



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

**IDENTIFICACIÓN DE PATRONES DE DISPERSIÓN PIROCLÁSTICA
ASOCIADA A LA COLUMNA DÉBIL DEL CORDÓN CAULLE (JUNIO
2011-MARZO 2012).**

GABRIELA DOMINIQUE JARA ABURTO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

PROFESOR GUÍA:

ÁLVARO AMIGO RAMOS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

ANGELO CASTRUCCIO ÁLVAREZ

ROBERTO RONDANELLI ROJAS

SANTIAGO DE CHILE

2014

A mi familia, porque sin ellos nada de esto habría sido posible.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a mi familia, a mis padres y a mi hermano, que siempre estuvieron dando su apoyo. A mis primos Rubén, Diego, Daniel, Cristian, Nicole y Karis, por subirme el ánimo cuando fue necesario y alentarme a seguir.

A mis compañeros de la U que me brindaron su apoyo, algunos desde los inicios de la mi vida universitaria otros al final. En especial a Giani y a Caro.

A mis compañeros de vida, gracias Tomás por siempre estar en las buenas, sobre todo en las malas.

A la gente del PRV, por su ayuda técnica, constantes enseñanzas y momentos de distensión tan necesarios.

Y a todos los que hicieron este trabajo posible.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Aspectos Generales	1
1.1.1. Aeronavegación.....	1
1.1.2. Impacto en la salud humana.....	3
1.1.3. Impacto en estructuras	5
1.1.4. Impacto ambiental	7
1.2. Caso Estudio.....	8
1.3. Objetivos	9
1.3.1. Objetivos Generales	9
1.3.2. Objetivos Específicos	9
1.4. Hipótesis del trabajo.....	10
1.5. Resultados	10
1.6. Trabajos previos.....	11
2. MARCO TEÓRICO.....	13
2.1. Columnas Eruptivas	13
2.1.1. Erupciones volcánicas tipo Plinianas.....	13
2.1.2. Columna Eruptiva	14
2.1.3. Tipos de Columnas.....	16
2.2. Detección remota	19
2.2.1. MODIS.....	19
2.2.2. Cámaras Web (OVDAS).....	22
2.3. Flujo de masa.....	23
2.4. Atmósfera.....	24

2.4.1.	Tropósfera	25
2.4.2.	Estratósfera	26
2.5.	Sismología en Volcanes.....	27
2.5.1.	Característica de los diferentes tipos de sismos.....	27
2.5.2.	Significado de las señales sísmicas de un volcán.	27
3.	MARCO GEOLÓGICO Y TECTÓNICO DEL COMPLEJO VOLCÁNICO PUYEHUE-CORDÓN CAULLE	29
3.1	Marco Geológico.....	30
3.1.1.	Basamento	30
3.1.1.1.	Paleozoico.....	30
3.1.1.2.	Mesozoico	30
3.1.1.3.	Cenozoico	30
3.1.1.3.1.	Oligoceno.....	30
3.1.1.3.2.	Mioceno.....	31
3.1.2.	Geología Complejo Volcánico Puyehue Cordón Caulle.....	31
3.1.2.1.	Caldera de la Cordillera Nevada	31
3.1.2.1.1.	Volcanismo escudo y secuencia pre-caldera.	32
3.1.2.1.2.	Fallas anulares y Volcanismo post-escudo.	32
3.1.2.2.	Cordón Caulle	33
3.1.2.2.1.	Secuencia pre-graben: Volcanismo de escudo.....	33
3.1.2.2.2.	Volcanismo intra-graben	33
3.1.2.3.	Volcán Puyehue	35
3.1.2.3.1.	Secuencia Pre-caldera.....	35
3.1.2.3.2.	Estrato volcán Post-caldera	35
3.2.	Marco Tectónico.....	35
4.	ERUPCIÓN CORDÓN CAULLE JUNIO 2011-MARZO 2012.....	38

4.1.	Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle (40.5°S 72.2°W).....	38
4.2.	Erupciones previas.....	38
4.3.	Erupción Junio 2011-Marzo 2012.	40
5.	METODOLOGÍA MODIS.....	50
5.1.	Métodos de visualización de imágenes satelitales MODIS	50
5.1.1.	Combinación de bandas espectrales.....	50
5.1.2.	BTD: Brightness Temperature Difference	52
5.2.	Métodos para estimar altura de la columna eruptiva.....	55
5.2.1.	CTOP: <i>Cloud Top Height</i>	55
5.2.2.	Método de la Sombra	58
5.2.3.	Altura a través de las webcam.....	61
6.	FLUJO DE MASA.....	62
6.1.	Flujo de masa.....	62
6.1.1.	Constantes	63
6.1.2.	<i>Entrainment</i>	63
6.1.3.	Atmósfera	64
6.1.4.	Gravedad reducida	65
6.1.5.	Perfil de vientos	65
6.1.6.	Flujo de masa	66
6.1.6.1.	Velocidad del viento	66
6.1.6.2.	Presión atmosférica.....	67
6.1.6.3.	Temperatura.....	68
6.2.	Parámetro adimensional Π	69
6.3.	Caso de estudio: 13 de Junio 2011	70
6.3.1.	Análisis de los datos de Radiosondeo	70

6.3.2.	Alturas medidas	76
6.4.	Resultados	78
7.	ANÁLISIS MENSUAL DE MODIS	81
7.1.	MODIS disponibles.....	81
7.2.	Análisis mensual	83
7.2.1.	Junio 2011	87
7.2.2.	Julio 2011	87
7.2.3.	Agosto 2011	88
7.2.4.	Septiembre 2011	89
7.2.5.	Octubre 2011	90
7.2.6.	Noviembre 2011	91
7.2.7.	Diciembre 2011.....	92
7.2.8.	Enero 2012	93
7.2.9.	Febrero 2012	94
7.2.10.	Marzo 2012	95
7.3.	Acumulativo.....	95
8.	EVOLUCIÓN MORFOLÓGICA DEL PENACHO VOLCÁNICO.....	101
8.1.	Aspectos generales.....	101
8.2.	Análisis mensual	102
8.2.1.	Junio	104
8.2.2.	Septiembre	107
8.2.3.	Noviembre	111
8.2.4.	Marzo.....	113
8.3.	Resumen de las distintas fases.....	117
9.	CASOS DESTACADOS	118

9.1.	20 Junio 2011	118
9.2.	18 Julio 2011	120
9.3.	1 Abril 2012	126
10.	DISCUSIONES	129
10.1.	Factores Internos y Externos	129
10.1.1.	Factores Externos o Exógenos	129
10.1.2.	Factores Internos o Endógenos	130
10.1.3.	Línea de tiempo de la erupción	132
10.2.	Detección de Ceniza	134
10.3.	Modelos de Viento	136
10.4.	Predicción	137
10.5.	Trabajos Futuros.....	138
10.5.1.	SO ₂	138
10.5.1.1.	Métodos Infrarrojos (IR)	138
10.5.1.1.1.	7.3 μm	138
10.5.1.1.2.	8.3 μm	139
10.5.1.2.	Métodos Ultra Violeta (UV).....	141
10.5.1.3.	Microondas.....	141
10.5.2.	Estimación de masa de ceniza	141
11.	CONCLUSIONES	143
12.	BIBLIOGRAFÍA	145
13.	ANEXOS	153
13.1.	Tablas	153
13.2.	Análisis de MODIS	172

