la velocidad con $v = \frac{\text{DistanciaPorTramo}}{\text{TiempoPorTramo}}$ y se determinó la tasa eruptiva con la fórmula (3.12). En este modelo no se requiere de la viscosidad, por lo que solo hay un caso. Los valores de los parámetros eruptivos graficados vs. el largo de la colada corresponden a (fig. 5.73 y 5.74):

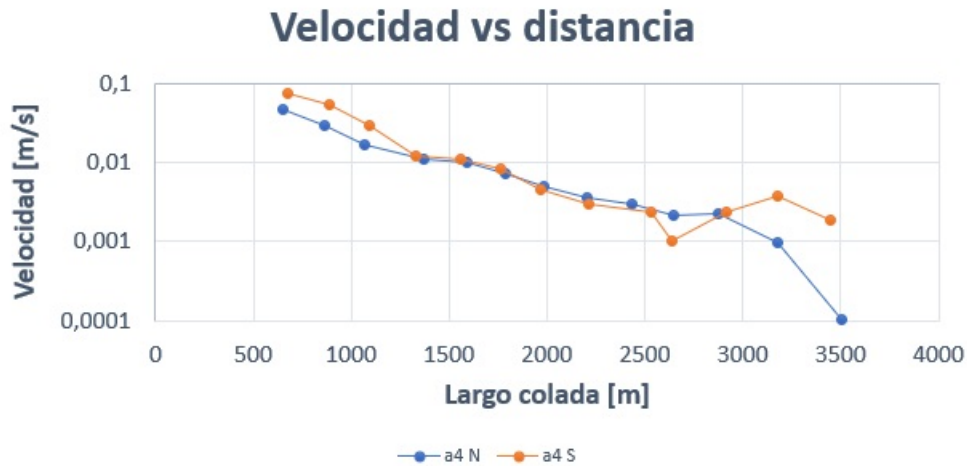


Figura 5.73: Gráfico de la velocidad vs. largo de la colada Ajata superior. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.

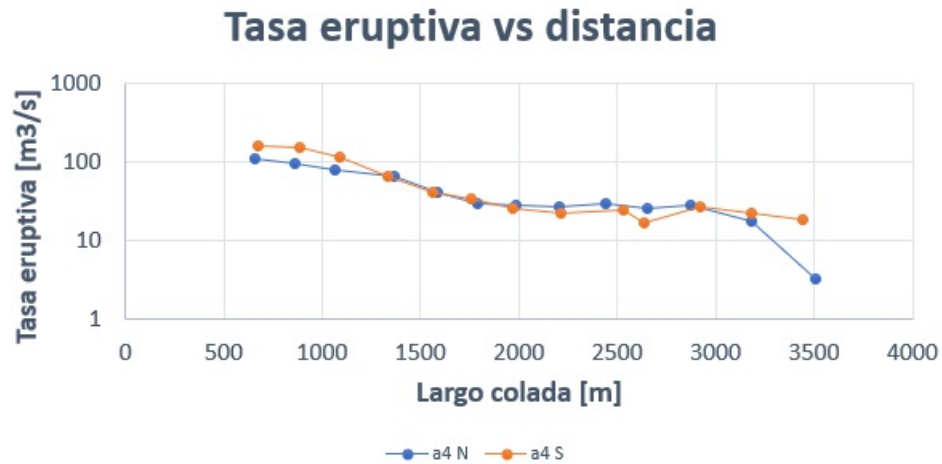


Figura 5.74: Gráfico de la tasa eruptiva vs. largo de la colada Ajata superior. La línea de color azul representa el sector norte de la colada y la de color naranja representa el sector sur de la colada.

La velocidad tiende a ir disminuyendo desde la fuente hasta el frente debido a que los espesores van aumentando hacia el frente y el tiempo que tarda en que la colada alcance esos espesores es cada vez mayor. De manera similar ocurre con la tasa eruptiva ya que está principalmente influenciada por la velocidad. La duración de la erupción corresponde a 45 y 9 días para el sector norte y sur de la colada a4.

En las figuras 5.75 y 5.76 se presentan dos gráficos que resumen las velocidades y tasas eruptivas promedio para las distintas combinaciones de los modelos utilizados en los tres casos de viscosidad para el flujo norte y sur de la colada Ajata superior.

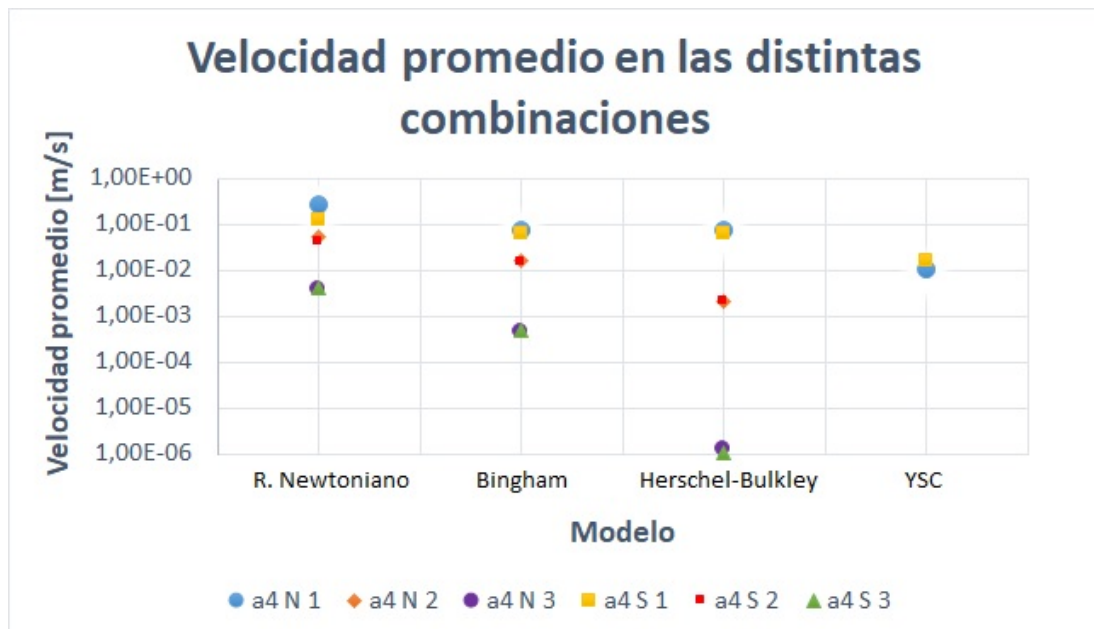


Figura 5.75: Gráfico de la velocidad promedio para los distintos modelos en el 1^{er}, 2^{do} y 3^{er} caso de viscosidad de la colada Ajata superior.

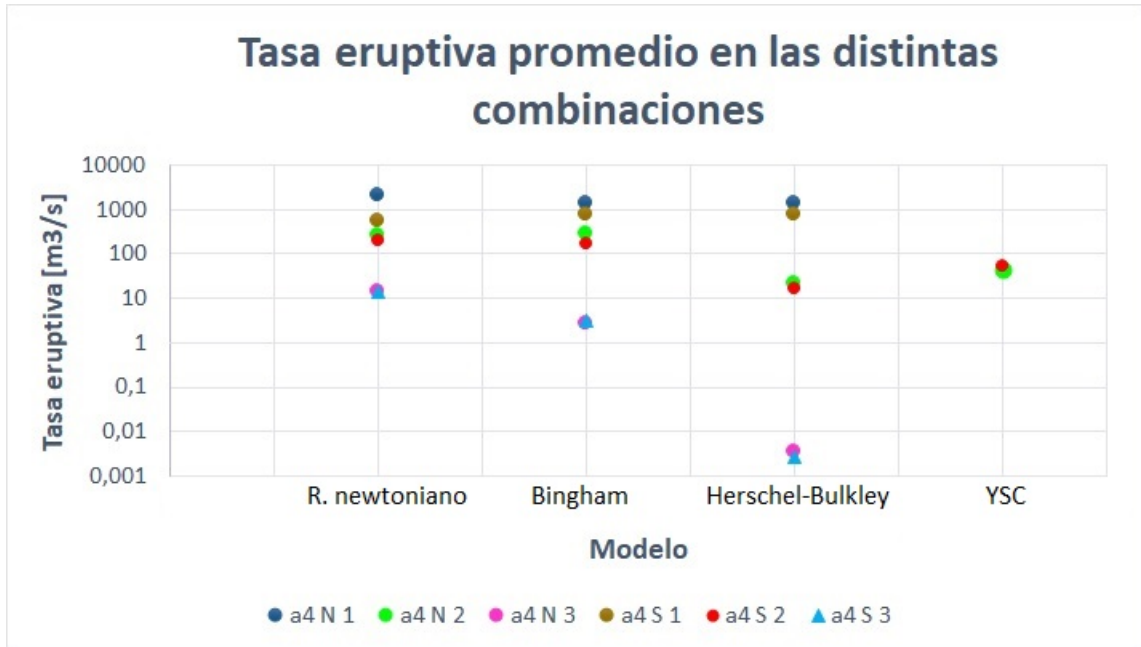


Figura 5.76: Gráfico de la tasa eruptiva promedio para los distintos modelos en el 1^{er}, 2^{do} y 3^{er} caso de viscosidad de la colada Ajata superior.

Capítulo 6

Discusión

6.1. Fuentes de error

6.1.1. Topografía previa

No es posible saber con certeza la topografía a través de la cual fluyó la colada de lava, pues esta se encuentra cubierta tanto por la lava como por material que se depositó con posterioridad. Esto dificulta la determinación de la pendiente de la superficie por la que el flujo se desplazó.

Cabe destacar que en este trabajo se midió la pendiente por el centro de la colada y no por el borde externo de esta, por lo tanto no entrega un valor exacto. Es posible que el espesor del flujo haya ido aumentando hacia el frente por acumulación de lava, disminuyendo así la pendiente, pero puede que la pendiente original del valle no haya disminuido. Por esta razón, se realizó la medición de la pendiente de la superficie en el lado externo de los flujos, lo que permitió comparar estos valores con los calculados anteriormente. Se pudo observar que hay una diferencia de entre $0,1^\circ$ y 3° como máximo, lo cual no es tan significativo, ya que la variación de la tasa eruptiva promedio es de aproximadamente $3 \text{ m}^3/\text{s}$ como máximo, por lo que se decidió dejar los resultados con los valores de la pendiente antes determinados.

Pero además, la incerteza de cómo era la topografía previa también genera un porcentaje de error en el espesor de las coladas. Este error es distinto para cada colada, pues la Ajata inferior se desplazó por sobre otro flujo (a2) del cual se puede ver su contacto en la mayoría del sector este, implicando que el espesor medido a lo largo del flujo tenga una incerteza baja ($\sim 3\%$). Mientras que, la Ajata superior, en la mayoría de su recorrido, se desplazó por un valle, por lo que su incerteza es un poco mayor. Debido a la dificultad de saber cómo era ese valle, es que se observaron otros valles en el volcán para ver su topografía, especulando que estos se asemejan. Los otros valles son casi totalmente planos, por lo tanto, el error de los espesores de las coladas se estima en 1-2 m ($\sim 12\%$).

6.1.2. Relleno posterior

Fue posible notar que, en ambas coladas de Ajata estudiadas, hay material fino no consolidado de tamaño ceniza-lapilli que se encuentra en la base de los flujos, cubriendo así, parte de su espesor. Este podría corresponder a un depósito de lahar y/o a material transportado por

un flujo piroclástico. Hacia el norte de la colada Ajata superior, se puede observar con mayor claridad que hay una deposición de material de color más oscuro a la superficie del sector, la cual proviene del edificio volcánico. Esto se comprobó debido a que el espesor del levée norte venía aumentando hacia el frente, hasta un punto donde disminuyó abruptamente de 15 m a 7 m sin haber un aumento en la pendiente que hubiese generado esa disminución. Esta deposición se asoció a un posible paso de un lahar, ya que el material es fino y subredondeado.

Esta fuente de error también produce una incerteza en el espesor real que tiene la colada de lava, lo cual genera una subestimación de esta. Esta subestimación se pudo cuantificar en la zona norte de la colada Ajata superior. Para esto se realizó un gráfico del espesor vs. la distancia, como se ilustra en la figura 6.1, en donde se graficaron los espesores reales. Luego se graficaron solo los espesores que tienden ir en aumento hacia el frente, omitiendo los puntos en donde los espesores disminuyen, y se obtuvo la ecuación de la línea de tendencia lineal. Con esta ecuación se calcularon los espesores en los puntos que disminuían y se obtuvo que la subestimación es de 15 m aproximadamente, lo que equivale a un error de \sim un 60 % en esa zona y de \sim un 30 % a lo largo de todo el flujo. Esto arrastra un porcentaje de imprecisión en los cálculos del volumen y de los parámetros eruptivos.



Figura 6.1: Gráfico del espesor vs. la distancia. La curva azul corresponde al espesor real vs. la distancia. La curva naranja corresponde al espesor real vs la distancia pero se omiten los puntos en donde el espesor disminuye. La curva gris corresponde al espesor calculado vs. la distancia.

6.1.3. Resolución del DEM

El DEM que se utilice también es relevante para las fuentes de error, pues dependiendo de la precisión que este tenga, es la incerteza que generará en la determinación de las dimensiones. Un DEM con buena precisión disminuye el margen de error y si además posee alta resolución permite la identificación de morfologías y texturas con mayor claridad.

La mayoría de los modelos de elevación digital satelitales no tienen una buena precisión y resolución, es por eso que se decidió tomar imágenes con un dron y crear un DEM con ellas. Se realizó una comparación de resolución (fig. 6.2) y de precisión (fig. 6.3) entre el DEM Copernicus, hecho con los satélites TanDEM-X y TerraSAR-X entre el 2011 y el

2014, el cual tiene una precisión de 2-3 m en la vertical y una resolución de 30 m/píxel, el DEM TanDEM-X hecho por el satélite TanDEM-X y TerraSAR-X con una precisión de 2-3 m y una resolución de 12 m/píxel y el DEM realizado por las imágenes aéreas tomadas por un dron que posee una precisión del orden de los 10 cm con una resolución 9,58 cm/píxel.

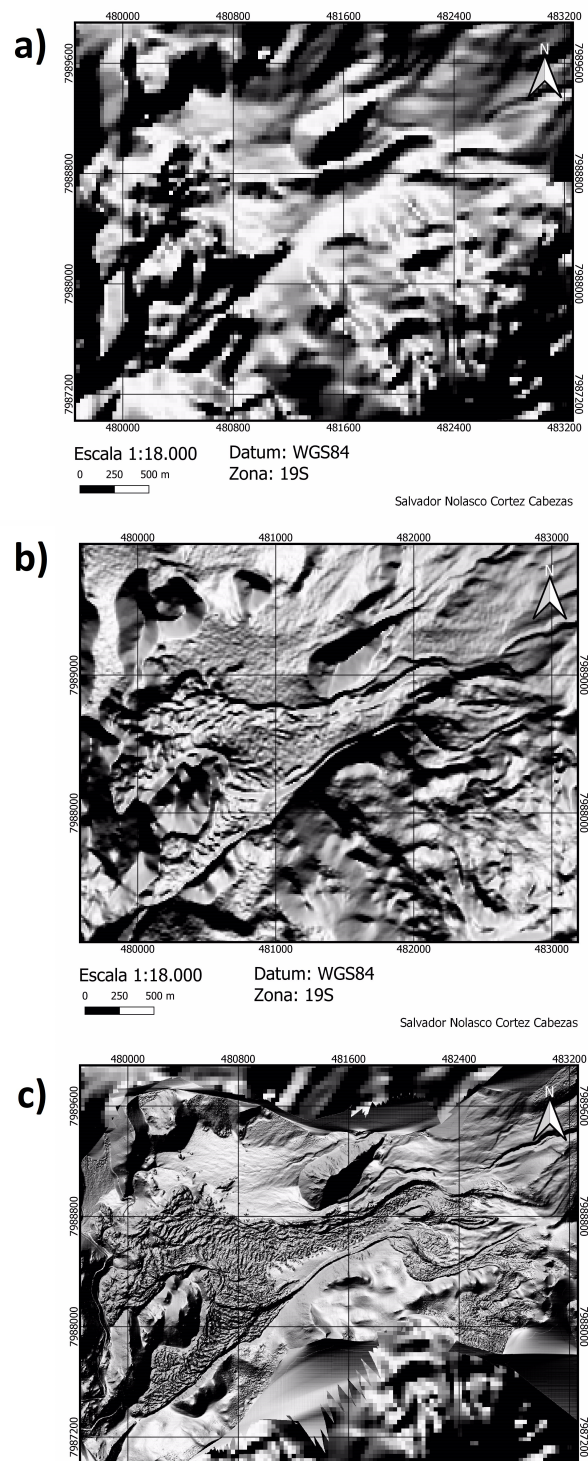


Figura 6.2: Mapas de la colada Ajata superior con: a) DEM Copernicus, b) DEM TanDEM-X, c) DEM creado con las imágenes del dron.