INDICE FIGURAS

Figura 1.1 Resultado de los peritajes realizados al avión Boeing 747-400, luego del accidente. En la figura se observa la ceniza volcánica refundida en las turbinas, lo que generó el colapso de los motores. (Przedpelski & Casadevall, 1994).....	3
Figura 1.2 Ruinas de la ciudad de Pompeya, Octubre 2013. Al fondo, se observa el volcán Vesubio. Fuente propia.....	4
Figura 1.3 Imágenes MODIS captadas el día 19 de Febrero 2001, a la izquierda se observa según el método BTM la señal de ceniza, a la derecha se observa las emanaciones de SO ₂ según banda 8.6 μm. Watson et al 2004.....	12
Figura 2.1 Representación esquemática de las diferentes zonas de la columna eruptiva. Burden et al 2011	15
Figura 2.2 Columna eruptiva fuerte. Fuente Bonadonna & Phillips (2003).....	17
Figura 2.3 Columna eruptiva débil. Fuente Bonadonna & Phillips (2003).	17
Figura 2.4 Columna eruptiva del cordón Caulle. Fase fuerte. EFE.	18
Figura 2.5 Columna eruptiva del Cordón Caulle. Fase débil. Francisco Negroni.	18
Figura 2.6 Trayectoria aproximada de los satélites Terra y Aqua. NASA.....	20
Figura 2.7 Imagen captada por la cámara de Futangue, el 13 de Junio del 2011, a las 15:05 UTC.....	23
Figura 2.8 Esquema de la Atmósfera Terrestre. Adaptado de Enciclopedia Británica.....	24
Figura 3.1 Mapa de las zonas próximas al volcán (triángulo rojo).....	29
Figura 3.2 Perfil Volcán Cordón Caulle previo a la erupción 2011-2012. Lara & Moreno 2006.....	34
Figura 3.3 Esquema morfoestructural de la zona de estudio. Lara & Moreno 2006.....	37

Figura 4.1 Sobrevuelo realizado por el Ejército al inicio de la erupción. Fuente EFE.....	41
Figura 4.2 Salmones afectados por la erupción del Cordón Caulle, Rio Nilahue. Fuente AP.....	42
Figura 4.3 Villa la Angostura luego de la erupción. Foto Reuters.....	43
Figura 4.4 Imagen captada durante el sobrevuelo del volcán. Jorge Muñoz.	45
Figura 4.5 Imagen captada tras un año del inicio de la erupción. EMOL	49
Figura 5.1 A) Visualización en colores reales, bandas 3-2-1. B) Combinación de bandas 28-31-32 (Watson et al, 2004). Día 6 de Junio 2011, 14:25 UTC.	51
Figura 5.2 Adaptado de Watson et al., 2004. En el recuadro rojo se remarca la diferencia de pendiente que existe entre la ceniza volcánica y hielo entre las bandas 31 y 32 de imágenes MODIS.....	52
Figura 5.3 Imagen MODIS 13/06/2011 14:30 UTC. (a) Se observa una imagen sin tratar (bandas 3-2-1); (b) corresponde a la combinación de bandas 28-31-32 (Watson et al, 2004); en (c) se ve el resultado luego de aplicar el método BTM, donde se aprecia en negro la ceniza	54
Figura 5.4 Visualización de la temperatura de brillo en la banda 31.	57
Figura 5.5 Radiosondeo de Puerto Montt para el día 06 de Junio 2011, 12:00 UTC	58
Figura 5.6 Esquemas para calcular la altura de la columna a través de la sombra proyectada. (a) indica los ángulos γ y ψ . (b) indica los valores d (distancia) y h (altura).	59
Figura 5.7 Esquema indicando el ángulo horario (h) y la declinación solar (δ). Donde M corresponde al meridiano de Greenwich.	61
Figura 6.1 Perfil de viento. Bonadonna & Phillips 2003.....	66
Figura 6.2 Variación de flujo de masa a diferentes velocidades de viento	67
Figura 6.3 Variación de flujo de masa a diferentes presiones.	68
Figura 6.4 Variación de flujo de masa a diferentes temperaturas	69
Figura 6.5 Comparación de perfil de velocidad de viento a distintas horas.....	71

Figura 6.6 Perfil de temperatura modelos GDAS. 13 Junio 2011, 9 UTC.	72
Figura 6.7 Perfil de temperatura modelos GDAS. 13 Junio 2011, 12 UTC.	72
Figura 6.8 Perfil de temperatura modelos GDAS. 13 Junio 2011, 15 UTC.	73
Figura 6.9 Perfil de temperatura modelos GDAS. 13 Junio 2011, 18 UTC.	74
Figura 6.10 Perfil de temperatura modelos GDAS. 13 Junio 2011, 21 UTC.	74
Figura 6.11 Perfil de temperatura Radiosondeo Puerto Montt. 13 Junio 2011, (12 UTC).	75
Figura 6.12 Error en determinación de altura de las capas de la atmósfera	76
Figura 6.13 Imagen Capturada por la Web Cam de Futangue. 13 de Junio 2011, 16:25 UTC	77
Figura 6.14 Serie de alturas de la columna. 13 de junio 2011	77
Figura 6.15 Flujo Masa Caso Alto y Bajo	80
Figura 7.1 Distribución de las imágenes MODIS analizadas.....	81
Figura 7. 2 Ciudades consideradas para el análisis.	84
Figura 7.3 Porcentaje de días afectados para las ciudades de estudio durante el periodo eruptivo.	84
Figura 7.4 Dirección de dispersión medida para los diferentes meses de la erupción. Junio 2011-Marzo 2012	85
Figura 7.5 Dirección de dispersión para los diferentes meses de la erupción, según datos de Reanálisis, datos obtenidos cada 6 horas. Junio 2011- Marzo 2012.....	86
Figura 7.6 Rosa de dirección de dispersión entre Junio 2011-Marzo 2012.....	96
Figura 7.7 Porcentaje de días afectados para cada ciudad, entre Junio 2011- Marzo 2012.....	97
Figura 7.8 Imagen Aqua MODIS, 02 Julio 2011, 19:15 UTC.....	98
Figura 7.9 Evolución de la altura del penacho a lo largo de la erupción, mediante los métodos CTOP (azul) y el Método de la Sombra (rojo).....	99
Figura 7.10 Flujo de masa durante de la erupción del volcán Cautle.	100
Figura 8.1 Análisis de Tremor Continuo mensual. Álvaro Amigo	101

Figura 8.2 Análisis de Tremor Armónico mensual. Álvaro Amigo.....	102
Figura 8.3 Círculos concéntricos al volcán de diferentes radios.....	103
Figura 8. 4 Imagen BTM del 25 Junio 2011, 19:10 UTC.....	105
Figura 8. 5 Distancia recorrida, Junio 2011	106
Figura 8. 6 Apariencia de la columna día 6 Junio 2011, 18:40 UTC.	107
Figura 8.7 Apariencia de la columna día 17 de Septiembre 2011, 18:45 UTC. En colores reales (izquierda) no es posible distinguir a simple vista la ceniza, sin embargo a con el método BTM (derecha) se distingue una forma irregular con dispersión al W.	109
Figura 8.8 Distancia recorrida, Septiembre 2011	109
Figura 8.9 Apariencia de la columna día 12 Septiembre 2011, 14:15 UTC. BTM.....	110
Figura 8.10 Distancia recorrida, Noviembre 2011	111
Figura 8.11 Apariencia de la columna día 04 Noviembre 2011, 14:30 UTC. BTM.....	113
Figura 8.12 Distancia recorrida, Marzo 2012.....	114
Figura 8.13 Apariencia de la columna día 13 Marzo 2012, 19:45 UTC. BTM	115
Figura 8.14 Apariencia de la columna día 08 Marzo 2012, 18:15 UTC. BTM.....	116
Figura 9.1 Imagen Aqua MODIS, 20 Junio 2011, 18:50 UTC. Colores Reales	118
Figura 9.2 Trayectoria para las 18:00 UTC. La línea punteada marca la sección de perfil que aparece abajo.	119
Figura 9.5 Imagen BTM del día 18 de Julio 2011, 05:40 UTC	121
Figura 9.6 Imagen BTM del día 18 de Julio 2011, 15:05 UTC	122
Figura 9.7 Imagen BTM del día 18 de Julio 2011, 19:15 UTC	123
Figura 9.8 Diferentes concentraciones de ceniza volcánica cada 3 horas, del día 18 de Julio 2011	125
Figura 9.9 Apariencia de la columna día 01 Abril 2012, 19:05 UTC. A) Colores Reales. B) BTM.....	126
Figura 9.10 Secuencia de imágenes de la webcam de Futangue, el día 1 de Abril. Imágenes cada 2 min, desde 12:24 a 12:34 UTC.....	128

Figura 10.1 Comparación de vientos entre los meses de Septiembre 2011 y Noviembre 2011.	131
Figura 10.2 Línea de tiempo de toda le erupción. Altura de la columna, Registro sismico, Flujo de masa, Ciudades afectadas y Extensión promedio del penacho.	133

INDICE TABLAS

Tabla 1.1 Tabla comparativa de 10 cm de nieve v/s 10 cm de ceniza volcánica. USGS.....	5
Tabla 1.2 Efecto de diferentes cargas aplicada en construcciones para la erupción del volcán Rabaul, Papúa Nueva Guinea, 1994. USGS.	6
Tabla 1.3 Trabajos previos.....	12
Tabla 2.1 Características principales de erupciones tipo plinianas. Cioni et al, 1999.....	13
Tabla 2. 2 Características técnicas de imágenes satelitales MODIS. NASA.....	20
Tabla 4.1 Erupciones Históricas del complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle. Global Volcanism Program. Smithsonian Institute,	39
Tabla 5. 1 Variables ecuación 5.1 y 5.2	53
Tabla 6.1 Constantes	63
Tabla 6.2 Coeficiente de arrastre	63
Tabla 6.3 Constantes Atmosféricas.....	64
Tabla 6.4 Perfil Atmosférico. Wood (1988).....	64
Tabla 6.5 Flujo de masa a diferentes velocidades del viento	67
Tabla 6.6 Flujo de masa a diferentes presiones.....	68
Tabla 6.7 Flujo de masa a diferentes Temperaturas	69
Tabla 6.8 Variables de la ecuación 6.6	70
Tabla 6. 9 Variables Caso Alto y Caso Bajo.....	79
Tabla 7.1 Días sin información según mes.....	82
Tabla 7. 2 Porcentaje de días afectados, Junio 2011.....	87
Tabla 7.3 Porcentaje de días afectados, Julio 2011.....	88

Tabla 7.4 Porcentaje días afectados, Agosto 2011.....	89
Tabla 7.5 Porcentaje días afectados, Septiembre 2011.....	90
Tabla 7.6 Porcentaje de días afectados, Octubre 2011.....	91
Tabla 7.7 Porcentaje días afectados, Noviembre 2011.....	92
Tabla 7.8 Porcentaje días afectados, Diciembre 2011.....	93
Tabla 7.9 Porcentaje días afectados, Enero 2012.....	94
Tabla 7.10 Porcentaje días afectados, Febrero 2012.....	94
Tabla 7. 11 Porcentaje de días afectados, Marzo 2012.....	95
Tabla 7.12 Porcentaje de días afectados, Junio 2011-Marzo 2012.....	97
Tabla 8.1 Relación de aspecto del penacho para el mes de Junio 2011.....	104
Tabla 8.2 Relación de aspecto del penacho para el mes de Septiembre 2011.....	108
Tabla 8.3 Relación de aspecto del penacho para el mes de Septiembre 2011.....	112
Tabla 8.4 Relación de aspecto del penacho para el mes de Marzo 2012.....	116
Tabla 8.5 Tabla resumen de las fases claves.....	117
Tabla 9.1 Imágenes Satelitales 18 Julio 2011.....	121
Tabla 9.2 Vuelos Aeropuerto Tepual, Puerto Montt para el día 18 de Julio 2011.....	124
Tabla 10.1 Resumen mensual de cancelación de vuelos del aeropuerto Tepual, Puerto Montt.....	136

ANEXOS

Tabla 1 Fechas correspondientes a cada semana.....	153
Tabla 2 Detalle de imágenes satelitales MODIS disponibles por semanas.....	154
Tabla 3 Detalle Junio 2011.....	155
Tabla 4 Detalle Julio 2011.....	156
Tabla 5 Detalle Agosto 2011.....	157
Tabla 6 Detalle Septiembre 2011.....	158
Tabla 7 Detalle Octubre 2011.....	159

Tabla 8 Detalle Noviembre 2011	161
Tabla 9 Detalle Diciembre 2011	162
Tabla 10 Detalle Enero 2012.....	164
Tabla 11 Detalle Febrero 2012.....	165
Tabla 12 Detalle Marzo 2012	167
Tabla 13 Estimación de alturas con el método de la sombra. PRV.....	169
Tabla 14 Estimación de alturas mediante CTOP. Junio 2011- Marzo 2012.....	169
Tabla 15 Resumen días con vuelos cancelados, Aeropuerto Tepual, Puerto Montt	171

RESUMEN

El Objetivo principal de este trabajo consiste en determinar y analizar los factores que dominan el comportamiento del penacho volcánico, asociados a columnas eruptivas débiles. Este análisis permitirá una mejor comprensión de impactos a erupciones volcánicas cuya emisión es prolongada por meses, aunque con reducida acumulación en superficie.

En este estudio se trabajó con la erupción del Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle, que inició su actividad el día 4 de Junio 2011 continuando hasta fines de Marzo del 2012. La erupción se caracterizó por una fase inicial explosiva de dos a tres días, generando la mayor cantidad de depósitos piroclásticos. El resto de la erupción correspondió a un período de emisión menor, pero persistente, coetáneo con la erupción de lava de bloques.

Esta erupción generó diversos daños en las zonas aledañas al volcán, desde evacuación de población, en su etapa inicial hasta interrupción de vuelos comerciales, daños en la propiedad privada y ambiental.

Se trabajó con un total de 450 imágenes Satelitales MODIS a lo largo del período eruptivo, en los cuales se implementó el método BTM, con el fin de determinar zonas afectadas por la caída de ceniza, además se determinó direcciones de dispersión del

penacho y se caracterizó las diferentes fases de la erupción. Adicionalmente con el método CTOP se estimaron distintas alturas de la columna a lo largo de todo el período.

Finalmente, basándose en expresiones teóricas y observaciones tanto eruptivas como meteorológicas, fue posible estimar el flujo de masa a lo largo de la erupción.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Aspectos Generales

Las erupciones volcánicas tienen asociados diversos tipos de peligros geológicos, dentro los cuales se encuentran los lahares, caída de piroclastos, coladas de lava, flujos piroclásticos, emisión de gases tóxicos y en casos de gran magnitud, cambios climáticos.