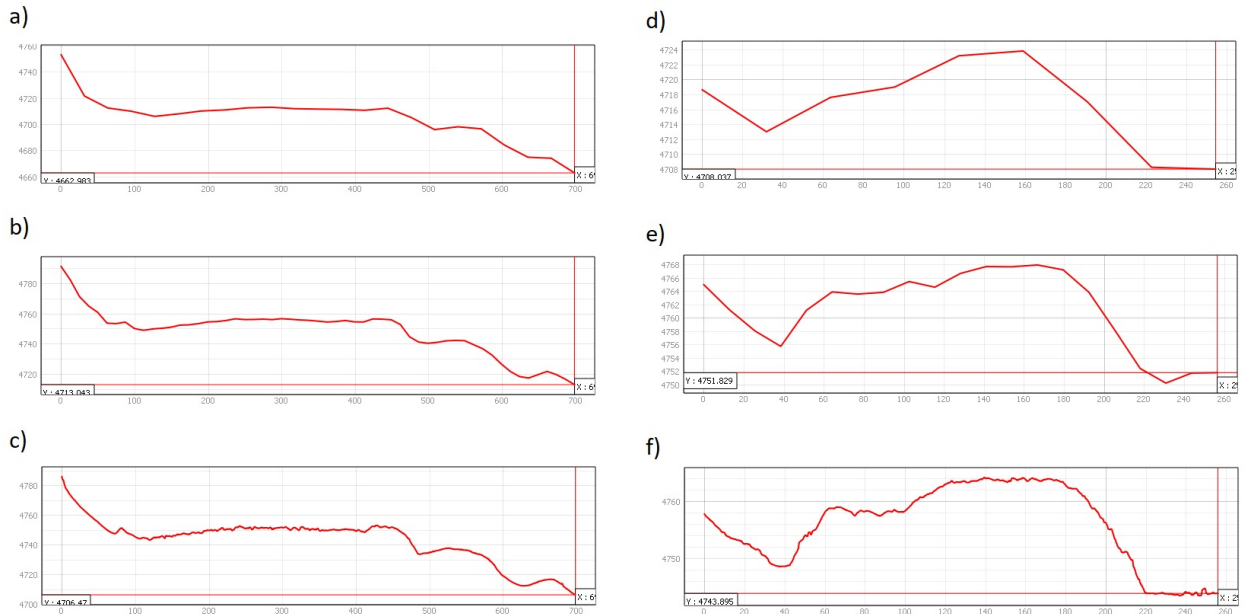


Figura 6.3: Muestra dos perfiles de la colada Ajata inferior, el perfil 8 (a, b y c) y 18 (d, e y f), en los distintos DEM, DEM Copernicus(a y d), DEM TanDEM-X (b y e) y DEM creado con las imágenes del dron (c y f).

Se puede apreciar notablemente la diferencia en la nitidez entre las imágenes de la figura 6.2, lo que demuestra lo importante que es la precisión del DEM a utilizar para apreciar de mejor manera las morfologías y texturas de las lavas. Por su lado, en la figura 6.3 se observa lo relevante que es la resolución del DEM para la medición de dimensiones de las coladas de lava como el largo, ancho y espesor, ayudando a que la incerteza de las dimensiones sea menor.

6.2. Modelos utilizados

En este trabajo, se utilizaron 4 modelos para estimar los parámetros eruptivos y su evolución en el tiempo de dos flujos de lava del volcán Parinacota (Ajata inferior (a3) y Ajata superior(a4)), los cuales están fechados de $4,8 \pm 4,0$ ka y $2,6 \pm 1,3$ ka respectivamente. Tales modelos se diferencian en qué domina la dinámica del flujo, si el *yield strength* en la corteza o si la reología interna y el cómo considerar el comportamiento del fluido en el caso que domine la reología interna, si como newtoniano, Bingham o Herschel-Bulkley.

Para decidir cuál régimen es el que mejor representa el comportamiento de las coladas de lava se compararon los resultados obtenidos en los distintos modelos con los rangos entregados en el trabajo de Pinkerton y Wilson (1994), en el cual se entregan los valores representativos de distintas propiedades, parámetros eruptivos y dimensiones de las coladas de lava dependiendo de sus composiciones químicas (basáltica, andesítica, riolítica) (tabla 6.1).

Tabla 6.1: Propiedades físicas y dimensiones de las lavas con sus rangos de valor esperados para distintas composiciones. Modificado de Pinkerton y Wilson, 1994.

	Lava Basáltica	Lava Andesítica	Lava Riolítica
Tasa eruptiva (m^3/s)	$0,1 - 10^3$	0,3-80	1-50
Espesor (m)	1-10	8-800	200-550
Yield Strength (Pa)	$50 - 2,5 \cdot 10^5$	$0,5 \cdot 10^5 - 3,6 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^5 - 3,6 \cdot 10^5$
Viscosidad Aparente ($Pa \cdot s$)	$200 - 2,3 \cdot 10^5$	$10^5 - 10^9$	$10^8 - 10^{12}$

La colada a3 posee una composición de traquiandesita basáltica, pero esta no aparece en la tabla de Pinkerton y Wilson (1994). Es por eso que para corroborar los parámetros eruptivos se considera que está entre la transición de composición basáltica y andesítica. Por otro lado, la colada a4 tiene una composición de traquiandesita, la cual, en el diagrama TAS, se encuentra sobre la composición andesítica, es decir, con similar contenido de sílice pero mayor contenido de álcalis, es por eso que para relacionarlo en la tabla de Pinkerton y Wilson (1994) se asimila a la composición andesítica.

Complementando lo anterior y, de acuerdo a lo propuesto por Castruccio et al. (2013), otra manera de clasificar la dinámica de las lavas puede ser de acuerdo a la tasa eruptiva, su duración y al contenido de cristales. Por ejemplo, las erupciones de corta duración y alta tasa eruptiva se encuentran dominadas por la reología interna interna de la lava, como lo es el modelo newtoniano, Bingham o Herschel-Bulkley, mientras que las erupciones de larga duración, con una baja tasa eruptiva, se encuentran controladas por el *yield strength* en la corteza en crecimiento. Por otro lado, las coladas de lava del tipo de bloques, con un alto contenido cristalino inicial pero con una baja tasa eruptiva, estarían dominadas por el *yield strength* del interior de la lava. Según Harris y Rowland (2009), esto se debe a que altas tasas de efusión tienden a reducir la pérdida de calor por distancia recorrida, evitando que crezca una corteza y favoreciendo así que el flujo esté controlado por la viscosidad.

Las texturas y estructuras presentes en los flujos también sirven de indicador del régimen dinámico que controla el avance de las coladas. Por ejemplo, la presencia de espinas es indicativa de que el núcleo se encuentra a una mayor temperatura que la corteza y que debido a efectos de la presión en el interior, la lava atraviesa la corteza fría quedando expuesta a superficie y enfriándose rápidamente, adquiriendo esa forma. Las ojivas también son otro indicativo de la presencia de una corteza fría en el flujo que influye en su avance, pues estas se formarían por el movimiento interno de la lava que arrastró y arrugó la corteza que se encontraba más fría (Gho, 2013).

Por otro lado, en el caso que las coladas estuvieran dominadas por la reología interna, se realizaron 3 métodos para poder comparar los resultados que nos entregaba cada uno de ellos y así poder escoger el comportamiento más adecuado. Entre ellos está: el caso newtoniano que se caracteriza por no requerir una tensión de corte para que el fluido comience a avanzar; el de Bingham, el cual en muchos estudios fue utilizada (Robson, 1967; Hulme, 1974; Negro et al. ., 2008), pues considera el límite elástico pero, no tiene presente la velocidad de deformación de la viscosidad (Pinkerton y Norton, 1995; Caricchi et al., 2007; Lavallée et al., 2007; Ishibashi, 2009); mientras que el modelo reológico de Herschel-Bulkley se considera el más adecuado

para determinar los parámetros eruptivos de las coladas, debido a que incorpora tanto el límite elástico como los efectos de adelgazamiento por cizallamiento (Castruccio et al., 2014), considerándose así como el que mejor representa un comportamiento no-newtoniano.

6.3. Comparación de modelos

6.3.1. Contenido de cristales

El contenido de cristales es muy relevante pues, la cristalización aumenta la viscosidad de la lava y el grado de subenfriamiento afecta la tasa de cristalización (Pinkerton y Norton, 1995).

Debido a que no se pudieron obtener los cortes transparentes de las muestras tomadas en terreno, se optó por dos métodos. El primero que se realizó fue a muestra de mano, en donde se utilizó como valor de contenido de cristales a todos los fenocristales > 1 mm. El segundo consistió en una fórmula propuesta por Castruccio et al. (2014) que determina el contenido de microfenocristales con el largo de la distancia.

$$\phi = 0,32 + 0,28 \cdot (1 - e^{\frac{-x}{1,21}}) \quad (6.1)$$

Cabe destacar, que los valores 0,32, 0,28 y 1,21 son parámetros particulares del flujo de lava este del volcán Etna de la erupción del 2002, por lo que estos pueden ser distintos en otros flujos de lava de distinta composición y/o de distinto tipo. A esta fórmula se le realizaron dos modificaciones, obteniendo así 3 casos para poder determinar el contenido de cristales y tener un mayor rango para la viscosidad que posee la colada de la que no se sabe con exactitud su valor.

- Caso 1

$$\phi = 0,28 \cdot (1 - e^{\frac{-x}{1,21}}) \quad (6.2)$$

Este caso no es tan representativo, pues considera que el magma llega a la superficie sin ningún contenido de cristales, es decir, que solo comienza a cristalizar una vez que llega a la superficie y, según lo propuesto por Lipman et al. (1985) y Lipman y Banks (1987), los fenocristales se forman en profundidad y los microfenocristales experimentan crecimiento y nucleación en el ascenso del magma durante una erupción.

- Caso 2

$$\phi = \text{fenocristales} + 0,28 \cdot (1 - e^{\frac{-x}{1,21}}) \quad (6.3)$$

En este caso, se considera que el magma llega a la superficie sólo con fenocristales y que posteriormente comienzan a cristalizar los microfenocristales.

- Caso 3

$$\phi = 0,32 + 0,28 \cdot (1 - e^{\frac{-x}{1,21}}) \quad (6.4)$$

Castruccio et al. (2014) utilizaron esta ecuación, considerando solo los microfenocristales, pero en este trabajo consideramos que abarca tanto los microfenocristales como los fenocristales, por temas de simplicidad.

El contenido de fenocristales en las distintas muestras para cada lava no varía mucho, por lo que se considera que estos son estables con un $\phi=0,07$ para el Ajata inferior y $\phi=0,16$ para el Ajata superior. Cabe destacar que en la colada Ajata inferior, las muestras se obtuvieron cercano a la fuente y en el frente del flujo y del lóbulo, por lo que no se pudo analizar la zona de canal estable, la transicional ni la de dispersión del flujo principal, implicando una falta de representatividad para la obtención del contenido de cristales en todo el flujo; mientras que en la colada Ajata superior las muestras fueron tomadas en la zona de canal estable, la zona de dispersión y en el frente del sector sur del flujo, lo cual sería más representativo que el caso anterior, pero tampoco se puede observar la evolución del contenido de fenocristales a lo largo de todo el flujo debido a que no hay muestras de la zona transicional ni del frente del sector norte del flujo. Esto debido a que la accesibilidad a algunos sectores era muy compleja.

Es importante señalar que estos métodos dejaron fuera a los microlitos que se encuentran en la masa fundamental ($< 0,1$ mm), tanto los que estaban ya cristalizados, los cuales sí modifican la consistencia para las coladas, como los que cristalizaron con posterioridad a que el frente de lava pasara por la zona donde formó el levée. Estos cristales no se consideraron para el valor de ϕ debido a que no eran visibles a muestra de mano y no se contaba con los cortes transparentes, los cuales se podrían haber observado en microscopio óptico. Por lo tanto, el real contenido de cristales de las coladas está subestimado.

Este es un punto importante porque la cantidad de cristales que no se consideró al excluir los microlitos sí puede haber variado la viscosidad de la lava, pues, Lipman et al. (1985) y Lipman y Banks (1987) indican que los microlitos experimentan nucleación durante el avance del flujo de lava. Por otra parte, Crisp et al. (1994) indican que los microfenocristales sí van aumentando su contenido en la parte inicial de la erupción, a causa de la desgasificación del magma, con una tasa de crecimiento (G) de $10^{-7} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ y una tasa de nucleación (J) de $10^5 \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$.

También es posible que haya habido errores de operador en el conteo de los fenocristales, ya que puede que no se hayan contabilizado ciertos fenocristales. Otra imprecisión puede haberse producido debido a que la fórmula utilizada para determinar los microfenocristales no es una regla general, sino más bien para un flujo de lava de la erupción del 2002 del volcán Etna, por lo que el porcentaje de microfenocristales determinado no es exacto y existe un margen de error. Algo similar ocurre con los otros dos casos derivados de la ecuación, pues son modificaciones que se le realizó a la ecuación para poder obtener otras viscosidades y ver cómo se comportaban las coladas de lava.

6.3.2. Valores de consistencia y yield strength

Anteriormente se mostraron 3 casos de contenidos de cristales, los cuales entregan distintas consistencias. En los tres casos los valores de consistencia se encuentran entre 10^5 a $10^9 \text{Pa} \cdot \text{s}$. Sin embargo, al aplicar estas consistencias a los distintos modelos (newtoniano, Bingham y Herschel-Bulkley) que determinan los parámetros eruptivos, no todos dan resultados concordantes con lo entregado por la literatura.

En la figura 6.4 se presenta un gráfico que muestra los valores de la consistencia promedio para la colada a3 y a4 en los distintos casos de contenido de cristales y cómo estos varían

al aplicarle el error correspondiente asociado a la temperatura ($\pm 71^\circ\text{C}$). Estos valores de consistencia se encuentran dentro de lo establecido por Pinkerton y Wilson (1994) a lavas de composición andesítica.

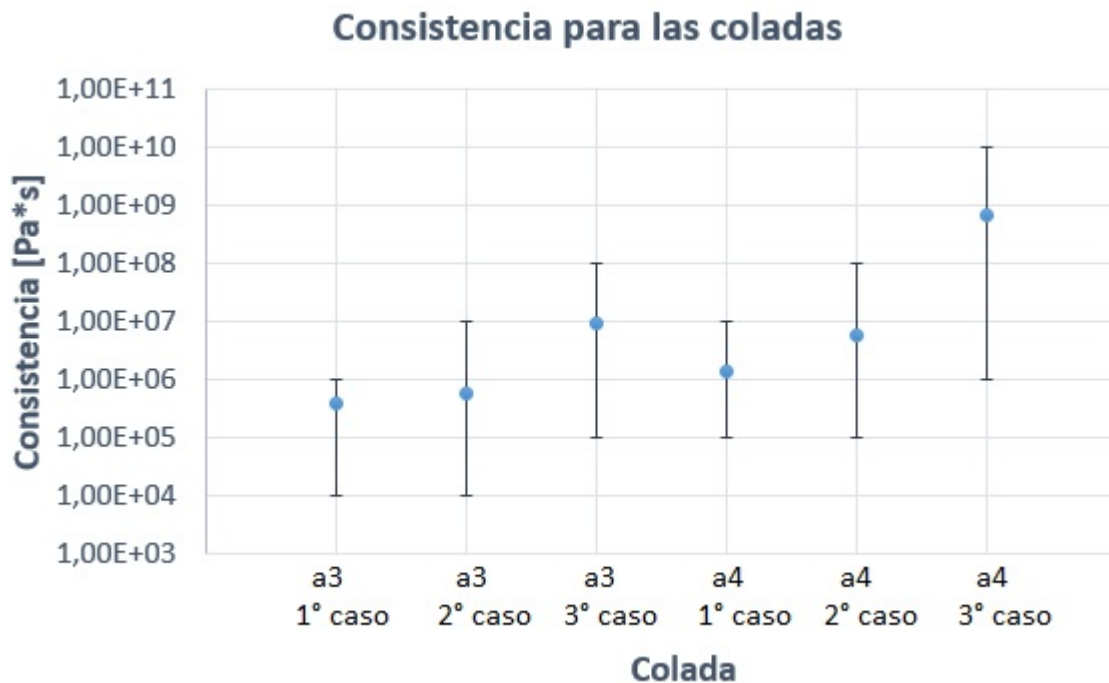


Figura 6.4: Consistencia para cada flujo de lava con sus respectivos errores.