La actividad volcánica es de preocupación en diversas áreas, tales como la población e infraestructura, pues genera problemas de salud, daños en la propiedad privada (colapso de techos por la ceniza, destrucción total o parcial producto de flujos piroclásticos o lahares, etc.), pérdidas en la agricultura y ganadería, y daños millonarios en la aeronáutica, estropeando turbinas de las naves, cancelando vuelos, e incluso colapsando aviones en pleno vuelo.

1.1.1. Aeronavegación

Una de las dificultades mayores ocasionadas por la ceniza generada en erupciones volcánicas explosivas, corresponde a los daños a la aeronáutica. La ceniza asciende por la columna eruptiva y posteriormente se ve afectada por la acción del viento, expandiéndose rápidamente en la atmosfera, afectando zonas a kilómetros de distancia del origen. Esto, sumado a la imposibilidad de detectar la ceniza volcánica

mediante los radares de los aviones (Miller y Casedevall, 1999), puede constituir una trampa mortal para vuelos, si es que no se toman las medidas de prevención apropiadas.

El día 15 de Diciembre de 1989 el vuelo comercial 867 de KML, proveniente de Ámsterdam en dirección a Alaska, se encontraba realizando maniobras de descenso cuando los cuatro motores de la maquina fallaron. El avión, modelo Boeing 747-400 con solo unos meses de funcionamiento, se encontró en pleno vuelo con una nube de ceniza volcánica generada luego de la erupción del Monte Redoubt (Alaska). Debido a esto, el avión con 245 personas a bordo, se fue en picada. Afortunadamente los pilotos pudieron reactivar los motores antes de colisionar, logrando realizar un aterrizaje de emergencia, evitando así una gran tragedia (Comité de comercio, y transporte del Senado de los Estados Unidos, Informe de Impacto Volcánico en la aviación). En la Figura 1.1, se observan resultados de los peritajes realizados a la aeronave luego del aterrizaje, en donde se aprecia el daño generado por la ceniza en distintas partes de la turbina.

El caso anterior fue el primero que demostró el daño potencial que puede generar la ceniza proveniente de un penacho eruptivo a la delicada maquinaria de los aviones. La ceniza es un polvo extremadamente fino, lo que permite la infiltración en lugares que la tierra o polvo común no logra penetrar, y por ser abrasivo, ocasiona diversos daños, ya sea atrofiando motores, dañando ventanas o turbinas.

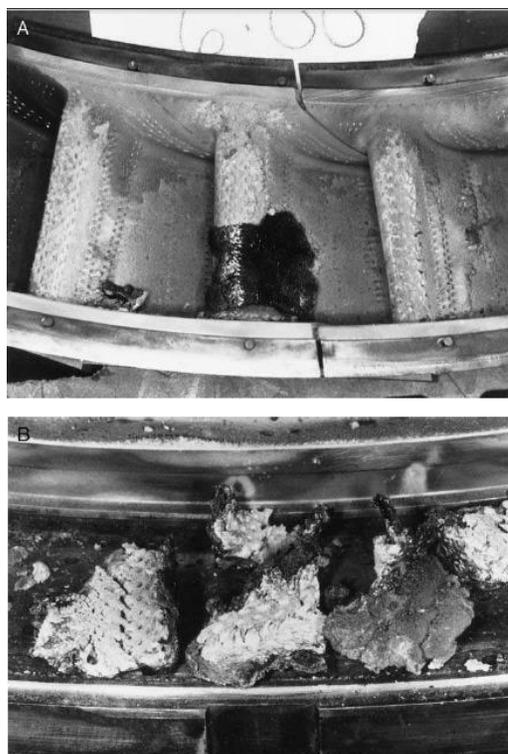


Figura 1.1 Resultado de los peritajes realizados al avión Boeing 747-400, luego del accidente. En la figura se observa la ceniza volcánica refundida en las turbinas, lo que generó el colapso de los motores.

(Przedpelski & Casadevall, 1994)

Otro ejemplo de las posibles perturbaciones en la aeronavegación quedó en evidencia recientemente durante la erupción del volcán Eyjafjallajökull, en Islandia en el 2010, el cual generó una suspensión de más de 100.000 vuelos comerciales en Europa, generando graves pérdidas económicas y afectando directamente la conectividad de este continente con el mundo.

1.1.2. Impacto en la salud humana

Las erupciones volcánicas poseen un gran rango de potenciales peligros: emisión de lava, flujos piroclásticos, lahares, avalanchas volcánicas, caída de tefra o emisión de

gases nocivos. Históricamente se conocen varios casos en donde la actividad volcánica ha generado numerosas pérdidas humanas: la erupción de Monte Vesubio en el 79 dC. mató a los ciudadanos de Pompeya y Herculano (Figura1.2); Monte Peleé en Martinica, 1902, devastando a la ciudad de Saint Pierre, con 28.000 víctimas (solo 2 personas lograron salir con vida); Los Nevados del Ruiz (1985), en donde un lahar borró del mapa a la ciudad de Armero, Colombia, en donde murieron tres cuartas partes de la población (aproximadamente 20.000 personas). Estos son algunos de los cientos de casos en donde la vida humana fue afectada directamente por la actividad volcánica. Es por ello que es de extrema necesidad conocer y comprender el comportamiento volcánico de nuestro país, con el fin de evitar posibles catástrofes.



Figura 1.2 Ruinas de la ciudad de Pompeya, Octubre 2013. Al fondo, se observa el volcán Vesubio.

Fuente propia.

Dentro de los efectos nocivos para la salud generados por la emisión de ceniza volcánica, se encuentran una serie de enfermedades respiratorias como la silicosis (Baxter et al 1999). El material particulado bajo los 10 μm (PM_{10}) de diámetro puede atravesar los alveolos pulmonares alojándose en ellos, generando esta enfermedad. Además cantidades suficientes de material particulado fino (5-10 μm) irrita los pulmones generando síntomas de asma. Según la norma medioambiental de Reino Unido, los valores aceptables de PM_{10} es de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sin embargo durante una caída significativa de ceniza volcánica, estas partículas pueden alcanzar valores del orden de mg/m^3 (Baxter, 1999).

1.1.3. Impacto en estructuras

Los colapsos de techo generados por la sobrecarga causada por la ceniza, es uno de las consecuencias más importantes. Esto además es potenciado cuando la ceniza se mezcla con agua (debido a lluvias), aumentando su densidad. En la Tabla 1.1 se realiza una comparación de la carga generada por 10 cm de nieve v/s 10 cm de ceniza, en donde la ceniza volcánica aumenta en un orden de magnitud con respecto a la nieve. Además es importante destacar que en ambientes húmedos, como es el caso del Cordón Caulle, la ceniza puede aumentar al doble de su densidad por la retención de agua.

Tabla 1.1 Tabla comparativa de 10 cm de nieve v/s 10 cm de ceniza volcánica. USGS¹.

Descripción	Densidad [kg/m^3]	Carga [kPa]
Nieve Fresca	50-70	0.05 - 0.07

¹ <http://volcanoes.usgs.gov/ash/build/>

Nieve Húmeda	100-200	0.1-0.2
Nieve Compactada	200-300	0.2-0.3
Ceniza Volcánica Seca	500-1300	0.5-1.3
Ceniza Volcánica Húmeda	1000-2000	1.0-2.0

Dentro de un estudio realizado en construcciones durante la erupción del volcán Rabaul (1994), se determinó que el valor crítico de espesor de depósito de ceniza (húmeda) para que algunas estructuras comenzaran a colapsar es de 100 mm (Tabla 1.2). Además se estima que sobre los 600 mm no existe estructura que resista la sobrecarga aplicada. Es importante considerar también que muchas de las viviendas en las cercanías del complejo volcánico cordón Caulle son de localidades rurales, y en muchos casos, corresponden a estructuras de autoconstrucción que no cumplen la normativa de construcción, por lo que es probable que colapsen con menos de 10 cm de ceniza.

Tabla 1.2 Efecto de diferentes cargas aplicada en construcciones para la erupción del volcán Rabaul, Papúa Nueva Guinea, 1994. USGS².

Espesor de ceniza [mm]	Carga Estimada [kPa]	Daño observado en los techos
< 100	1.5-2.0	Techos y canaletas generalmente intactos
< 200	3.0-4.0	Entre el 80-90% de los techos se mantiene intacto con algunos efectos de daño. Hundimientos o colapsos parciales aparecen en algunas construcciones.
< 300	4.5-6.0	Más del 50% de los techos no colapsa.
500-600	7.5-12.0	Más del 50% de los techos colapsa.
> 600	9.0-12.0	Es dudoso que alguna construcción lograra mantenerse intacta con tanto daño, incluso aquellas donde el techo quedó intacto.

² <http://volcanoes.usgs.gov/ash/build/>

Otra consecuencia de la caída de ceniza es el colapso de la infraestructura eléctrica, generando la interrupción de dicho abastecimiento. Estudios demuestran que sobre 1 mm de espesor en el caso húmedo y 2 mm en caso seco, es suficiente para sobrecargar el tendido eléctrico (Bebbington et al., 2008).

1.1.4. Impacto ambiental

La caída de ceniza volcánica también puede alterar el equilibrio presente en el ecosistema. Un estudio realizado en Argentina luego de la erupción del volcán Chaitén (2008) demostró un alzamiento de concentración de algunos elementos traza en lagos tales como B, Cd, Zn, Tl, Cu y Ni. Además de un aumento en la salinidad y acidez de las aguas (Martin et al. 2009).

Otro de los impactos en el medio ambiente, es un cambio en la temperatura atmosférica. En el caso de la erupción del Monte Pinatubo (1991) generó un descenso de la temperatura global en la tropósfera en 0.4 grados Celsius durante el año 1992 (McCormick et al., 1995). Un caso extremo es el de la erupción del Volcán Tambora (1815), el cual generó un enfriamiento global ocasionado el llamado "Año sin Verano" en 1816, destruyendo cosechas, provocando nevazones en zonas cercanas al ecuador, generando hambrunas a nivel mundial e incluso alteración en la economía debido a un aumento desmedido del precio de los alimentos.

Estos cambios pueden afectar directamente el delicado ecosistema, ocasionado en muchos casos, la disminución de la población en las especies más susceptibles.

1.2. Caso Estudio

En este trabajo se analizó la erupción del Complejo Volcánico Puyehue Cordón Caulle, ocurrida entre Junio 2011 y Abril 2012. Este Complejo Volcánico se encuentra ubicado en la zona volcánica sur, a 83 km al E de la ciudad de Osorno, entre los lagos Ranco y Puyehue.

Esta erupción tuvo consecuencias en el tráfico aéreo, ocasionando la cancelación de 378 vuelos comerciales, tan solo en el aeropuerto de Tepual, Puerto Montt (ver Tabla 15 en los Anexos), además de cientos de vuelos en el resto de la zona sur de Chile, Argentina, Uruguay, zona sur de Brasil, Sudáfrica, Australia y Nueva Zelanda.

Adicionalmente perjudicó la calidad de vida en diferentes zonas cercanas, siendo Villa la Angostura, Argentina, una de las ciudades más afectas por la caída de ceniza, dañando infraestructura, generando cortes de camino, interrupción en el suministro eléctrico, además de un daño considerable al rubro turístico, principal sustento económico de la zona.

En la agricultura y ganadería también generó pérdidas, tales como la muerte de millones de salmones debido al aumento de la temperatura del río Nilahue. Daños en los pastizales de las zonas aledañas, generando un desabastecimiento de alimento para el ganado local, además de animales enfermos producto de la ingesta de ceniza.

La importancia del estudio de esta erupción en particular recae en el comportamiento que posee el penacho volcánico, el cual, debido a su baja altura, se rige por patrones de viento superficiales, teniendo como resultado una dirección de

dispersión cambiante de tiempos breves (horas). La predicción adecuada y la comprensión de los patrones de comportamiento de este tipo de erupción es fundamental para prevenir accidentes y alertar a la población en forma oportuna.

La cronología de la erupción se tratará con mayor detalle en el capítulo 4: “Erupción Cordón Caulle Junio 2011-Marzo 2012”.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivos Generales

- Analizar los factores (endógenos y exógenos) que dominan la dinámica de la columna eruptiva débil asociada a la erupción del Cordón Caulle.
- Desarrollar una herramienta de análisis expedito como apoyo a la identificación de zonas vulnerables para la aeronavegación.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Analizar factores determinantes del flujo de mediante el método de Degruyter y Bonadonna (2012).
- Estudiar la evolución del penacho volcánico considerando alturas y dirección de dispersión de la columna eruptiva.

- Determinar características distintivas de cada una de las fases eruptivas definidas por el registro sísmico, considerando forma, dimensiones y concentración de la señal de ceniza volcánica.
- Reconocer las zonas más afectadas por la caída de ceniza.

1.4. Hipótesis del trabajo

La presencia de piroclastos en la atmósfera derivados de la fase de columna débil de la erupción del Complejo Volcánico Cordón Caulle (Junio 2011 y Marzo 2012) es detectable por medio de sensores satelitales, siendo posible reconstruir su evolución en el tiempo. La dinámica que rige la emisión y transporte piroclástico obedece a la interacción de factores endógenos (internos del volcán) y exógenos (atmosféricos).

1.5. Resultados

Para este trabajo se realizó una estimación de flujo de masa de la erupción para un caso clave, mediante la metodología implementada en el trabajo de Degruyter y Bonadonna (2012). Además se estudiaron los diversos factores que influyen en el aumento o disminución del flujo de masa.

Se obtuvo una serie de tiempo mensual desde el inicio de la erupción hasta el fin de esta. Contemplando direcciones de dispersión del penacho volcánico, cuantificación de días afectados por la caída de ceniza volcánica en las ciudades más importantes de

los alrededores (Concepción, Temuco, Valdivia, Osorno y Puerto Montt en Chile, y San Martín de los Andes y Bariloche en Argentina).

Además se realizó un estudio acucioso de las distintas fases de la erupción:

- Fase inicial: Junio 2011
- Fase de baja actividad: Septiembre 2011
- Fase de reactivación: Noviembre 2011
- Fase terminal: Marzo 2012

Contemplando diferentes alturas de la columna, morfología del penacho y radio de alcance de la señal de ceniza.

Finalmente se estudiaron casos particulares dentro de la erupción, ya sea por sus variaciones en la dirección de dispersión, anomalías en la señal de ceniza, o simplemente hechos curiosos por su dispersión inusual (ej. 20 Junio 2011, con 3 direcciones de dispersión marcadas).

1.6. Trabajos previos

En la Tabla 1.3 a continuación se mostrará una recopilación de diferentes trabajos que utilizaron los sensores remotos como MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), TOMS (*Total Ozone Mapping Spectroradiometer*), AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*), AIRS (*Atmospheric Infrared Sounder*), ASTER (*Advanced*

Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), MTSAT (Multifunctional Transport Satellite) para la detección de material volcánico, en diferentes erupciones alrededor del mundo.