De acuerdo a Castruccio et al. (2014), el desequilibrio del magma en el respiradero, en donde hay una mayor desgasificación y enfriamiento que provoca la cristalización del flujo, es el responsable del aumento de la viscosidad. Pero, existen otros factores que también afectan a las viscosidades de las lavas, como las burbujas. Según Mader et al. (2013), las burbujas y los cristales se comportan muy distintos durante el flujo pues las burbujas son deformables, poseen baja densidad, son poco viscosas y son compresibles, mientras que los cristales poseen densidad similar a la del fundido, son incompresibles, rígidos y con una amplia gama de formas. También indican que es muy relevante considerar las formas y los comportamientos que tienen las burbujas suspendidas en el flujo pues dependiendo de eso es cuánto afecta a la consistencia. Las burbujas alargadas sirven como superficies para un deslizamiento más libre del fluido, mientras que las burbujas esféricas se consideran un obstáculo.

Por otro lado, los valores de *yield strength* para las coladas a3 y a4 se determinaron a partir de la densidad de la lava, la topografía del terreno y los anchos de los levées, en los casos en donde existieran y estuvieran bien definidos. Con los anchos de los levées medidos, se realizó una ecuación que pudiera determinar el ancho de estos con la distancia del flujo para la colada a3 P, a3 B, a4 N y a4 S respectivamente, las cuales se muestran a continuación:

$$y = 0,0124 \cdot x + 20,53 \quad (6.5)$$

$$y = 0,0143 \cdot x + 13,52 \quad (6.6)$$

$$y = 0,0069 \cdot x + 13,23 \quad (6.7)$$

$$y = 0,0094 \cdot x + 10,15 \quad (6.8)$$

Por lo tanto, en los casos donde los límites de los levées no están bien definidos o si no existen levées, se determinó un ancho con las ecuaciones anteriores. Arrojando un *yield strength* promedio de $1,82 \cdot 10^4 Pa$ para el sector norte y $1,89 \cdot 10^4 Pa$ para el sector sur de la colada a4, mientras que para el flujo principal de la colada a3 el *yield strength* es $1,65 \cdot 10^4 Pa$ y para su lóbulo es $3,35 \cdot 10^4 Pa$, en donde solo en algunos casos los valores fueron del orden 10^3 , debido principalmente a las pendientes bajas.

Cabe mencionar que en ambos flujos hubo zonas en donde el levée se veía mejor definido a un lado que el otro, ya sea porque los flujos se encuentran sobre otras coladas de lava que pudieron haber interrumpido la formación del levée o por el paso de algún flujo (posiblemente lahar) que haya erosionado parte de sus dimensiones. Es por esta razón que se utilizaron las dimensiones del sector donde se observaron de manera más evidentes sus límites.

De acuerdo a los valores de *yield strength* presentados por Pinkerton y Wilson (1994), tanto el *yield strength* de la colada Ajata inferior como Ajata superior concuerdan dentro del rango del *yield strength* de una lava de composición basáltica, aunque los valores igual se encuentran dentro de lo estimado para una lava de composición andesítica.

6.3.3. Valores de tasa eruptiva y velocidad

Como se mencionó anteriormente, de los 4 modelos utilizados, solo 3 requieren de la viscosidad, el newtoniano, el Bingham y el Herschel-Bulkley. Por lo tanto, se compararon estos 3 modelos en los distintos casos de viscosidad y el modelo del YSC aparte.

En el 1^{er} caso de viscosidad, al ser los valores de consistencia más bajos, los modelos entregan valores de tasas eruptivas promedio muy altos para la colada a3, por sobre los $10^3 m^3/s$, aunque, en el modelo Bingham y Herschel-Bulkley, en los primeros dos perfiles entregaron valores dentro del rango esperado pero, según lo propuesto por Castruccio et al. (2013), su duración era muy grande (> 30 días) para que dominara la reología interna en la dinámica del flujo.

La colada a4, por su lado, se encuentra bien representada por los modelos de Herschel-Bulkley o Bingham pero solo en los primeros dos perfiles, con una velocidad y tasa eruptiva promedio de $1,12 \cdot 10^{-2} m/s$ y $30m^3/s$ en un tiempo de 1,3 días. Mientras que para el caso newtoniano las tasas eruptivas dan valores muy altos ($> a 3 \cdot 10^2 m^3/s$) con respecto a la literatura.

En el supuesto de que las coladas posean una viscosidad como el segundo caso, para la colada a3, de manera similar que en el primer caso, el modelo newtoniano entrega valores de tasas eruptivas promedio muy altos, por sobre los $10^3 m^3/s$, con tiempos muy pequeños, menores a 4 horas; mientras que los modelos Bingham y Herschel-Bulkley también entregaban tasas eruptivas promedio mayores a $10^3 m^3/s$, aunque, en los primeros dos perfiles, la tasa

eruptiva promedio es de $1,28 \cdot 10^{-1} m^3/s$, pero su duración es muy grande (> 42 días).

A su vez, la colada a4 se encuentra bien representada solo en el primer perfil por el modelo de Herschel-Bulkley con una velocidad de $6,10 \cdot 10^{-3} m/s$, una tasa eruptiva de $15 m^3/s$ y una duración de 1,3 día o por el modelo de Bingham con una velocidad de $7,18 \cdot 10^{-3} m/s$, una tasa eruptiva de $18 m^3/s$ y una duración de 1,1 día; mientras que el modelo newtoniano entrega valores de tasa eruptiva promedio mayores a $2 \cdot 10^2$, lo cual es mayor para su composición de acuerdo a la literatura.

Por último, si las coladas de lavas eran más viscosas como en el tercer caso, los modelos que entregan valores de parámetros eruptivos más coherentes con lo teórico para la colada a3 es el newtoniano con una velocidad promedio de $5,18 \cdot 10^{-2} m/s$ para el flujo principal y $1,17 \cdot 10^{-1} m/s$ para el lóbulo, una tasa eruptiva promedio de $247 m^3/s$ y $255 m^3/s$, y una duración de 14,7 y 2,2 horas respectivamente.

La colada a4 igual se encuentra mejor modelada por el caso newtoniano, pero solo para el primer perfil con valores de velocidad y tasa eruptiva promedio de $6,20 \cdot 10^{-3} m/s$ y $16 m^3/s$ y un tiempo de 1,3 días, pues para los otros perfiles, con este modelo, la duración es muy grande para que dominara la reología interna en el avance de la colada. Los otros modelos fueron descartados por dar tasas eruptivas promedio muy pequeñas en los primeros perfiles (del orden de $10^{-8} m^3/s$) como el caso de Herschel-Bulkley, o porque sus tiempos de duración en los primeros puntos de evaluación eran muy grandes para que controlaran el avance de las coladas (> 6 días), como lo es en el caso Bingham. Además, tanto el modelo Bingham como el Herschel-Bulkley, por sí solos entregan tiempos de duración de la erupción, demasiados grandes ($> a 3000$ años).

Por otro lado, el modelo del régimen dominado por el *yield strength* de la corteza, para la colada a3 entrega una velocidad promedio de $4,83 \cdot 10^{-3} m/s$ para el flujo principal y $2,73 \cdot 10^{-3} m/s$ para el lóbulo implicando una tasa eruptiva promedio de 24,6 y 5,28 m^3/s con un tiempo de duración de aproximadamente 6,9 y 4,5 días respectivamente; mientras que para la colada a4 la velocidad promedio es de $1,07 \cdot 10^{-2} m/s$ para el flujo norte y $1,60 \cdot 10^{-2} m/s$ para el flujo sur, implicando una tasa eruptiva promedio de 43,9 y 54,8 m^3/s con una duración de 45,1 y 9 días, respectivamente. Esta gran diferencia en tiempo de un sector a otro, está relacionada con que el frente del sector norte posee un espesor mayor, lo que le tomó mayor tiempo alcanzarlo. Esto puede estar relacionado a que la lava seguía siendo extruida y, a causa de la topografía, haya seguido su camino por este sector en vez del sur y, debido a la corteza en crecimiento, se impidió el avance de la colada, acumulándose en el frente.

Por lo tanto, de acuerdo a los datos obtenidos en este trabajo y a las morfologías observadas, el modelo que entrega valores más realistas de los parámetros eruptivos y representa de mejor manera toda la evolución de las coladas es el del YSC tanto para la colada Ajata inferior como la Ajata superior. No obstante, cabe destacar, que puede haber una complicación no considerada en la modelación de la tasa de avance de la colada. Se trata de que la reología de la lava puede ir cambiando desde la fuente hasta el frente del flujo, ya que se va enfriando, desgasificando y cristalizando a medida que va fluyendo (Castruccio et al., 2014). Pero, debido a que son lavas no históricas, no es posible verificar si es que tuvo o no cambios de reología y en que momento.

6.3.3.1. Ajuste exponencial

El modelo exponencial fue propuesto por Wadge (1981), quien indica que debido a una sobrepresión en la cámara magmática, la cual es causada principalmente por la inyección de magma proveniente de zonas más profundas, se genera una erupción y a medida que se va extruyendo magma, la tasa eruptiva va disminuyendo de manera exponencial, en función de la siguiente ecuación:

$$\frac{dV_e(t)}{t} = Q_0 \cdot e^{-b \cdot t} \quad (6.9)$$

con $dV_e(t)/t$ la tasa eruptiva, t el tiempo, Q_0 la tasa eruptiva con la que inicia la erupción y b una constante.

Habiendo obtenido ya los datos de la variación de la tasa eruptiva con el tiempo para las coladas Ajata inferior y superior, se intentaron ajustar los puntos a la función exponencial para ver si se adecuan al modelo. Lo cual se ilustra en las figuras 6.5 y 6.6.

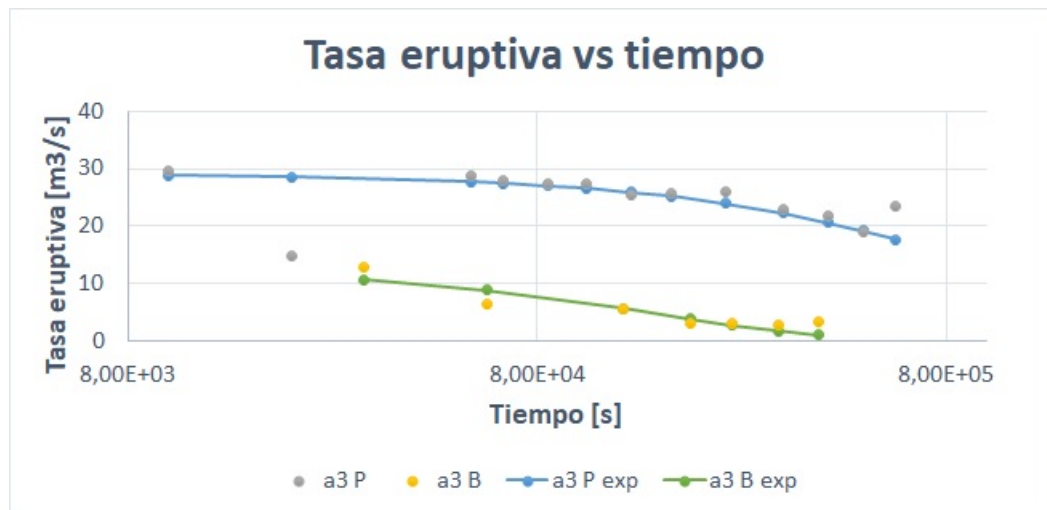


Figura 6.5: Gráfico de la tasa eruptiva vs. el tiempo para los datos obtenidos de la colada Ajata inferior junto al ajuste exponencial. Los puntos grises corresponden a las tasas eruptivas para el flujo principal de la colada a3 y la línea azul corresponde al ajuste exponencial para ese flujo. Los puntos amarillos son los valores de tasas eruptivas para el lóbulo de la colada a3 y la línea verde corresponde al ajuste exponencial para esa colada.

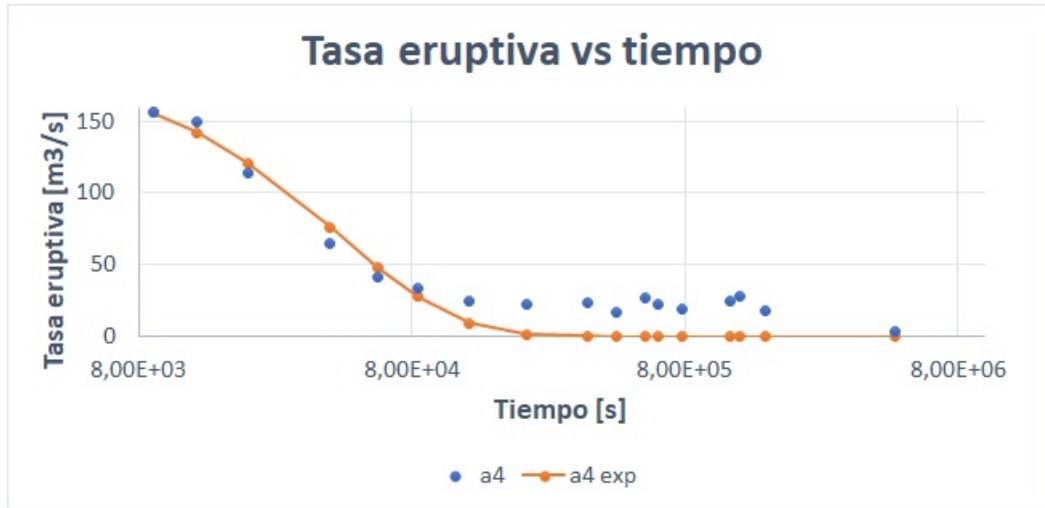


Figura 6.6: Gráfico de la tasa eruptiva vs. el tiempo para los datos obtenidos de la colada Ajata superior junto al ajuste exponencial. Los puntos azules corresponden a los valores de la tasa eruptiva para la colada a4 y la línea naranja es su ajuste exponencial.

La función exponencial para el flujo principal de la colada a3 tiene valores de $Q_0 = 29 \text{ m}^3/\text{s}$ y $b = 8,27 \cdot 10^{-7}$. Se puede observar que la tasa eruptiva en el tiempo se mantiene casi constante con un leve decaimiento, lo que se puede deber a una recarga magmática en la cámara, y de repente decae abruptamente a $0 \text{ m}^3/\text{s}$. De acuerdo a la ecuación propuesta por Munson et al. (1990) (ecuación 6.10), este suceso puede ocurrir por 3 razones: 1) que el ancho del conducto se haya tapado impidiendo que la lava ascienda; 2) la viscosidad del magma se haya hecho muy grande; y 3) que la densidad de la corteza sea igual a la del magma y que el gradiente de presión generado por la sobrepresión de la cámara magmática sobre la presión litostática sea 0.

$$Q = \frac{l \cdot w^3}{12 \cdot \mu} \cdot \left(\Delta \rho g + \frac{\Delta P}{H} \right) \quad (6.10)$$

La función exponencial para el lóbulo de la colada a3 tiene valores de $Q_0 = 13 \text{ m}^3/\text{s}$ y $b = 6,43 \cdot 10^{-6}$. En este caso se observa que la tasa eruptiva decae de manera exponencial pero hasta el tercer día y luego comienza a haber un aumento hasta que repentinamente se hace $0 \text{ m}^3/\text{s}$ repentinamente. Una posible causa puede ser que la cámara magmática haya tenido una recarga de magma que proviene de mayor profundidad y luego haya ocurrido una situación similar a la del flujo principal.

Por su lado, las constantes de la función exponencial para la colada a4 son $Q_0 = 192 \text{ m}^3/\text{s}$ y $b = 2,31 \cdot 10^{-5}$. En este caso la tasa eruptiva decae de manera exponencial en el primer día y luego la tasa eruptiva se mantiene casi constante con algunos aumentos y disminuciones. Esto se puede deber a que hay una inyección de magma que va recargando constantemente la cámara magmática, aumentando así la tasa eruptiva. Lo cual es posible, ya que el decaimiento exponencial de la tasa eruptiva en el tiempo no ocurre en todas las erupciones, como por ejemplo en el Kilauea (1959), el Etna (1999), el Soufrière Hills (2000-2010), entre otros (Mueller et al, 2018; Calvari et al., 2002; Wadge et al., 2018).