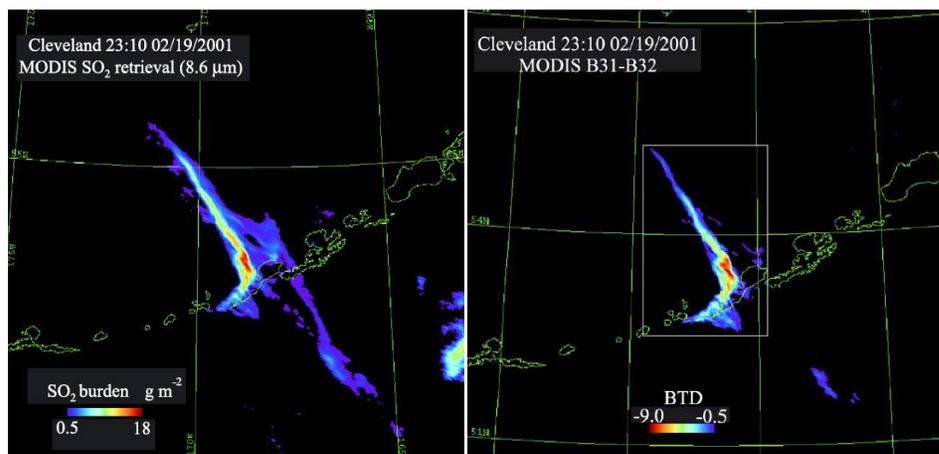


Figura 1.3 Imágenes MODIS captadas el día 19 de Febrero 2001, a la izquierda se observa según el método BTD la señal de ceniza, a la derecha se observa las emanaciones de SO₂ según banda 8.6 μm .

Watson et al 2004.

Tabla 1.3 Trabajos previos

Caso estudio	Ubicación	Trabajo	Metodologías implementadas	Sensores
Hekla 2000	Islandia	Watson et al 2004	BTD, Combinación de bandas 28-31-32 y emisión de SO ₂	MODIS y TOMS
Popocatepetl 2000-2001	México	Novak et al 2007	COSPEC, BTD, Absorción en 7.3 μm y a 8.6 μm para SO ₂	MODIS, AVHRR y GOES-8
Cleveland 2001	Alaska, EEUU	Watson et al 2004	BTD, Combinación de bandas 28-31-32 y emisión de SO ₂	MODIS y TOMS
Etna 2002, 2006 y 2007	Italia	Piscini et al 2001	BTD _{wvc}	AVHRR
Tangurahua 2002-?	Ecuador	Steffke et al 2010	Altura columna	MODIS y GOES
Anatahan 2003	Islas Marianas	Wright et al 2004	Emisiones de SO ₂	MODIS, AIRS, EP TOMS y ASTER
Volcán de Fuego de	México	Jiménez Escalona et al	BTD, Combinación de bandas 29-32-31 (SO ₂) y COSPEC	MODIS
Kasatochi 2008	Alaska, EEUU	Corradini et al 2010	BTD, masa de ceniza y SO ₂	MODIS, AVHRR y AIRS
Sarychev 2009	Islas Matua, Rusia	Rybin et al 2011	BTD, SO ₂	MODIS, AVHRR y MTSAT

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Columnas Eruptivas

2.1.1. Erupciones volcánicas tipo Plinianas

Las erupciones tipo plinianas (Subplinianas, Plinianas y Ultraplínianas o Ignimbríticas) son unos de los diferentes tipos de erupciones que existe, siendo éstas aquellas que generan mayor descarga de masa. Se caracterizan por la formación de una columna eruptiva alta y convectiva, la cual es dispersada por el viento, afectando una enorme área. El nombre "Pliniana" proviene de Plinio el Joven, quien escribió cartas a Tácito relatando la erupción del Monte Vesubio, en el año 79 DC, constituyendo el primer relato escrito de una erupción volcánica del cual se tenga antecedentes (Cioni et al, 1999).

En la Tabla 2.1 se resumen las principales características de las erupciones tipo plinianas.

Tabla 2.1 Características principales de erupciones tipo plinianas. Cioni et al, 1999.

Tipo de Erupción	Subplinianas	Plinianas	Ultraplínianas o Ignimbríticas
Magnitud [kg]	$\approx 10^{11}$	$10^{11} - 10^{13}$	$> 10^{13}$
Intensidad [kg/s]	$\approx 10^6$	$10^6 - 10^8$	$> 10^8$
Altura de Columna [km]	< 20	20-35	> 35
Espesor a media distancia (b _i , Km)	0.5 - 4	2 - 10	8 - 15
Clastos a media distancia (b _c , Km)	1 - 3	3 - 8	8 - 15
Fases principales	Columna convectiva inestable	Columna convectiva estable	Fuente estable

Estilos eruptivos asociados	Oleadas, Generación de domos	Colapsos parciales o totales de columna	Columna eruptiva con incremento del tasa de flujo
Depósitos de caída principales	Finalmente estratificado	Masivo o gradación variable	Generalmente, gradación inversa
Depósitos de flujo principales	Oleadas y flujos de escorias y pómez de menor tamaño.	Pómez y flujos de ceniza	Ignimbritas con alta y baja gradación.
Proporción Caída/Flujo	>1	>1	<< 1
Composición magmática típica	Medianamente evolucionada (Dacitas, Tefrita Fonolítica)	Altamente evolucionada (Riolitas, Traquitas, Tefrita Fonolítica)	Altamente evolucionada (Riolitas, Traquitas)

Para este trabajo se estudiará el caso de la erupción del Cordón Caulle (Junio 2011-Marzo/Abril 2012), por lo que estará enfocado únicamente en las erupciones subplinianas. En particular, en la columna eruptiva que se genera a partir de esta erupción.

2.1.2. Columna Eruptiva

En las erupciones explosivas, los volcanes expulsan a la atmósfera enormes cantidades de piroclastos y gases (principalmente H₂O, CO₂ y SO₂, entre otros), los cuales se mezclan con el aire circundante generando una densa nube que asciende en forma de columna eruptiva.

Las Columnas eruptivas pueden ser divididas en tres zonas principales: *Gas Thrust Region*, *Convective Region* y *Umbrella Region* (Francis y Oppenheimer, 1993). En la Figura 2.1, se observa un esquema de las diferentes zonas.

A continuación de la *Gas Thrust Region*, comienza la Zona Convectiva o *Convective Region*. En este sector el aire circundante comienza a incorporarse en la columna, producto de la diferencia de temperatura y densidad que existe entre la

atmósfera y la columna, generando un alzamiento de esta de manera análoga a lo que ocurre con un globo de aire caliente. Este fenómeno de incorporación de aire a la columna continúa hasta que ésta se equilibra térmicamente con la atmósfera, llegando a un punto de flotabilidad neutra, también llamada H_b .

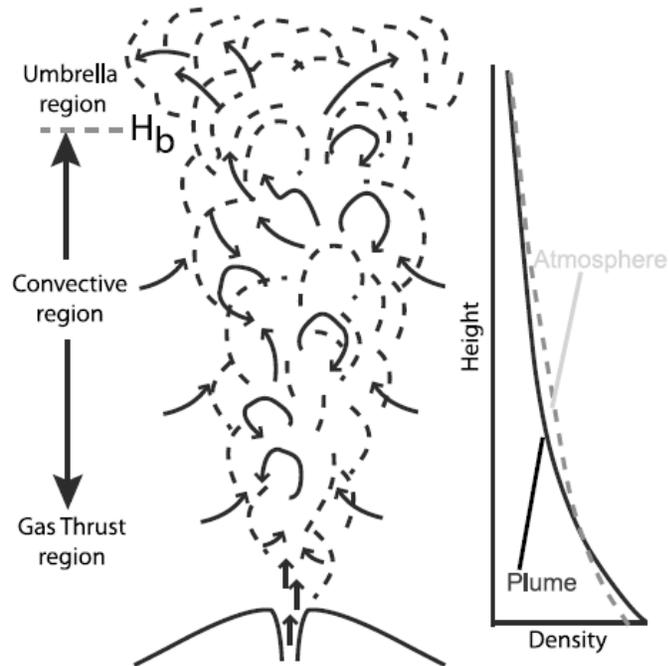


Figura 2.1 Representación esquemática de las diferentes zonas de la columna eruptiva. Burden et al 2011

La zona superior es conocida como *Umbrella Region* (Región Paraguas), por su forma extendida alrededor de la columna. En esta zona el penacho se mantiene estable en torno a la altura H_b . La altura máxima alcanzada por la columna (H_t) es aproximadamente 1.4 veces mayor a H_b (Bonadonna & Phillips, 2003).

En esta zona de flotabilidad neutra la fuerza de la erupción deja de tener efecto, por lo que la dinámica es controlada únicamente por la atmósfera. Bajo esto, la dispersión del penacho, corresponde a la misma que la velocidad del viento para esa altura; y la temperatura es la misma que la atmósfera circundante, dado que se alcanzó el equilibrio entre ambos medios. Gracias a esto, es posible determinar los valores de velocidad y de temperatura mediante la correlación con los datos de los radiosondeos, dada una altura conocida.

2.1.3. Tipos de Columnas

Existen dos tipos de columnas según clasificación de fuerza: las columnas fuertes y las columnas débiles. Las columnas eruptivas fuertes se caracterizan por tener la zona convectiva subvertical, y la zona de umbrela o paraguas bien demarcada. La velocidad de dispersión va acorde a la velocidad del viento, como se observa en la Figura 2.2.

En cambio, las columnas eruptivas débiles se caracterizan por tener velocidades verticales menores a la velocidad del viento. Debido a esto, la zona de convección se observa inclinada a favor del viento y la zona de paraguas se visualiza únicamente en dirección de la corriente, a diferencia de lo que ocurre con las columnas fuertes. En la Figura 2.3 se observa una versión esquemática de la columna débil.

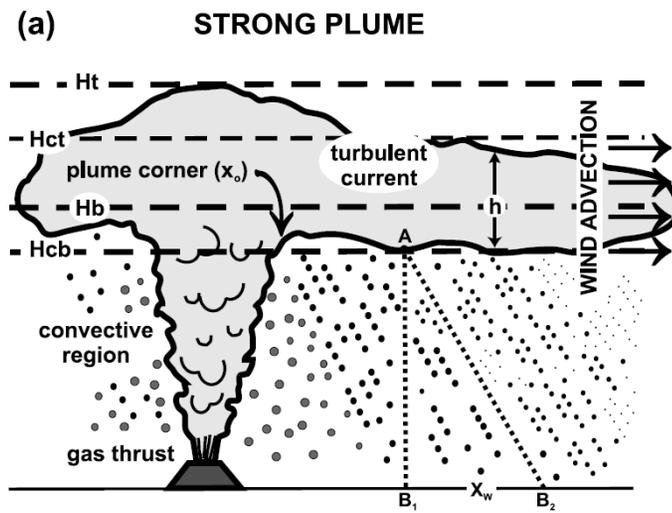


Figura 2.2 Columna eruptiva fuerte. Fuente Bonadonna & Phillips (2003).

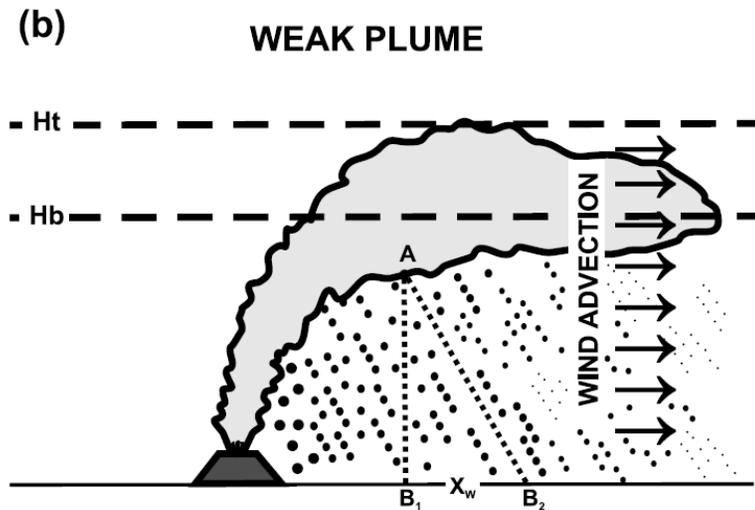


Figura 2.3 Columna eruptiva débil. Fuente Bonadonna & Phillips (2003).

En la Figura 2.4 se observa la fase de columna fuerte del volcán Caulle, y en la Figura 2.5, la fase débil.



Figura 2.4 Columna eruptiva del cordón Caulle. Fase fuerte. EFE.



Figura 2.5 Columna eruptiva del Cordón Caulle. Fase débil. Francisco Negroni.

2.2. Detección remota

Para analizar la erupción volcánica en estudio se utilizaron dos tipos de instrumentos de detección remota. Las imágenes satelitales MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), correspondiente a los satélites de la NASA Aqua y Terra. Adicionalmente se utilizaron imágenes provenientes de la webcam de la estación Futangue, del OVDAS (Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur).

2.2.1. MODIS

Terra y Aqua son satélites EOS (Sistema de observación terrestre) de la NASA puestos en órbita el año 1999 y 2002 respectivamente. Ambos satélites, poseen una órbita sincrónica al sol, cercana a los polos y circular de 705 km de nodo descendiente, para el satélite Terra, y de 680 km de nodo ascendiente, en el caso de Aqua. Estos artefactos son empleados para capturar imágenes de la superficie terrestre, donde cada una tiene un ancho de 2.330 km con 10.000 km de largo, pudiendo completar un barrido completo de la esfera terrestre entre 1 y 2 días.

En la Figura 2.6 se observa una trayectoria aproximada que realizan los satélites de la NASA Terra y Aqua. Aquí se observa específicamente la trayectoria del satélite Terra, el cual pasa aproximadamente entre 3:00- 5:00 UTC y entre 14:00-16:00 UTC por sobre el volcán.