6.4. Dimensiones y morfologías de las coladas de lava

En este trabajo se consideraron los levées como las zonas más representativas de los flujos de lavas en el momento que el frente del flujo iba pasando por esa zona, tanto para describir sus dimensiones como su reología, pero hay que tener en consideración que en ambas lavas los límites de los levées se encuentran bien definidos en algunos lados y en algunos sectores, por ejemplo en la colada a3 el levée se encuentra más definido en la zona oeste en el flujo principal; sin embargo, en su lóbulo hay zonas donde se observa mejor en la zona este. En la colada a4 ocurre algo similar. En la zona proximal y de canal estable los levées se ven mejor definidos en el lado sur, pero llegando a la zona donde se divide el flujo, se observan mejor sus límites en la zona norte. Cabe destacar que en la zona proximal a la fisura, en el sector norte, se observó la presencia de 2 a 3 levées, de los cuales, no se sabía si se trataba del mismo flujo o de uno que se encontraba subyacente al flujo a4. Finalmente, se concluyó, a través de las imágenes tomadas por el dron, que solo el levée más central correspondía al de la colada a4, debido a que la topografía de los perfiles que se realizaron en ese sector muestra la presencia de 2 levées y si fuera la misma colada, su espesor y el ancho de estos sería excesivo en comparación al resto del flujo; además, por teledetección también pareciera que el levée más norte se tratase de un flujo que está por debajo del Ajata superior. En ambos sectores, llegando a la zona de dispersión, se dejan de observar de manera clara los límites de los levées.

Se ha evidenciado que a pesar de que ambas coladas de lava estudiadas corresponden a una etapa similar del volcán Paríacota (post-colapso), ambas provienen de una fisura y corresponden a las últimas dos coladas de Ajata, es decir, son las más jóvenes, aún así poseen ciertas diferencias en sus dimensiones.

La colada Ajata inferior alcanzó una distancia corta de solo 1,6 km en el canal principal con una potencia que fue aumentando pendiente abajo hasta llegar a 23,5 m y con un ancho que fue aumentando desde la zona proximal hasta el frente. Una posibilidad de la corta extensión que llegó a tener la colada puede ser que esta esté limitada por el volumen, pero, dado a la presencia de ojivas, las cuales van en aumento hacia el frente, otra posible razón puede ser al enfriamiento que sufrió la colada de lava en superficie, dificultando que esta siga avanzando pero permitiendo que se acumule en el frente por la continuación de material extruido, aumentando así su espesor. Por su parte, el lóbulo del flujo alcanzó una distancia aún menor, de 0,9 km, con una potencia que llegó hasta 25 m pero, su ancho se vio afectado por la topografía, disminuyendo y luego aumentando. Este poco alcance puede deberse al enfriamiento, pues alcanzó un alto espesor y en este sector la pendiente era mayor que en el flujo principal y su distancia fue menor. Por otra parte, se pudo notar que el flujo principal y el lóbulo ocurrieron en el mismo momento, pues no hay una presencia de un levée sobreyaciendo a algún sector de la colada que demuestre el paso posterior de uno sobre otro.

La colada Ajata superior está separada topográficamente en la zona de dispersión en dos, el sector norte y el sector sur, las que alcanzaron distancias de 3,8 y 3,9 km respectivamente, sus espesores llegaron a alcanzar 40 m y sus anchos aumentaban y a veces disminuían por la topografía del lugar. Pero, a diferencia de la colada anterior, estos sectores ocurrieron en distintos momentos, pues se pudo notar que el flujo sur ocurrió primero que el flujo norte debido a la presencia de un levée sobreyacente al sector sur, el cual marcaría el paso posterior del sector norte. El largo alcanzado fue mayor que el del Ajata inferior, esto se puede deber

a que el volumen para esta colada es mayor. Pero, de manera similar a la colada a3, puede haber influencia del enfriamiento que sufre la lava en superficie, debido a la presencia de ojivas que van en aumento hacia el frente.

No obstante, también poseen ciertas similitudes en sus morfologías, como por ejemplo: ambas lavas se clasificaron una transición del tipo A'a a la de bloque debido a que poseen una superficie más rugosa pero con un núcleo más masivo, lo que es característico de las lavas tipo A'a, pero a su vez son más angulosos los bloques, característico de las lavas de bloques (Harris y Rowland, 2015; Macdonald, 1953). Además, en ambas coladas se ve un aumento de ojivas hacia el frente del flujo, lo que podría evidenciar que en su interior seguía fluyendo con una magnitud capaz de deformar la corteza y generar estas estructuras.

Sepulveda et al. (2023) caracterizaron las morfologías de coladas de lava de composición intermedias a silíceas y determinaron que la longitud de onda máxima que tienen las ojivas en un flujo de lava, no se encuentran correlacionadas al contenido de SiO_2 ni a la viscosidad que la lava tenga, si no más bien, están espacialmente relacionada con el espesor local y el tipo de flujo. Esta descripción es más adecuada para la colada a4 que tiene una composición más andesítica. Con esto, y de acuerdo a las longitudes de ondas obtenidas en este trabajo, la colada Ajata superior corresponde al tipo de flujo de lava Leveed, el cual se caracteriza por ser muy canalizadas y por tener su mayor espesor en el flow toe.

Por lo tanto, el aumento de la potencia del flujo en el frente de la colada y la presencia de ojivas implicaría la presencia de una corteza en crecimiento que se formó debido al enfriamiento a causa de las condiciones de lento avance. Esta corteza, al estar más alejada de la fuente, se vuelve más potente pudiendo restringir el avance de la lava aún cuando se sigue extruyendo, indicando que el material no solidificado continuaba avanzando, pero la corteza potente no lo permitió, siendo así la fuerza de empuje lo suficientemente grande para formar las ojivas pero no así para continuar el avance. Esto confirmaría de que la dinámica del flujo estuvo controlada por el *yield strength* en la corteza.

6.5. Análisis de variaciones de las extensiones de las coladas de lava.

Distintos autores han propuesto diversos factores que afectan las dimensiones de las coladas de lava. Walker (1973) indica que el principal factor que influye en el largo de las coladas es la tasa eruptiva y que el efecto de la pendiente es de menor relevancia; mientras que Guest et al. (1987), indican que la extensión de las coladas está influenciada por el comportamiento que estas posean, es decir, si está limitada por enfriamiento o por volumen. Además, plantean que la pendiente de la superficie si afecta en el largo de la colada.

Dado que estas coladas, en casi toda su extensión, se encuentran mejor modeladas con el modelo del YSC, se probó en este, cómo influye la pendiente en el espesor de la colada, cuando se aumenta al doble. Con lo que se obtuvo que disminuye un 30%, por lo que su extensión debería ser mayor, debido a que el volumen emitido es el mismo.

En la figura 6.7 se ilustraron los valores de las tasas eruptivas promedio y el largo de cada colada en el gráfico de Walker (1973) que muestra la longitud de las lavas vs. la tasa eruptiva promedio para erupciones de distinta composición en varios volcanes, para así poder relacionarlo con las composiciones de los flujos de lava estudiados en este trabajo. Cabe destacar que este gráfico se llevó a cabo hace 50 años, por lo que sus valores pueden no ser exactos.

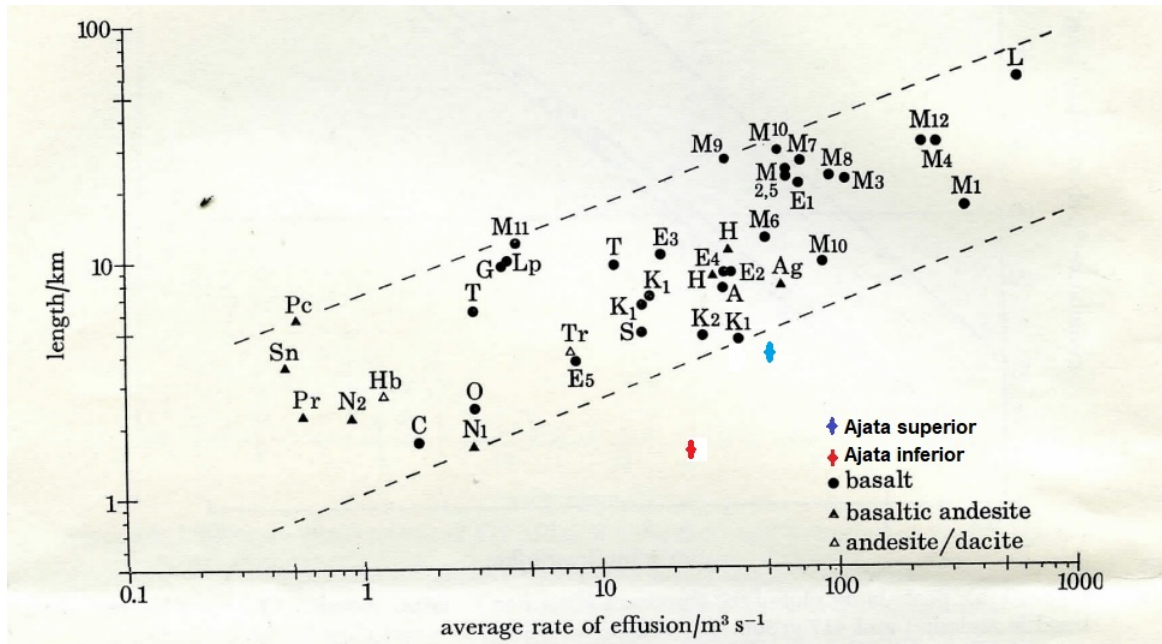


Figura 6.7: Gráfico del largo de la lava vs. la tasa eruptiva promedio para erupciones de lava en varios volcanes, realizado por Walker (1973). El punto rojo corresponde a la colada Ajata inferior y el punto azul a la Ajata superior. Lavas basálticas: A, Askja 1961 (Iceland); C, Cerro Negra 1968; E, Etna (1, 1699; 2, 1911; 3, 1923; 4, 1928; 5, 1971); G, Gituro 1948 (Congo); K, Kilauea (1, 1955; 2, 1965); L, Laki 1783 (Iceland); Lp, La Palma 1585; M, Mauna Loa (1, 1851; 2, 1852; 3, 1868; 4, 1887; 5, 1907; 6, 1916; 7, 1919; 8, 1926; 9, 1935; 10, 1942; 11, 1949; 12, 1950); O, Oosima 1951; T, Tenerife 1705; S, Sakurajima 1946. Lavas andesita-basálticas: Ag, Mt Agung 1963 (Bali); H, Hekla (1, 1845/6; 2, 1947); N, Ngauruhoe (1, 1949; 2, 1954); Pc, Pacaya 1961 (Guatemala); Pr, Paricutin (primeros 8 meses 1945); Sn, Santiaguina (Guatemala). Lavas andesita/dacitas: Hb, Hibok-Hibok 1948; Tr, Trident 1953.

Se puede notar que los valores tanto de la colada Ajata inferior como de la Ajata superior quedaron fuera del rango determinado por Walker. Dado que la composición del Ajata inferior es traquiandesita-basáltica, existen dos posibilidades: 1) que con esa tasa eruptiva el largo debería ser mayor, debido a que es uno de los principales factores que le da el largo a los flujos de lava; 2) que para haber alcanzado ese largo, la tasa eruptiva debe haber sido menor. Una posible razón para la primera posibilidad es que el largo de la colada esté limitada por el volumen y no por el enfriamiento, impidiendo así que la colada alcance una mayor extensión; mientras que para la segunda posibilidad la razón sería que la tasa eruptiva está sobreestimada a causa de las fuentes de error.

Por su lado, dado que la colada Ajata superior presenta una composición de traquian-desita, el valor del largo vs. la tasa eruptiva debería ser similar al de las erupciones de los volcanes Hibok-Hibok 1948 (Hb) y Trident 1953 (Tr). Por lo tanto, es posible notar que la tasa eruptiva está sobreestimada, pudiendo ser su principal causal el error del espesor relacionado al relleno posterior.

En este trabajo se determinó que la colada Ajata superior posee un mayor volumen en comparación a la Ajata inferior, pero del mismo orden. Algo similar ocurre con la tasa eruptiva, el *yield strength* y la duración de la erupción. Además, el largo de las coladas también es mayor para la colada a4 que para la a3, por lo que se podría inducir que las longitudes de las coladas están directamente relacionadas a la tasa eruptiva y el volumen emitido. Cabe destacar que la viscosidad también es un factor que afecta el largo que puede alcanzar a llegar una colada, pero, en estas lavas al parecer no primo este factor, pues la colada con mayor alcance (Ajata superior) es la que tiene mayor viscosidad, lo que implicaría que la viscosidad no fue el factor que determinó su largo, si no que, más bien pudiese estar relacionado a la tasa eruptiva, el volumen emitido o al efecto del enfriamiento de la corteza. Para corroborar, se compararon estos resultados con otros flujos de lavas de distintas partes del mundo y del mismo volcán.

6.5.1. Erupciones de otros volcanes

La erupción del volcán Villarrica de 1971, posee ciertas similitudes con la colada a3, como por ejemplo, su composición, la cual es andesita-basáltica, su volumen emitido, que es de $2,3 \cdot 10^7 m^3$ y su morfología del tipo A'a. Pero, sus extensiones son distintas, pues la erupción del Villarrica alcanzó una extensión de 16,5 km (Castruccio et al., 2016), es decir, 10 veces mayor a la del Ajata inferior. Esto se puede deber a que el régimen que controló la dinámica del flujo es distinto, pues la tasa eruptiva del Villarrica llega alcanzar $800 m^3/s$ mientras que la del Ajata inferior es de $24,6 m^3/s$ y de acuerdo a Harris y Rowland (2009), las altas tasas de efusión evitan que crezca una corteza y favorecen que el flujo esté controlado por la viscosidad. Esto corroboraría la hipótesis propuesta por Walker (1973) de que la tasa de efusión es el principal factor de el largo que llegan alcanzar las coladas de lava.

La fase temprana de la erupción del volcán Etna de 2004 y 2005 se caracterizó por su estilo efusivo y su composición basáltica. Del Negro et al. (2008) modeló el flujo de lava producido, usando el modelo magflow y estimó que se emitió un volumen de $1,4 \cdot 10^7 m^3$ y su extensión alcanzó los 2,5 km. Se puede notar que emitiendo una cantidad similar de volumen con respecto al Ajata inferior, la colada del Etna fue un poco más extensa, lo cual puede estar relacionado a que su viscosidad es menor que la de la colada a3.

El flujo 1 del Mauna Loa descrito por Lipman y Banks (1987) se caracterizó por ser de composición basáltica y corresponde a una transición del tipo A'a a pahoe hoe. Estimaron que emitió un volumen de $5,4 \cdot 10^7 m^3$ alcanzando un largo de 25 km con una duración de 7 días.

La erupción del volcán Etna el 2001 fue del tipo A'a y su composición de traqui-basáltica. Emitió un volumen muy similar al de la colada Ajata inferior de $1,5 \cdot 10^7 m^3$, alcanzando un largo mayor de 6,9 km en un tiempo de 8 días (Coltelli et al., 2007). La erupción del mismo

volcán pero del año 2006 también fue del tipo A'a y de composición traqui-basáltica, pero emitió un volumen menor de $4 \cdot 10^6 m^3$ y alcanzó un largo mayor al del Ajata inferior de 4,2 km en un tiempo de 10 días (Vicari et al., 2009).

Por otro lado, la erupción del Lonquimay de 1988-1990 y el flujo de lava de Collier Cone tienen composiciones andesíticas, lo que se asemeja más a la colada a4. La primera corresponde a una transición del tipo de lava A'a a la de bloque y emitió un volumen de $2,3 \cdot 10^8 m^3$ alcanzando una extensión máxima de 10,2 km (Castruccio et al., 2016); mientras que la segunda es del tipo de bloque y emitió un volumen de $1,4 \cdot 10^8 m^3$, alcanzando un largo de 13,6 km (Deardorff et al., 2012). Cabe destacar, que ambas están controladas por el YSC.

De manera similar, las erupciones del Colima 1998-1999 y Santiaguito 1999-2001 son del tipo bloque y composición andesítica. La primera emitió un volumen de $4 \cdot 10^7 m^3$ alcanzando una extensión de 3,8 km en 79 días (Navarro-Ochoa et al., 2002); mientras que la segunda se estima que el volumen emitido fue de $2,8 \cdot 10^7 m^3$ y su largo de 4,1 km en un tiempo de 561 días (Harris et al., 2004).

En la figura 6.8 se presenta un gráfico donde muestran los distintos volúmenes emitidos por estas erupciones vs. el largo alcanzado por las coladas en comparación con las del Ajata inferior y superior.

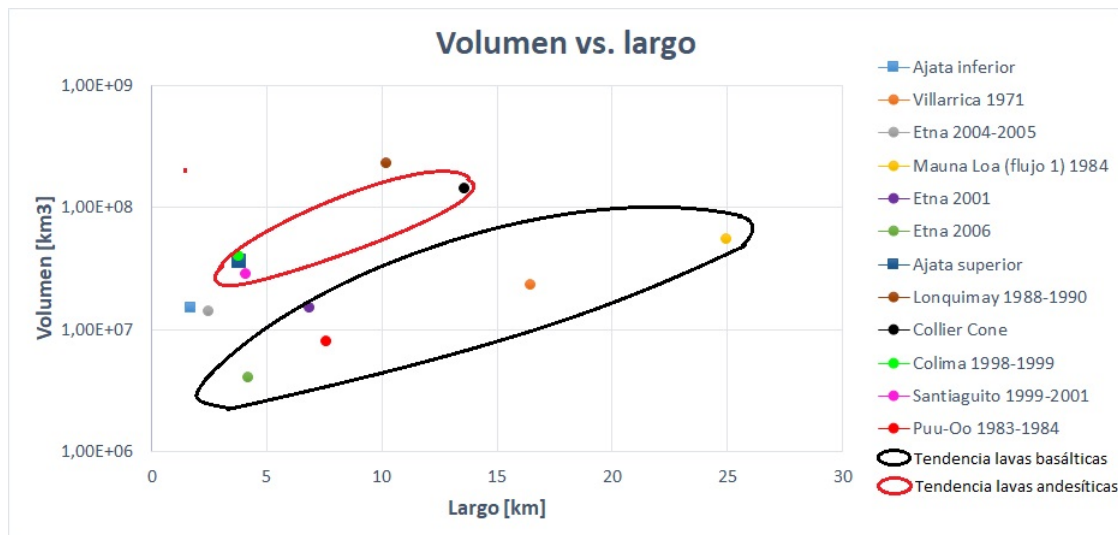


Figura 6.8: Gráfico del volumen emitido vs. largo de las coladas para distintas erupciones en comparación con las del Ajata inferior y superior.

Se puede notar la existencia de una tendencia en el volumen vs. largo para las coladas de composición más basálticas, las cuales se asemejan más a la de la colada Ajata inferior. Pero, esta colada queda fuera de la tendencia con un largo menor a lo que se esperaría para su volumen emitido. Lo que implicaría que el largo de la colada Ajata inferior está limitada por el enfriamiento.

Por su lado, para las coladas de lava de composición más andesítica, que se asemejan más a la de la colada Ajata superior, la tendencia del volumen vs. largo del flujo corresponde a

la de color rojo. Se observa que la colada Ajata superior se encuentra justo en el borde de esta tendencia, implicando que la extensión que posee está controlada principalmente por el volumen, con una influencia menor del enfriamiento que esta tiene en superficie.

6.5.2. Otros flujos de lava del volcán Parinacota

Para corroborar lo propuesto por Castruccio et al. (2017) sobre el efecto que genera el edificio volcánico en el largo de las coladas, se midieron las dimensiones y volúmenes de otros flujos de lava provenientes del volcán. Se analizaron 3 flujos de lava que provienen de la cumbre del nuevo cono (lava 1, 2 y 3) y descendieron por la ladera oeste y una colada del cono viejo (lava 4) que descendió por la ladera sur, como se observa en la figura 6.9.

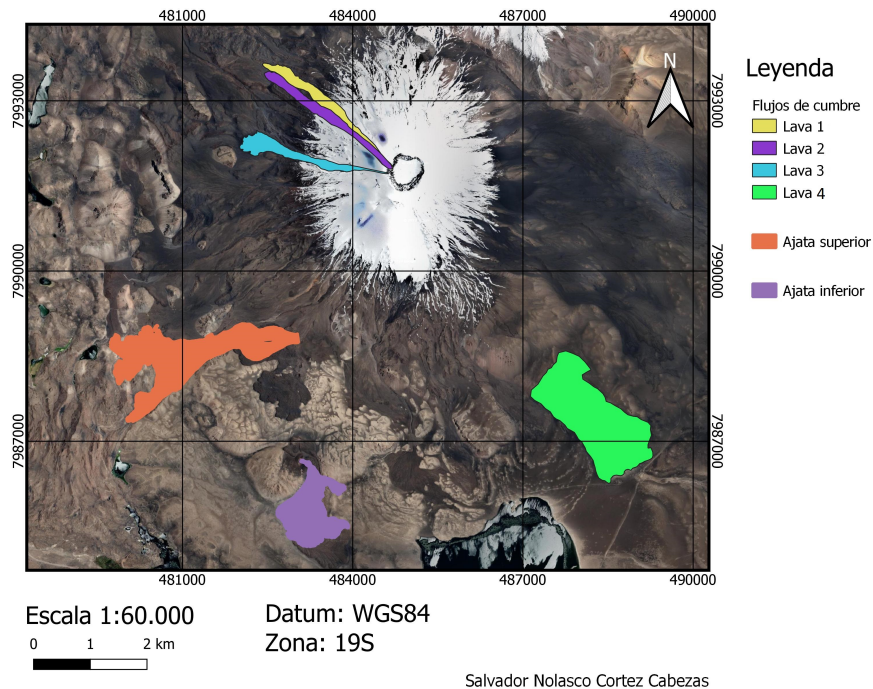


Figura 6.9: Mapa del volcán Parinacota que muestra los otros flujos de lava con los que se compararon las coladas a3 y a4.

Para la medición de las dimensiones se utilizó el DEM TanDEM que posee una resolución de 12 m/píxel. El flujo 1 posee un extensión de 2967 m y un volumen de $8,51 \cdot 10^6 m^3$ aproximadamente; el flujo 2 posee un largo y volumen de 2704 m y $1,03 \cdot 10^7 m^3$; el flujo 3, por su lado, alcanzó una extensión de 2726 m y emitió un volumen de $1,26 \cdot 10^7 m^3$; mientras que, el flujo 4 tuvo un largo de 2515 m y un volumen emitido de $2,60 \cdot 10^8 m^3$ (figura 6.10 y 6.11).

Volumen vs. tiempo



Figura 6.10: Gráfico del volumen emitido vs. la edad para otros flujos de lava del volcán Parinacota en comparación con las coladas a3 y a4.

Largo vs. tiempo



Figura 6.11: Gráfico del largo de la colada vs. la edad para otros flujos de lava del volcán Parinacota en comparación con las coladas a3 y a4.

Se puede notar, que las lavas provenientes de la cumbre poseen un volumen menor a los flujos que provienen de fisuras, lo que concuerda con lo propuesto por Epp et al. (1983) de que a mayor elevación de la emisión de lavas, menor será el volumen. No así la extensión de las coladas, pues los flujos 1, 2 y 3 poseen menor extensión que el Ajata superior, pero mayor que el Ajata inferior y el flujo 4.

Cabe destacar que estas mediciones tienen una incerteza considerable, mayor a las obtenidas para el Ajata inferior y superior, pues se desconoce el valle a través del cual fluyeron y, además, para los flujos 1, 2 y 3, las zonas más cercanas a la cumbre se encuentra cubierta por nieve; mientras que, el flujo 4 se encuentra cubierto por lavas posteriores a él, dificultando

de esta manera, la medición de sus dimensiones en esa zona. Por lo que con este estudio no bastaría para corroborar la influencia del edificio volcánico en las dimensiones de las coladas de lavas.

Capítulo 7

Conclusiones

En el presente trabajo, los parámetros eruptivos de las coladas de lava Ajata inferior y superior del volcán Parinacota se determinaron a partir de sus morfologías, dimensiones y características reológicas. Para ello, se realizaron perfiles a lo largo de las coladas con el fin de obtener los valores de los parámetros y cómo estos fueron evolucionando en el tiempo. Se utilizaron 4 modelos distintos para determinar los parámetros eruptivos e interpretar el más adecuado, asumiendo que el frente del flujo controla su dinámica y que los levées son lo más representativo del momento en que el frente pasó por ahí, reflejando su espesor y reología.

Debido a que no se pudo determinar la viscosidad de las coladas, se utilizaron distintas aproximaciones que entregaran valores de parámetros eruptivos cercano a lo teórico. En ambas coladas, el primer caso de viscosidad fue descartado debido a que considera que el magma llega a superficie sin cristales, ya sea fenocristales, microfenocristales o microlitos. El tercer caso también fue descartado en ambas coladas, pues, entre los modelos que requieren de la viscosidad, el único que entrega valores de parámetros eruptivos concordantes con la literatura es el newtoniano, el cual no considera la tensión de corte que requiere la colada de lava para poder fluir ni los efectos de adelgazamiento por cizallamiento. Mientras que para el segundo caso de viscosidad, los primeros 650 m de la colada a4 se encuentra bien modelada por el modelo Herschel-Bulkley, el cual sí considera la tensión de corte y los efectos de adelgazamiento por cizallamiento. Es por esto que se escogió el segundo caso de viscosidad como el más representativo para ambas coladas.

Debido a que el modelo del YSC es el que mejor representa la evolución de las coladas de lava, se concluye que el régimen dinámico que controla el emplazamiento de estas es principalmente el *yield strength* en la corteza, es decir, por el enfriamiento que sufrieron mientras fluían. Es por eso que, a pesar de que se seguía extruyendo lava desde la fuente, sus distancias fueron cortas, pero se iba acumulando el material en el frente, alcanzando espesores de 23,5 y 40,5 m para la colada a3 y a4 respectivamente.

La colada a3, que posee un volumen de $1,6 \cdot 10^{-2} \text{ km}^3$, descendió por la ladera sur del volcán y se dividió en dos flujos, uno descrito como el flujo principal y el otro como el lóbulo. La velocidad promedio con la que descendió fue de $4,83 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ y $2,73 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ respectivamente, hasta recorrer una distancia de 1589 y 903 m en un tiempo de 6,9 y 4,5 días respectivamente. Para el flujo principal, se obtuvieron valores de tasa eruptiva promedio de $24,6 \text{ m}^3/\text{s}$, con una consistencia promedio de $6,08 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ y un *yield strength* de $1,64 \cdot 10^4$

Pa; mientras que para el lóbulo, la tasa eruptiva promedio es de $5,28 \text{ m}^3/\text{s}$, con una consistencia promedio de $4,99 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ y un *yield strength* de $3,35 \cdot 10^4 \text{ Pa}$.

Por su lado, la colada a4 también se dividió en dos flujos a los 2400 m aproximadamente: un sector norte y el otro sur. Esta descendió por la ladera suroeste del volcán con una velocidad promedio de $1,84 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$ hasta la zona donde se dividió. Primero continuó por el sector sur con una velocidad promedio de $2,25 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ hasta que alcanzó los 3,9 km en un tiempo de 9,03 días. Luego, siguió por el sector norte con una velocidad promedio de $1,36 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ hasta llegar a los 3,8 km en un tiempo de 45,1 días. La tasa eruptiva promedio del sector sur fue de $54,8 \text{ m}^3/\text{s}$ y para el sector norte fue de $43,9 \text{ m}^3/\text{s}$, con una consistencia promedio de $6 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ para ambos sectores y un *yield strength* promedio de 1,82 y 1,89 Pa respectivamente.

Conforme a los resultados obtenidos en donde la colada a4 posee mayor longitud que la colada a3, se puede interpretar que las conclusiones realizadas por Walker (1973), Malin (1980), Takagi y Huppert (2010) y Deardorff et al. (2012) son acertadas, pues la colada a4 poseía mayor tasa eruptiva y mayor volumen que la colada a3; por lo tanto, a mayor tasa eruptiva y mayor volumen, mayor será la longitud de la colada; pero, el enfriamiento también cumple un papel importante, impidiendo que la lava siga avanzando a pesar de que se siga extruyendo magma desde la fuente, por lo que disminuye la longitud pero aumenta el espesor.

Dado a las comparaciones realizadas con otras erupciones se concluye que la extensión de la colada a3 está principalmente limitada por el enfriamiento que esta tuvo en superficie, ya que otras erupciones, emitiendo un volumen similar, alcanzaron distancias mayores. Por su lado, la distancia alcanzada por la colada a4 estuvo limitada principalmente por el volumen, con una menor influencia del enfriamiento que esta tuvo en superficie.

Sin embargo, también existen otros factores que, en menor medida, afectan en las dimensiones de las coladas. Uno de ellos es el *yield strength*, el cual afecta el largo de la colada (tratándose de la misma colada), indicando que a mayor *yield strength*, menor longitud posee esta. Por último, se sabe que la consistencia es un impedimento para el avance de las coladas pero, en este caso, la colada con mayor consistencia posee mayor longitud, lo que indicaría que las dimensiones de estas coladas de lava no estuvieron dominadas por la reología interna.

Hay que tener en cuenta la problemática de la determinación de la evolución de la consistencia de las coladas. Si bien el contenido de fenocristales y microfenocristales puede ser determinado a través del microscopio óptico, los microlitos también pueden determinarse de esta manera, pero no se podría precisar qué porcentaje de estos cristalizaron mientras la colada estaba en movimiento, los cuales sí influyen en la consistencia o los que cristalizaron con posterioridad al paso del frente en el punto de evaluación.

También hay que tener en consideración que el valor del *yield strength* en la corteza fue ajustado favorablemente para que el valor del número de Graetz en el frente de la colada fuera cercano a 300. Por lo tanto, sería relevante buscar una manera para determinar el valor del *yield strength* en la corteza y así tener mayor precisión en los cálculos realizados.

Por último, hay que mencionar la dificultad que significó la elección de los modelos para

la determinación de los parámetros, ya que al ser lavas no históricas no hay evidencia de la duración de la erupción, lo cual podría haber servido para verificar si los modelos utilizados representan de buena manera la evolución del comportamiento de las coladas.

Capítulo 8

BIBLIOGRAFÍA

- Andersen, D. y Lindsley, D. (1985). New (and final!) models for the Ti-magnetite/ilmenite geothermometer and oxygen barometer. Abstract AGU 1985 Spring Meeting Eos Transactions. American Geophysical Union 66, 416.
- Balmforth, N., Burbidge, A., Craster, R. V., Salzig, J. y Shen, A. (2000b). Visco-plastic models of isothermal lava domes. *Journal of Fluid Mechanics*, 403: 37-65.
- Balmforth, N. J., Craster, R. V. y Sassi, R. (2002). Shallow viscoplastic flow on an inclined plane. *Journal of Fluid Mechanics*, 470: 1-29.
- Banaszak, M. (2014). Differentiation regimes in the Central Andean magma systems: case studies of Tarapaca and Parinacota volcanoes, Northern Chile. Dissertation, zur Erlangung des mathematisch-naturwissenschaftlichen Doktorgrades "Doctor rerum naturalium" der Georg-August-Universität Göttingen.
- Blake, S. y Bruno, B. (2000). Modelling the emplacement of compound lava flows. *Earth and Planetary Science Letters* 184 , 181-197.
- Blong, R. (1994). *Volcanic Hazards: A Sourcebook on the Effects of Eruptions*. Books.
- Borgia, A., Linneman, S., Spencer, D., Morales, L., Brenes, J. (1983). Dynamics of lava flow fronts, Arenal Volcano, Costa Rica. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 19 (3-4): 303-329.
- Bourdon, B., Wörner, G. y Zindler, A. (2000). U-series evidence for crustal involvement and magma residence times in the petrogenesis of Parinacota volcano, Chile: Contributions to *Mineralogy and Petrology* 139: 458-469.
- Calvari, S., Neri, M. y Pinkerton, H. (2002). Effusion rate estimations during the 1999 summit eruption on Mount Etna, and growth of two distinct lava flow fields. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 119 (1-4): 107-123.
- Castruccio, A., Rust, A., Sparks, R. (2013). Evolution crust- and core-dominated lava flows using scaling analysis. *Bulletin of Volcanology*, vol.75
- Castruccio, A., Rust, A., Sparks, R. (2014). Assessing lava flow evolution from post-eruption field data using Herschel–Bulkley rheology. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 275, 71–84. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.02.004>

- Castruccio, A., Diez, M. y Gho, R. (2017). The Influence of Plumbing System Structure on Volcano Dimensions and Topography. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*.
- Clavero, J., Sparks, R., and Huppert, H. (2002). Geological constraints on the emplacement mechanism of the Parinacota debris avalanche, northern Chile: *Bulletin of Volcanology*, v. 64, no. 1, p. 40–54, doi: 10.1007/s00445-001-0183-0.
- Clavero, J., Sparks, R., Polanco, E., and Pringle, M. (2004). Evolution of Parinacota volcano, central Andes, northern Chile. *Revista Geologica de Chile*, 31(2), 317–347.
- Clavero, J.; Sparks, R.; Polanco, E. (2006). Geología del volcán Parinacota, Región de Tarapacá. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 101: 30 p., 1 mapa escala 1:50.000. Santiago.
- Clavero, J., Sparks, S., y Polanco, E. (2012). Geología del volcán Parinacota. Región de Arica y Parinacota, carta geológica de Chile. Serie geología básica.
- Coltelli M., Proietti C., Branca S., Marsella M., Andronico D., Lodato L. (2007). Analysis of the 2001 lava flow eruption of Mt. Etna from three-dimensional mapping. *J Geophys Res* 112:F02029. doi:10.1029/2006JF000598
- Crisp, J., Cashman, K. V., Bonini, J. A., Houghton, S. B., Pieri, D. C. (1994). Crystallization history of the 1984 Mauna Loa lava flow. *Journal of Geophysical Research*, vol. 99, (B4) , 7177-7198.
- Deardorff, N., Cashman, K. (2012). Emplacement conditions of the c. 1,600-year BP Collier Cone lava flow, Oregon: a LiDAR investigation. *Bulletin of Volcanology*, 74:2051–2066.
- Del Negro, C., Fortuna, L., Vicari, A. (2005). Modelling lava flows by Cellular Nonlinear Networks (CNN): preliminary results. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 12(4), 505-513. <https://doi.org/10.5194/npg-12-505-2005>
- Del Negro, C., Fortuna, L., Herault, A., Vicari, A. (2008). Simulations of the 2004 lava flow at Etna volcano using the magflow cellular automata model. *Bull. Volcanol.* 70, 805–812
- Dragonì M., Bonafede M., Boschi E. (1986). Down slope flow models of a Bingham liquid: implications for lava flows. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 30, 305-325.
- Edmonds, M., Grattan, J., Michnowicz, S. (2015). Volcanic Gases: Silent Killers. En *Advances in volcanology* (pp. 65-83). <https://doi.org/10.1007/11157201514>
- Epp, D., Decker, R., Okamura, A. (1983). Relation of summit deformation to East Rift Zone eruptions on Kilauea volcano, Hawaii. *Geophysical Research Letters*, 10(7), 493–496. <https://doi.org/10.1029/GL010i007p00493>
- Flink, J., Griffiths, R. (1992). A laboratory analog study of the surface morphology of lava flows extruded from point and line sources. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 54 (1): 19-32.

- García, M., Gardeweg, M., Clavero, J., Hérail, G. (2004). Mapa Geológico de la Hoja Arica, escala 1:250.000. Servicio Nacional de Geología y Minería, Serie Geología Básica 84: 150 p.
- Geocom. (s.f.). DJI Phantom 4 RTK. Geocom. <https://www.geocom.cl/products/phantom-4-rtk>
- Ghó, R. (2013). Determinación de parámetros eruptivos de flujos de lava del complejo volcánico Lonquimay (38°S), Andes del sur. Dirigido por Ángelo Castruccio. Memoria de título. Universidad de Chile, Departamento de geología
- Ginibre, C., Wörn, G. (2007). Variable parent magmas and recharge regimes of the Parínacota magma system (N. Chile) revealed by Fe, Mg and Sr zoning in plagioclase. *Lithos* 98, 118-140.
- Giordano, D., Russell, J. K., Dingwell, D. B. (2008). Viscosity of Magmatic Liquids: A Model. *Earth and Planetary Science Letters*, 271(1-4), 123–134. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.03.038>
- Griffiths, R. (2000). The dynamics of lava flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 32: 477–518.
- Guest, J. E., Kilburn, C. R., Pinkerton, H., Duncan, A. M., (1987). The evolution of lava flowfields: observations of the 1981 and 1983 eruptions of Mount Etna, Sicily. *Bulletin of Volcanology*, 49 (3): 527-540.
- Harris AJL, Flynn LP, Matías O, Rose W, Cornejo J. (2004). The evolution of an active silicic lava flow field: an ETM + perspective. *J Volcanol Geotherm Res* 135:147–168.
- Harris A., Rowland S. (2009). Effusion rate controls on lava flow length and the role of heat loss: a review. In T. Thordarson et al. (Eds.), *Studies in Volcanology. The Legacy of George Walker*, Special Publications of IAVCEI, (pp. 33–51). London: Geological Society.
- Harris, A., Rowland, S. (2015). The encyclopedia of volcanoes (second edition). Chapter 17 - Lava Flows and Rheology. En Elsevier eBooks (pp. 321-342). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-385938-9.00017-1>
- Herschel, W., Bulkley, R. (1926). Consistency measurements of rubber benzene solutions. *Kolloid-Z.* 39 291 - 300.
- Holland, T., Blundy, J. (1994). Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole- plagioclase thermometry. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 116, 433-447.
- Hora, J., Singer, B., Wörn, G. (2007). Volcano evolution and eruptive flux on the thick crust of the Andean Central Volcanic zone: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ constraints from Volcan Parínacota, Chile. *Geological Society of America Bulletin* 119, 343-362.
- Hulme, G. (1974). The interpretation of lava flow morphology. *Geophys.J.R.Astron.Soc.*, vol.39, 361-383.

- Hulme, G., Fielder, G. (1977). Effusion rates and rheology of lunar lavas. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 285 (1327): 227- 234.
- Huppert, H., Shepherd, J., Sigurdsson, H., Sparks, R. (1982). On lava dome growth, with application to the 1979 lava extrusion of the Soufrière of St. Vincent. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 14 , 199-222.
- Ishibashi, H. (2009). Non-Newtonian behaviour of plagioclase bearing basaltic magma: subliquidus viscosity measurement of the 1707 basalt of Fuji volcano, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 181(1-2), 78–88.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.01.004>
- James, D.E. (1971). Plate tectonic model for evolution of central Andes: *Geological Society of America Bulletin*, v. 82, no. 12, p. 3325–3345.
- Johnson, A. (1970). *Physical processes in Geology*. Freeman, Cooper Company. 577 p
- Johnson, E., Wallace, P., Cashman, K., Delgado-Granados, H. (2010). Degassing of volatiles (H₂O, CO₂, S, Cl) during ascent, crystallization, and eruption at mafic monogenetic volcanoes in central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 197(1-4), 225-238. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.02.017>
- Kerr RC., Lyman AW. (2007). Importance of surface crust strength during the flow of the 1988–1990 andesite lava of Lonquimay Volcano, Chile. *Journal of Geophysical Research*, vol.112 .
- 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). *Geologische Rundschau* 84: 770-780.
- Lipman, P., Banks, N., Rhodes, J. (1985). Gas-release induced crystalization of 1984 Mauna Loa magma, Hawaii, and effects on lava rheology. *Nature*, vol.317, 604-607.
- Lipman, P., Banks, N. (1987). A'a flow dynamics, Mauna Loa 1984. U.S. Geological Survey of Professional Paper, vol. 1350, 1527-1567.
- Lyman, A. W., Kerr, R. C., Griffiths, R. W. (2005). Effects of internal rheology and surface cooling on the emplacement of lava flows. *Journal of Geophysical Research* vol. 110, B08207.
- Macdonald, G. (1953). Pahoehoe, A'a, and block lava. *American Journal of Science*, 251: 169- 191.
- Mader, H. M., Llewelin, E. W., Muller, S. P. (2013). The rheology of two-phases magmas: A review and analysis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 257: 135-158.
- Malin, M. (1980). Lengths of Hawaiian lava flows. *Geology*, 8: 306-308.
- Mendez A., Pérez L. y Paniagua A. (2010). Determinación de la viscosidad de fluidos newtonianos y no newtonianos (una revisión del viscosímetro de Couette). *Latin-American Journal of Physics Education*, 4(1), 36.

- Montecinos, F. (1963). Observaciones de Geología en el Cuadrángulo de Campanani, Departamento de Arica, Provincia de Tarapacá. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología: 109 p.
- Mueller, S., Llewellyn, E.W., Mader, H.M. (2010). The rheology of suspensions of solid particles. *Proceeding of the Royal Society*, vol.466, 1201-1228.
- Mueller, S., Houghton, B. F., Swanson, D. A., Fagents, S. A., y Klawonn, M. (2018). Intricate episodic growth of a Hawaiian Tephra deposit: case study of the 1959 Kīlauea Iki eruption. *Bulletin of Volcanology*, 80(10). <https://doi.org/10.1007/s00445-018-1249-6>
- Munson, B., Young, D. F., y Okiishi, T. H. (1990). *Fundamentals of fluid mechanics*, (3rd ed.) (p. 877). New York: John Wiley.
- Navarro-Ochoa C., Gavilanes-Ruíz J., Cortés-Cortés A. (2002) Movement and emplacement of lava flows at Volcán de Colima, México: November 1998–February 1999. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 117, 153–167
- Ogden J., Basher L., McGlone M. (1998) Fire, forest regeneration and links with early human habitation: evidence from New Zealand. *Ann Bot* 81:687–696
- Pinel, V., y Jaupart, C. (2000). The effect of edifice load on magma ascent beneath a volcano. *Philosophical Transactions. Royal Society of London*, 358(1770), 1515–1532. <https://doi.org/10.1098/rsta.2000.0601>
- Pinkerton H., Sparks R. (1976). The 1975 sub-terminal lavas, Mount Etna: a case history of the formation of a compound lava field. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 1, 167-182.
- Pinkerton, H., Wilson, L. (1994). Factors controlling the lengths of channel-fed lava flows. *Bulletin of Volcanology*, 56(2), 108–120. <https://doi.org/10.1007/BF00304106>
- Pinkerton, H., Norton, G. (1995). Rheological properties of basaltic lavas at sub-liquidus temperatures: laboratory and field measurements on lavas from Mount Etna. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 68, 307–323.
- Putirka, K. (2008). Thermometers and Barometers for Volcanic Systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 69(1), 61–120. <https://doi.org/10.2138/rmg.2008.69.3>
- Reiche, P. (1937). The Toreva block-A distinctive landslide type. *Journal of Geology* 45: 538-548.
- Reyes Luna, P. C. (2013). Caracterización del contenido de volátiles del volcán monogénico Pelagatos, Sierra de Chichinautzin.
- Ridolfi, F. y Renzulli, A. (2011). Calcic amphiboles in calc-alkaline and alkaline magmas: thermobarometric and chemometric empirical equations valid up to 1,130°C and 2.2 GPa. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 163, 877-895.
- Robson, G.R. (1967). Thickness of Etnean lavas. *Nature*, 216: 251–252.

- Scheuber, E., Giese, P. (1999). Architecture of the Central Andes - a compilation of geoscientific data along a transect at 21°S. *Journal of South American Earth Sciences* 12: 103-107.
- Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S., Rymer, H., Stix, J. (1999). *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic press. 1417.
- Sparks, R., Pinkerton, H., Hulme, G. (1976). Classification and formation of lava levées on Mount Etna, Sicily. *Geology*, vol. 4, 269-271.
- Takagi, D., Huppert, H. (2010). Initial advance of long lava flows in open channels. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 195 (2-4): 121–126.
- Vicari, A., Herault, A., Del Negro, C., Coltelli, M., Marsella, M., Proietti, C. (2007). Modeling of the 2001 lava flow at Etna volcano by a cellular automata approach. *Environmental Modelling and Software*, 22(10), 1465-1471.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.10.005>
- Vicari A, Cirauo A, Del Negro C, Herault A, Fortuna L. (2009). Lava flow simulations using discharge rates from thermal infrared satellite imagery during the 2006 Etna eruption. *Nat. Hazards* 50, 539–550.
- Wadge, G., Voight, B., Sparks, R. S. J., Cole, P., Loughlin, S. C., Robertson, R. E. A. (2014). Chapter 1 An overview of the eruption of Soufrière Hills volcano, Montserrat from 2000 to 2010. *Geological Society, London, Memoirs*, 39(1), 1-40.
<https://doi.org/10.1144/m39.1>
- Walker, G. (1972). Compound and simple lava flows and flood basalts. *Bulletin of Volcanology*, 35 (3): 579-590.
- Walker, G. (1973). Lengths of lava flows. *Philosophical Transactions. Royal Society of London*, 274(1238), 107–118. <https://doi.org/10.1098/rsta.1973.0030>.
- Wallace, P., Anderson, A. (1999). Volatiles in Magmas. En Elsevier eBooks (pp. 163-183). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-385938-9.00007-9>.
- Wolfe EW, Neal CA, Banks NG, Duggan TJ (1988). Geologic observations and chronology of eruptive events. In: Wolfe EW (ed) *The Puu Oo Eruption of Kilauea Volcano, Hawaii: Episodes 1 through 20, January 3, 1983, through June 8, 1984*. US Geol Surv Prof Pap no. 1463, pp 1–97
- Wörner, G., Harmon, R.S., Davidson, J., Moorbath, S., Turner, D.L., Mcmillan, N., Nye, C., Lopez-Escobar, L., and Moreno, H. (1988). The Nevados de Payachata volcanic region (18°S/69°W, N. Chile): 1. Geological, geochemical, and isotopic observations: *Bulletin of Volcanology* 50: 287-303.
- Wörner, G., Hammerschmidt, K., Henjes-Kunst, F., Lezaun, J., and Wilke, H. (2000a). Geochronology ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, K-Ar and He-exposure ages) of Cenozoic magmatic rocks from northern Chile (18°/22°S): Implications for magmatism and tectonic evolution of the central Andes. *Revista Geológica de Chile* 27 (2): 205-240.
- Zhou, J. Z., Fang, T., Luo, G., Uhlherr, P. H. (1995). yield stress and maximum packing fraction of concentrated suspensions. *Rheol Acta* 34:544–561

Anexos

Anexo A. Datos generales de las muestras

Flujo de lava	Muestras	Coordenadas N	Coordenadas E	Altitud (m)	Distancia de la fuente (m)
Ajata inferior	Pari.T1.M2.S	7986140	483840	4670	912
	Pari.T1.M3.S	7986342	483592	4731	591
	Pari.T2.M6.S	7987064	483068	4873	411
	Pari.T2.M7.S	7986761	483028	4822	122
	Pari.T2.M8.S	7986761	483028	4822	122
	Pari.T2.M11.S	7985306	483705	4626	1480
Ajata superior	Pari.T1.M1.S	7987358	480152	4579	3320
	Pari.T2.M1.S	7988817	480805	4665	2183
	Pari.T2.M2.S	7988994	480729	4659	2252
	Pari.T2.M3.S	7988919	482786	4923	267
	Pari.T2.M4.S	7988974	482805	4932	219
	Pari.T2.M5.S	7989084	482626	4893	352

Figura A.1: Datos generales de las muestras de las coladas Ajata inferior y Ajata superior.

Anexo B. Dimensiones de las coladas de lava

B.1. Ajata inferior (a3)

Flujo principal			
Pendiente (°)	Ancho (m)	Largo (m)	Espesor (m)
14,5	220	247,7	8
14,5	216	352,9	12
3,2	325	528,3	20
3,2	344	576,9	18
3,2	360	650,4	19
3,2	409	715,3	20
3,2	419	798,1	16
3,2	524	871,7	15
3,2	669	963,8	17
4,9	848	1073,4	16,5
4,9	798	1177,4	16,5
4,9	750	1270,2	24,5
4,9	834	1379,2	32,5
4,9	832,1	1589,5	

Figura B.1: Dimensiones del flujo principal de la colada a3.

Brazo			
Pendiente (°)	Ancho (m)	Largo (m)	Espesor (m)
14,5	220	247,7	8
14,5	216	352,9	12
8,1	189	511,2	15
8,1	169	624,3	16
8,1	141	690,2	14
8,1	109	754,8	14,5
8,1	176	832,6	15
8,1	179,2	902,8	

Figura B.2: Dimensiones del lóbulo de la colada a3.

B.2. Ajata superior (a4)

Brazo norte			
Pendiente (°)	Ancho (m)	Largo (m)	Espesor (m)
9,3	368	654	7,5
9,3	0	860	16,2
9,3	581	1066	30
9,3	601	1367	18,7
6,7	319	1589	15
6,7	316	1788	9
6,7	397	1986	14
6,7	463	2202	9,5
6,7	579	2437	6
4,3	518	2648	8
4,3	519	2873	8,5
4,3	646	3179	21,5
4,3	758	3508	40,5
4,3	880	3792	


Figura B.3: Dimensiones del sector norte de la colada a4.

Brazo sur			
Pendiente (°)	Ancho (m)	Largo (m)	Espesor (m)
9,3	368	676	7,5
9,3	478	888	16,2
9,3	581	1089	30
9,3	601	1333	18,7
6,7	319	1558	15
6,7	316	1760	9
6,7	397	1968	14
6,7	463	2209	9,5
6,7	579	2533	6
4,3	686	2637	30
4,3	464	2917	17
4,3	226	3179	12,5
4,3	362	3443	16
4,3	54	3917	

Figura B.4: Dimensiones del sector sur de la colada a4.

Anexo C. Fotos de las muestras

Para la toma de fotos de las muestras obtenidas en terreno, se utilizó un lápiz de escala que posee 12 cm de largo.

Muestra: Pari.T1.M1.S

Parada: T1P4
Lava: Ajata superior (a4)
Observaciones: Roca de color gris oscuro con textura porfirica y fábrica isotropa, conformada por un 80% de masa fundamental de color plomo y un 20% de cristales, principalmente félsicos, pero igual hay presencia de máficos. El tamaño relativo de los cristales es inequigranular con tamaño de grano medio a grueso. La roca total presenta un 5% de vesículas y un leve magnetismo. La mineralogía de fenocristales corresponde a: Plagioclasa (85%) color blanco, hábito tabular de 0,1 a 1 cm, subhedral a euhedral, olivino(15%) color verdosa, de 0,1 a 0,3 mm, anhedral.

Muestra: Pari.T1.M2.S

Parada: T1P5
Lava: Ajata inferior (a3)
Observaciones: Roca de color gris con textura porfirica y fábrica isotropa, conformada por 93% de masa fundamental y 7% de fenocristales de olivinos. El tamaño relativo de los cristales es equigranular con tamaño de grano fino a medio. La roca total presenta un 1% de vesículas y un leve magnetismo. La mineralogía de fenocristales corresponde a: Olivino (90%) color verdoso, de 0,1 a 0,3 cm, anhedrales, plagioclasa (10%) color blanco subhedral de 1 cm.

Muestra: Pari.T1.M3.S



Parada: T1P6

Lava: Ajata inferior (a3)

Observaciones: Roca de color gris oscuro con textura porfírica y fábrica isotrópica, conformada por 90 % de masa fundamental y 10 % de fenocristales de olivinos y plagioclasa y cuarzo?. El tamaño relativo de los cristales es equigranular con tamaño de grano fino a medio. La roca total presenta un 3 % de vesículas y un leve magnetismo. La mineralogía de fenocristales corresponde a: Plagioclasa (50 %) color blanco, hábito tabular de 0,1 a 0,5 cm, subhedral a euhedral, olivino (50 %) color verdoso de 0,1 a 0,3 mm.

Muestra: Pari.T1.M4.S



Parada: T1P7

Lava: Ajata inferior antigua (a2)

Observaciones: Roca de color gris con textura porfírica y fábrica isotrópica, conformada por un 85 % una masa fundamental y un 11 % de plagioclasa, 3 % de olivino y 1 % de anfíboles. El tamaño relativo de los cristales es inequigranular con tamaño de grano fino a grueso. La roca total presenta un 1 % de vesículas y un leve magnetismo. La mineralogía de fenocristales corresponde a: Plagioclasa (74 %) color blanco, hábito tabular de 0,1 a 1 cm, subhedral a euhedral, olivino (20 %) color verde de 0,1 a 0,5 cm, anfíbol (6 %) de hábito tabular, color negro con clivaje paralelo.

Muestra: Pari.T1.M5.S



Parada: T1P8

Lava: Dacita Couleés (ocb)

Observaciones: Roca de color gris-burdeo con textura porfírica y fábrica isotrópica, conformada por un 60% de masa fundamental y 30% plagioclasa, 1% olivino y 9% biotita. El tamaño relativo de los cristales es inequigranular con tamaño de grano fino a grueso. La roca presenta un leve magnetismo. La mineralogía de fenocristales corresponde a: Plagioclasa (75%) color blanco, hábito masivo y tabular de 1 mm a 2,5 cm subhedral a euhedral, biotita (23%) de color negro, con hábito micáceo y tamaño de 0,1-0,3 cm aprox. subhedrales a euhedrales, el olivino (2%) de color verde, anhedral y tamaño 0,3-0,5 cm.

Muestra: Pari.T1.M6.S



Parada: T1P9

Lava: Dacita Couleés (ocb)

Observaciones: Roca de color gris-rosado con textura porfírica y fábrica isotrópica, conformada por un 60% de masa fundamental y 24% plagioclasa, 8% anfíbol y 8% biotita. El tamaño relativo de los cristales es inequigranular con tamaño de grano fino a grueso. La roca presenta un leve magnetismo. La mineralogía de fenocristales corresponde a: Plagioclasa (70%) color blanco, hábito masivo y tabular de 0,1.-2,5 cm subhedral a euhedral, biotita (20%) de color negro, con hábito micáceo y tamaño de 0,1-0,6 cm aprox. subhedrales a euhedrales, anfíbol (20%) de color negro, con clivaje en una dirección, subhedral de tamaño de 0,6 cm.

Muestra: Pari.T2.M1.S



Parada: T2P10

Lava: Ajata superior (a4)

Observaciones: Roca de color gris-oscuro con textura porfírica y fábrica isotrópica, conformada por un 85 % de masa fundamental y un 12 % de plagioclasa, 2 % de olivino y 1 % de cuarzo. El tamaño relativo de los cristales es equigranular con tamaño de grano fino a medio. La roca total presenta un 3 % de vesículas y un leve magnetismo. La mineralogía de fenocristales corresponde a: Plagioclasa (80%) color blanco, hábito tabular de 0,1 a 0,6 cm, subhedral a euhedral, olivino(13%) color verdosa, de 0,1 a 0,5 mm, anhedral, cuarzo (7%) color blanco, hábito masivo de 0,6 cm.

Muestra: Pari.T2.M2.S



Parada: T2P10

Lava: Ajata superior (a4)

Observaciones: Roca de color gris-oscuro con textura porfírica y fábrica isotrópica, conformada por un 83 % masa fundamental un 9 % plagioclasa, 1 % cuarzo, 2 % arcillas y 5%olivino. El tamaño relativo de los cristales es inequigranular con tamaño de grano fino a grueso. La roca total presenta un 10 % de vesículas y un leve magnetismo. La mineralogía de fenocristales corresponde a: Plagioclasa (53%) color blanco con hábito tabular euhedral a subhedral de tamaño de 0.1 a 0.5 cm, Olivino (30%) de color verde anhedral a subhedral y de tamaño 0.1 a 0.5 cm, Arcillas (12%) color blanco, dureza baja y normalmente reemplazando a plagioclasas, son de tamaño de 0.1 cm aprox. y cuarzo (5%) de color blanco anhedral de hábito masivo y 1.2 cm.

Muestra: Pari.T2.M3.S



Parada: T2P12

Lava: Ajata superior (a4)

Observaciones: Roca de color gris-oscuro con textura porfirica y fábrica isotropa, conformada por un 85 % masa fundamental, 12 % plagioclasa y 3 % olivino. El tamaño relativo de los cristales es inequigranular con tamaño de grano fino a medio. La roca total presenta un 1 % de vesículas y un leve magnetismo. La mineralogía de fenocristales corresponde a: Plagioclasa (80%) de color blanco, hábito prismáticos subhedral a euhedral de tamaño de 0.1-0.5 cm, olivino (20%) de color verde anhedral y tamaño de 0.1-0.4 cm.

Muestra: Pari.T2.M4.S



Parada: T2P13

Lava: Ajata superior (a4)

Observaciones: Roca de color gris-oscuro con textura porfirica y fábrica isotropa, conformada por un 85 % masa fundamental, 10 % plagioclasa y 5 % olivino. El tamaño relativo de los cristales es inequigranular con tamaño de grano fino a grueso. La roca total presenta un 1 % de vesículas y un leve magnetismo. La mineralogía de fenocristales corresponde a: Plagioclasa (67%) color blanco, hábito tabular subhedral a euhedral de 0.1 a 1.8 cm. Olivino (33%) de color verde anhedral a subhedral y tamaño de 0.1 a 0.5 cm.

Muestra: Pari.T2.M5.S



Parada: T2P14

Lava: Ajata superior (a4)

Observaciones: Roca de color gris-oscuro con textura porfirica y fábrica isotropa, conformada por un 85 % de masa fundamental, un 11 % plagioclasa y un 4 % de olivino. El tamaño relativo de los cristales es equigranular con tamaño de grano fino a grueso. La roca total presenta un 1 % de vesículas y un leve magnetismo. La mineralogía de fenocristales corresponde a: Plagioclasa (74%) color blanco, hábito tabular subhedrales a euhedrales de 0.1 a 0.5 cm. Olivino (16%) de color verde anhedrales a subhedrales y tamaño de 0.1 a 0.4 cm.

Muestra: Pari.T2.M6.S



Parada: T2P16

Lava: Ajata inferior antigua (a2)

Observaciones: Roca de color gris-oscuro con textura porfirica y fábrica isotropa, conformada por un 85 % de masa fundamental y 9 % de plagioclasa y 6 % de olivino. El tamaño relativo de los cristales es inequigranular con tamaño de grano fino a grueso. La roca total presenta un 5 % de vesículas y un leve magnetismo. La mineralogía de fenocristales corresponde a: Plagioclasa (60%) color blanco, hábito tabular de 0,1 a 1 cm, subhedral a euhedral, olivino (40%) color verde, hábito masivo de 0,2 cm, anhedrales a subhedrales.

Muestra: Pari.T2.M7.S



Parada: T2P17

Lava: Ajata inferior (a3)

Observaciones: Roca de color gris-oscuro con textura porfírica y fábrica isotrópica, conformada por un 97% de masa fundamental y 3% de fenocristales de olivino. El tamaño relativo de los cristales es equigranular con tamaño de grano fino a medio. La roca total presenta un 15% de vesículas y un leve magnetismo. La mineralogía de fenocristales corresponde a: Olivino (100%) de color verde, hábito masivo de 0,1-0,3 cm anhedrales.

Muestra: Pari.T2.M8.S



Parada: T2P17

Lava: Ajata inferior (a3)

Observaciones: Roca de color gris-oscuro con textura porfírica y fábrica isotrópica, conformada por un 98% de masa fundamental y 2% de olivino. El tamaño relativo de los cristales es equigranular con tamaño de grano fino a medio. La roca total presenta un 30% de vesículas y un leve magnetismo. La mineralogía de fenocristales corresponde a: Olivino (100%) de color verde, hábito masivo de 0,1-0,3 cm anhedrales.

Muestra: Pari.T2.M9.S



Parada: T2P18

Lava: Domo SW del flujo Ajata (d1)

Observaciones: Roca de color gris-claro con textura porfirica y fábrica isotropa, conformada por un 55% masa fundamental, 21% plagioclasa, 8% cuarzo, 5% biotita, 5% anfíbol, 3% arcillas y 3% mineral fibroso. El tamaño relativo de los cristales es inequigranular con tamaño de grano fino a muy grueso. La mineralogía de fenocristales corresponde a: Plagioclasa (47%) color blancas, hábitos masivos y tabulares subhedrales de tamaño de 0.1-3 cm, biotita (11%) de color negro, hábito micáceo subhedrales a euhedrales de 0.1-0.6 mm, anfíbol(11%) de color negro y brillo terroso y son subhedrales de 0.1-0.6 mm, Arcillas (6%) de color blancos, dureza baja y son anhedrales, cuarzo (18%) de color gris blanquecino hábito masivo y pareciera algunos aciculares, subhedrales a anhedrales y dureza alta y tamaño de 0.3-3 cm aprox, minerales fibrosos (7%) son de color blanco grisáceo, hábito fibroso y tamaños de 0.2 a 1.5 cm.

Muestra: Pari.T2.M10.S



Parada: T2P19

Lava: Ajata inferior antigua (a2)

Observaciones: Roca de color gris-oscuro con textura porfirica y fábrica isotropa, conformada por un 89% de masa fundamental, un 6% plagioclasa, un 3% olivino, un 1% anfíbol y 1% arcillas. El tamaño relativo de los cristales es inequigranular con tamaño de grano fino a grueso. La roca total presenta un leve magnetismo. La mineralogía de fenocristales corresponde a: Plagioclasa (54%) color blanco, hábito tabular anhedral a euhedral de 0.1 a 1 cm, olivino (27%) de color verde, anhedral de 0.1 a 0.3 cm, anfíbol (10%) de color negro rojizo de hábito tabular, subhedral y de tamaño de 0.1 a 0.5 cm y clivaje en una dirección, y arcillas (9%) de color naranja, dureza baja y tamaño 0.2 cm aprox.



Parada: T2P20

Lava: Ajata inferior (a3)

Observaciones: Roca de color gris con textura porfírica y fábrica isotropa, conformada por un 95% de masa fundamental y un 4% de olivino y 1% de plagioclasa. El tamaño relativo de los cristales es equigranular con tamaño de grano fino a grueso. La roca total presenta un 1% de vesículas y un leve magnetismo. La mineralogía de fenocristales corresponde a: Plagioclasa (20%) color blanco, hábito tabular de 0,1-0,2 cm, subhedral a euhedral, olivino(80%) color verdosa, de 0,1 a 1,3 cm, anhedral a subhedral.

Anexo D. Anchos de los levées

D.1. Ajata inferior (a3)

D.1.1. Flujo principal

Ajata Inferior Flujo Principal	
Perfil	Ancho levée (m)
13	
12	23,8
11	27,3
10	23,3
9	24
8	33,3
7	29
6	31
5	
4	
3	
2	
1	

Figura D.1: Se observa una tabla que muestra los datos de los anchos de los levées medidos de cada perfil. En aquellos casos en que no había levées o no se logró definir bien sus límites, los datos están en blanco.

Ancho del levée vs Distancia

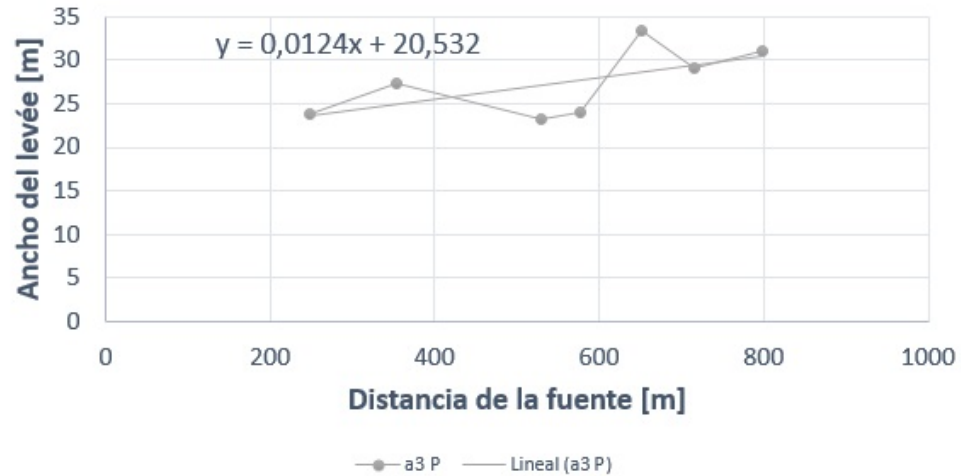


Figura D.2: Gráfico que muestra el ancho del levée vs. la distancia de la colada junto con su ecuación lineal para la colada a3 P.

Ajata Inferior Flujo Principal	
Perfil	Ancho levée (m)
13	15,8
12	23,8
11	27,3
10	23,3
9	24
8	33,3
7	29
6	31
5	32,5
4	33,8
3	35,1
2	36,3
1	37,6

Figura D.3: Se observa una tabla que muestra los datos de los anchos de los levées medidos y estimados para cada perfil. Los datos estimados se determinaron con la ecuación lineal y la distancia de la colada.

D.1.2. Lóbulo

Ajata Inferior Brazo	
Perfil	Ancho levée (m)
13	
12	23,8
18	12,5
17	14,3
16	26
15	25,7
14	

Figura D.4: Se observa una tabla que muestra los datos de los anchos de los levées medidos de cada perfil. En aquellos casos en que no había levées o no se logró definir bien sus límites, los datos están en blanco.

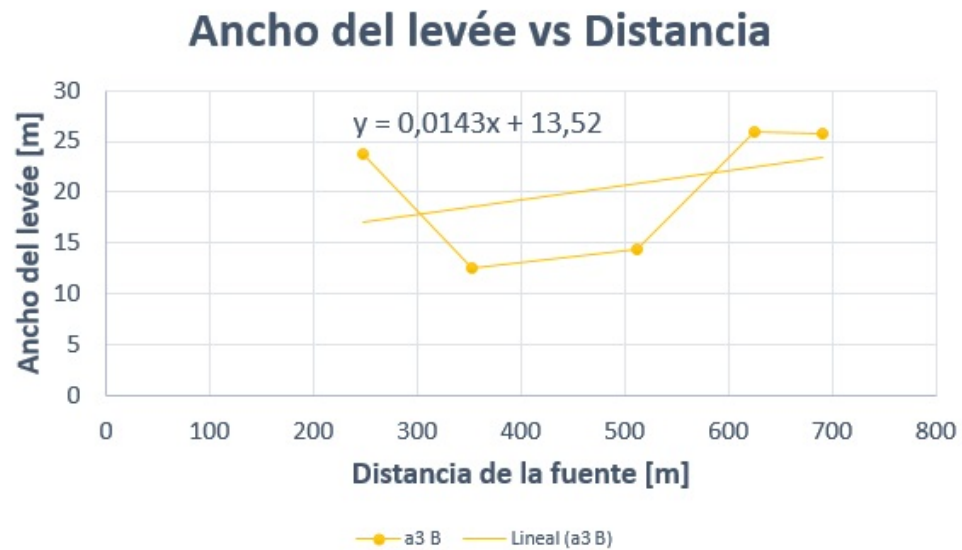


Figura D.5: Gráfico que muestra el ancho del levée vs. la distancia de la colada junto con su ecuación lineal para la colada a3 B.

Ajata Inferior Brazo	
Perfil	Ancho levée (m)
13	15,8
12	23,8
18	12,5
17	14,3
16	26
15	25,7
14	25,4

Figura D.6: Se observa una tabla que muestra los datos de los anchos de los levées medidos y estimados para cada perfil. Los datos estimados se determinaron con la ecuación lineal y la distancia de la colada.

D.2. Ajata superior (a4)

D.2.1. Flujo norte

Ajata Superior Flujo Norte	
Perfil	Ancho levée (m)
17	14
16	19,7
15	
14	29
13	19,7
12	28
11	38
10	26,8
9	30,9
8	23,8
7	
6	
5	

Figura D.7: Se observa una tabla que muestra los datos de los anchos de los levées medidos de cada perfil. En aquellos casos en que no había levées o no se logró definir bien sus límites, los datos están en blanco.

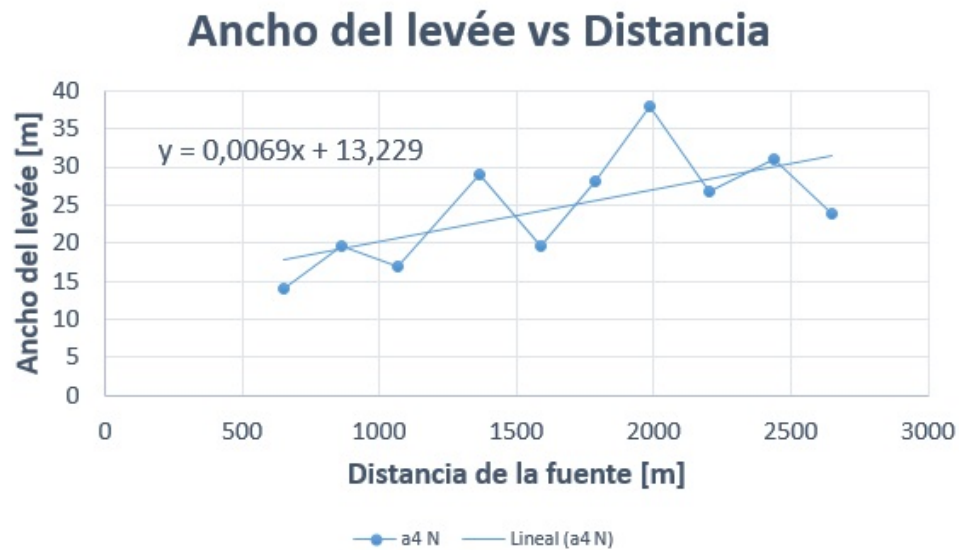


Figura D.8: Gráfico que muestra el ancho del levée vs. la distancia de la colada junto con su ecuación lineal para la colada a4 N.

Ajata Superior Flujo Norte	
Perfil	Ancho levée (m)
17	14
16	19,7
15	17
14	29
13	19,7
12	28
11	38
10	26,8
9	30,9
8	23,8
7	33,7
6	34,4
5	35,3

Figura D.9: Se observa una tabla que muestra los datos de los anchos de los levées medidos y estimados para cada perfil.

D.2.2. Flujo sur

Ajata Superior Flujo Sur	
Perfil	Ancho levée (m)
17	14
16	19,7
15	
14	29
13	19,7
12	28
11	38
10	26,8
9	30,9
4	
3	
2	
1	

Figura D.10: Se observa una tabla que muestra los datos de los anchos de los levées medidos de cada perfil. En aquellos casos en que no había levées o no se logró definir bien sus límites, los datos están en blanco.

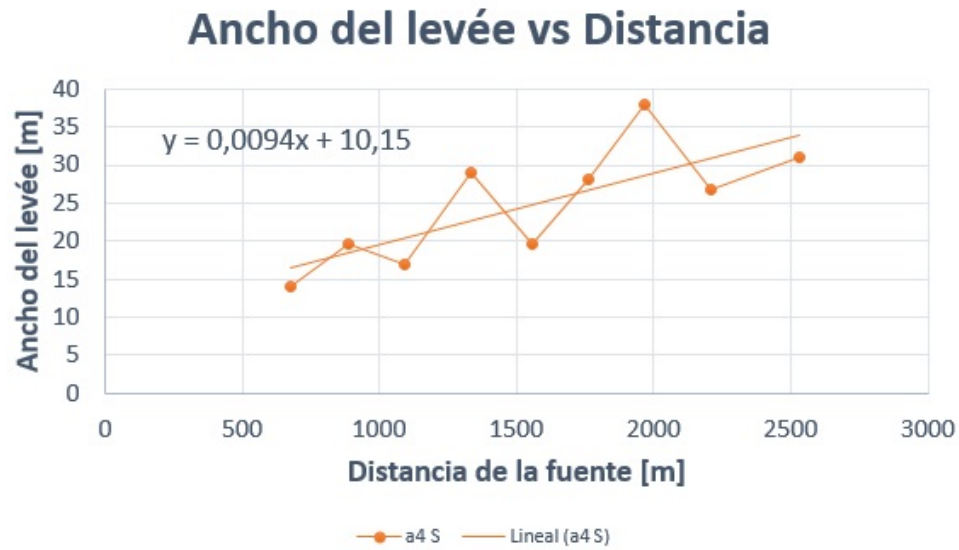


Figura D.11: Gráfico que muestra el ancho del levée vs. la distancia de la colada junto con su ecuación lineal para la colada a4 S.

Ajata Superior Flujo Sur	
Perfil	Ancho levée (m)
17	14
16	19,7
15	17
14	29
13	19,7
12	28
11	38
10	26,8
9	30,9
4	37,4
3	38,9
2	40,4
1	41,9

Figura D.12: Se observa una tabla que muestra los datos de los anchos de los levées medidos y estimados para cada perfil. Los datos estimados se determinaron con la ecuación lineal y la distancia de la colada.

Anexo E. Volumen de las coladas

E.1. Ajata inferior (a3)

E.1.1. Flujo principal

Perfil	Area (m2)	Profundidad promedio (m)	Volumen promedio (m3)
13	17259,032	8	138072,256
12	16472,503	10	164725,03
11	39639,517	16	634232,272
10	16266,236	19	309058,484
9	25878,099	18,5	478744,8315
8	24840,881	19,5	484397,1795
7	33899,243	18	610186,374
6	34470,805	15,5	534297,4775
5	53480,696	16	855691,136
4	77839,176	16,75	1303806,198
3	108887,995	16,5	1796651,918
2	69130,886	16,5	1140659,619
1	104266,684	17,75	1850733,641
frente principal	245190,728	21	5149005,288

Figura E.1: Se observa una tabla que muestra los valores del área, espesor promedio y volumen de los distintos segmentos en los que se dividió el flujo principal de la colada a3.

E.1.2. Lóbulo

Perfil	Area (m2)	Profundidad promedio (m)	Volumen promedio (m3)
13	17259,032	8	138072,256
12	16472,503	10	164725,03
18	16327,668	13,5	220423,518
17	15011,956	15,5	232685,318
16	8981,382	15	134720,73
15	10246,34	14,25	146010,345
14	13905,391	14,75	205104,5173
frente brazo	13935,525	19,5	271742,7375

Figura E.2: Se observa una tabla que muestra los valores del área, espesor promedio y volumen de los distintos segmentos en los que se dividió el lóbulo de la colada a3.

E.2. Ajata superior (a4)

E.2.1. Flujo norte

Perfil	Area (m2)	Profundidad promedio (m)	Volumen promedio (m3)
17	90368,78	7,5	677765,85
16	80981,51	7,5	607361,325
15	92582,183	6,5	601784,1895
14	146253,24	10	1462532,4
13	93044,711	14,75	1372409,487
12	62857,975	15	942869,625
11	67418,95	14,5	977574,775
10	86199,963	14	1206799,482
9	136388,699	14,5	1977636,136
8	116015,511	15,5	1798240,421
7	113348,726	16,5	1870253,979
6	174247,299	19,25	3354260,506
5	188478,556	31	5842835,236
frente norte	179895,995	29,75	5351905,851

Figura E.3: Se observa una tabla que muestra los valores del área, espesor promedio y volumen de los distintos segmentos en los que se dividió el sector norte de la colada a4.

E.2.2. Flujo sur

Perfil	Area (m2)	Profundidad promedio (m)	Volumen promedio (m3)
17	90368,78	7,5	677765,85
16	80981,51	7,5	607361,325
15	92582,183	6,5	601784,1895
14	146253,24	10	1462532,4
13	93044,711	14,75	1372409,487
12	62857,975	15	942869,625
11	67418,95	11,5	775317,925
10	86199,963	14	1206799,482
9	136388,699	14,5	1977636,136
4	116015,511	22,5	2610348,998
3	132264,025	29,5	3901788,738
2	84516,947	20,75	1753726,65
1	69149,762	14,25	985384,1085
frente sur	97612,861	13	1268967,193

Figura E.4: Se observa una tabla que muestra los valores del área, espesor promedio y volumen de los distintos segmentos en los que se dividió el sector sur de la colada a4.

Anexo F. Valores de coeficientes para la determinación de la densidad

F.1. Ajata inferior

input data in yellow							T°C =	P (MPa) =
Oxide	Wt. %	Mol. Wt.	Y _i Mol. Prop.	V _i at 1400°C	dV/dT	dV/dP	926	0,101325
SiO ₂	53,32	60,09	0,89	26,90	0,00	- 1,89	26,90	23,87
TiO ₂	1,63	79,88	0,02	23,16	7,24	- 2,31	19,73	0,40
Al ₂ O ₃	15,90	101,96	0,16	37,11	2,62	- 2,26	35,87	5,59
Fe ₂ O ₃	8,69	159,70	0,05	42,13	9,09	- 2,53	37,82	2,06
FeO	0,00	71,85	} 0,00	13,65	2,92	- 0,45	12,27	0,02
MnO	0,11	70,94						
MgO	5,03	40,31	0,12	11,45	2,62	0,27	10,21	1,27
CaO	7,52	56,08	0,13	16,57	2,92	0,34	15,19	2,04
Na ₂ O	4,28	61,98	0,07	28,78	7,41	- 2,40	25,27	1,74
K ₂ O	2,49	94,20	0,03	45,84	11,91	- 6,75	40,19	1,06
P ₂ O ₅	0,77	141,94	0,01				0,00	0,00
H ₂ O	0,03	18,02	0,00	17,00			17,00	0,03
Total	99,77		1,48				V _{liq} = ΣY _i V _i =	38,09
Units	g/100g	g/mol	mol/100g	cm ³ /mol	$\frac{10^{-3}\text{cm}^3}{\text{mol K}}$	$\frac{10^{-3}\text{cm}^3}{\text{mol MPa}}$	cm ³ /mol	cm ³ /100g

Figura F.1: Se observa una tabla que muestra los valores de las variables obtenidas por bibliografía para la determinación de la densidad de la colada a3, de acuerdo a su composición.

F.2. Ajata superior

input data in yellow							T°C =	P (MPa) =
Oxide	Wt. %	Mol. Wt.	Y _i Mol. Prop.	V _i at 1400°C	dV/dT	dV/dP	965	0,101325
							V _i at T&P	Y _i V _i
SiO ₂	58,70	60,09	0,98	26,90	0,00	- 1,89	26,90	26,28
TiO ₂	1,26	79,88	0,02	23,16	7,24	- 2,31	20,01	0,32
Al ₂ O ₃	16,40	101,96	0,16	37,11	2,62	- 2,26	35,97	5,79
Fe ₂ O ₃	6,77	159,70	0,04	42,13	9,09	- 2,53	38,18	1,62
FeO	0,00	71,85	0,00	13,65	2,92	- 0,45	12,38	0,02
MnO	0,09	70,94						
MgO	3,18	40,31	0,08	11,45	2,62	0,27	10,31	0,81
CaO	5,47	56,08	0,10	16,57	2,92	0,34	15,30	1,49
Na ₂ O	4,30	61,98	0,07	28,78	7,41	- 2,40	25,56	1,77
K ₂ O	2,86	94,20	0,03	45,84	11,91	- 6,75	40,66	1,23
P ₂ O ₅	0,46	141,94	0,00				0,00	0,00
H ₂ O	0,03	18,02	0,00	17,00			17,00	0,03
Total	99,52		1,48				V _{liq} = ΣY _i V _i =	39,36
Units	g/100g	g/mol	mol/100g	cm ³ /mol	10 ⁻³ cm ³ mol K	10 ⁻³ cm ³ mol MPa	cm ³ /mol	cm ³ /100g

Figura F.2: Se observa una tabla que muestra los valores de las variables obtenidas por bibliografía para la determinación de la densidad de la colada a4, de acuerdo a su composición.

Anexo G. Tasa eruptiva en el tiempo

G.1. Ajata inferior

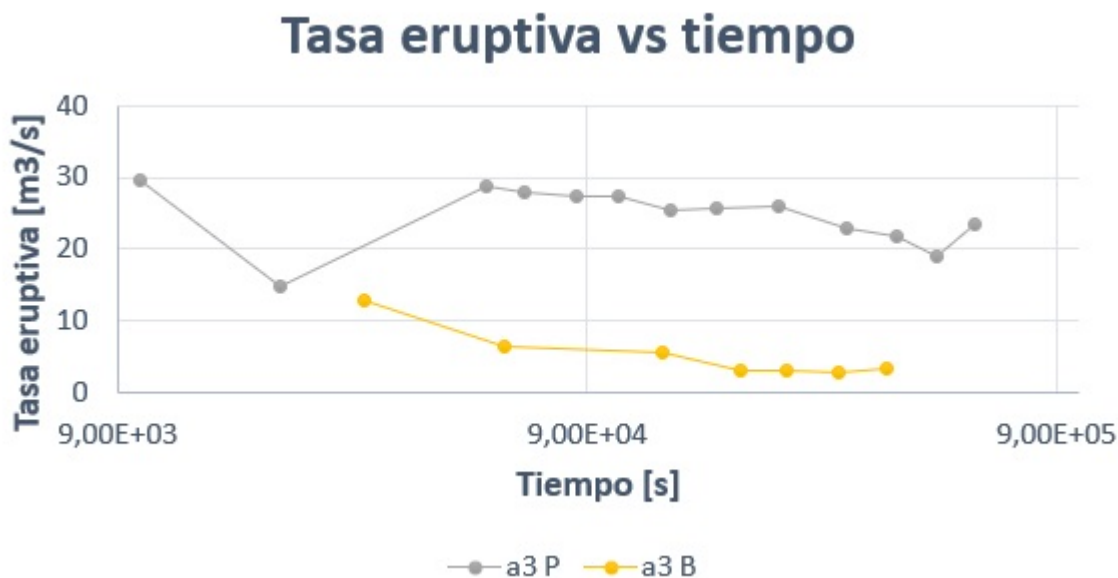


Figura G.1: Se observa un gráfico que muestra la evolución de la tasa eruptiva en el tiempo de duración de la colada Ajata inferior, según el modelo del YSC.

$$Q = 29,69 \cdot e^{-3,92 \cdot 10^{-7} \cdot x} \quad (\text{G.1})$$

$$Q = 14,53 \cdot e^{-3,78 \cdot 10^{-6} \cdot x} \quad (\text{G.2})$$

G.2. Ajata superior



Figura G.2: Se observa un gráfico que muestra la evolución de la tasa eruptiva vs. el tiempo de duración de la colada Ajata superior, según el modelo del YSC.

$$Q = 157,2 \cdot e^{-8,28 \cdot 10^{-7} \cdot x} \quad (\text{G.3})$$