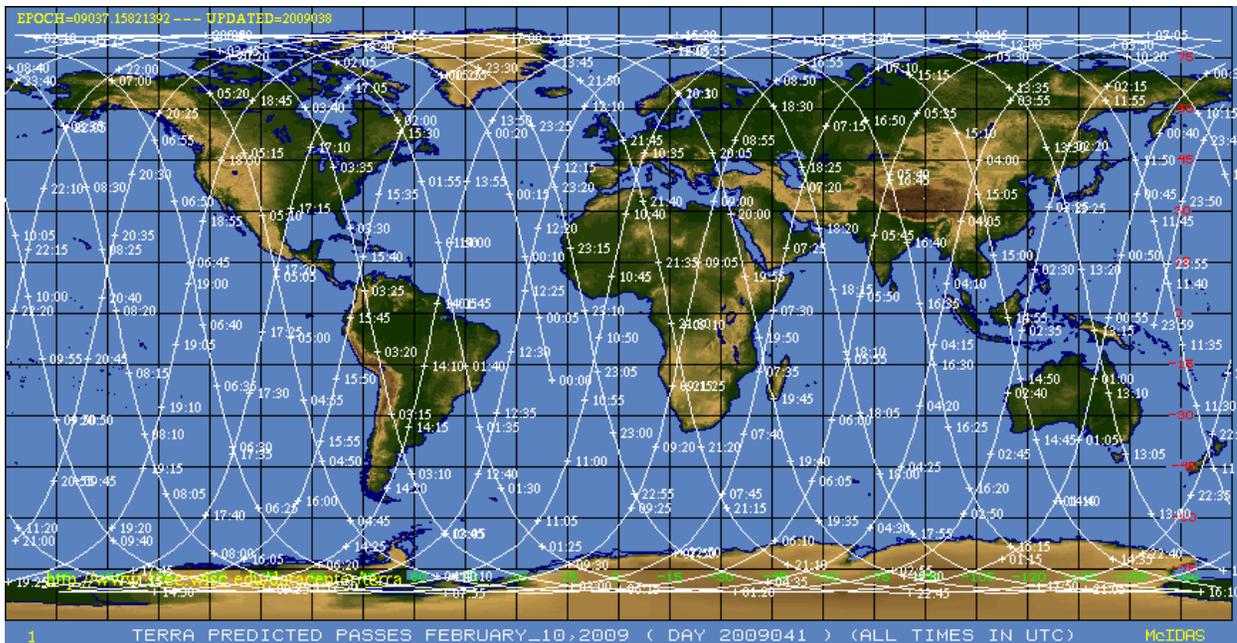


Figura 2.6 Trayectoria aproximada de los satélites Terra y Aqua. NASA.

MODIS son instrumentos a bordo de los satélites EOS de la NASA: Terra y Aqua, los cuales recopilan información en 36 bandas espectrales, desde el espectro visible hasta el infrarrojo lejano (información técnica en la Tabla 2.2). Estos datos son una importante herramienta para el entendimiento tanto de la dinámica global como de los procesos ocurridos en la tierra, océanos o baja atmósfera.

Tabla 2. 2 Características técnicas de imágenes satelitales MODIS. NASA³

Principal Aplicación	Banda	Ancho de Banda [nm]	Radianza Espectral [W/m ²]	Relación de señal de ruido requerida
Tierra/Nubes/ Límites de Aerosoles	1	620-670	21.8	128
	2	841-876	24.7	201
Tierra/Nubes/Propiedades de Aerosoles	3	459-479	35.3	243
	4	545-565	29.0	228
	5	1230-1250	5.4	74
	6	1628-1652	7.3	275
	7	2105-2155	1.0	110

³ <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php#3>

Color del Océano/ Fitoplancton/ Bioquímica	8	405-420	44.9	880
	9	438-448	41.9	838
	10	483-493	32.1	802
	11	526-536	27.9	754
	12	546-556	21.0	750
	13	662-672	9.5	910
	14	673-683	8.7	1087
	15	743-753	10.2	586
	16	862-877	6.2	516
Vapor de Agua Atmosférico	17	890-920	10.0	167
	18	931-941	3.6	57
	19	915-965	15.0	250
Principal Aplicación	Banda	Ancho de Banda [μm]	Radianza Espectral [W/m ²]	Diferencia de temperatura de ruido requerida[δ]T(K)
Temperatura Nubes/Superficie	20	3.660-3.840	0.45 (300K)	0.05
	21	3.929-3.989	2.38 (335K)	2.0
	22	3.929-3.989	0.67 (300K)	0.07
	23	4.020-4.090	0.79 (300K)	0.07
Temperatura Atmosférica	24	4.433-4.498	0.17 (300K)	0.25
	25	4.482-4.598	0.59 (300K)	0.25
Nubes Cirros / Vapor de agua	26	1.360-1.390	6.00	150*
	27	6.535-6.895	1.16 (240K)	0.25
	28	7.175-7.475	2.18 (250K)	0.25
Propiedades de Nubes	29	8.400-8.700	9.58 (300K)	0.05
Ozono	30	9.580-9.880	3.69 (300K)	0.25
Temperatura Nubes/Superficie	31	10.780-11.280	9.55 (300K)	0.05
	32	11.770-12.270	8.94 (300K)	0.05
Altura de Nubes	33	13.185-13.485	4.52 (300K)	0.25
	34	13.485-13.785	3.76 (300K)	0.25
	35	13.785-14.085	3.11 (300K)	0.25
	36	14.085-14.385	2.09 (220K)	0.35

*Señal de ruido requerido.

Estas imágenes satelitales son de acceso libre a través de la página de la NASA⁴, donde se puede obtener desde que fue puesto en funcionamiento cada satélite hasta imágenes recientes, con algunas horas de desfase.

⁴ <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>

Para este trabajo fueron considerados los productos de nivel 1B, es decir radianza calibrada de 1 km de resolución, correspondientes a MOD021KM y MYD021KM, en el satélite Terra y Aqua, respectivamente.

Para la zona de estudio, se poseen aproximadamente cuatro imágenes satelitales diarias, dos de ellas de madrugada, alrededor de las 3:00 y 5:00 UTC (Terra y Aqua respectivamente) y en la tarde, 14:00 y 18:00 UTC. Cabe destacar que en las imágenes captadas de madrugada no es posible visualizar en espectro visible, sin embargo se puede obtener información desde las bandas infrarrojas.

2.2.2. Cámaras Web (OVDAS)

El OVDAS (Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur), del SERNAGEOMIN (Servicio Nacional de Geología y Minería) cuenta con una serie de cámaras estacionarias, de las cuales tres están destinadas al monitoreo constante del Volcán Puyehue-Cordón Caulle. En este estudio se utilizarán únicamente las imágenes obtenidas por la estación Futangue, ubicada en los 40.37° S / 72.30°W. Esta cámara fue escogida por la nitidez de la columna captada por esta estación.

En la Figura 2.7 se observa el penacho de la erupción durante el día 13 de Junio, a las 15:05 UTC, correspondiente a las 11:05 am, hora local. Estas cámaras capturan una fotografía cada un minuto, y están disponibles en tiempo real en la página web de la Red de vigilancia Volcánica⁵.

⁵ <http://www.sernageomin.cl/volcanes.php>



Figura 2.7 Imagen captada por la cámara de Futangue, el 13 de Junio del 2011, a las 15:05 UTC.

La estación de Futangue cuenta con una cámara modelo AXIS P1343, la cual posee un enfoque a distancia y una resolución máxima de 800x600 píxeles (SVGA).

2.3. Flujo de masa

Con el fin de dimensionar las emisiones de ceniza a la atmósfera, se calcula el flujo de masa de la erupción. Para estimar este valor, existen modelos analíticos. Estos están basados en la convección gravitacional turbulenta, bajo los supuestos:

- Para una misma altura, existen perfiles de velocidad vertical y flotabilidad similares.
- La tasa de arrastre es proporcional a la velocidad de la pluma para cada altura.
- La variación de la densidad de la columna es despreciable en comparación a la diferencia de densidad entre el penacho y la atmosfera alrededor.

2.4. Atmósfera

La Atmósfera está constituida por la mezcla de gases y partículas que envuelven la Tierra y permanece atrapada a la misma por la fuerza gravitacional, correspondiendo a la capa gaseosa que rodea a esta. Comparando la Tierra sólida con la atmósfera, esta última es delgada y tenue, en donde el 90% se distribuye en una franja de 16 km a partir de la superficie terrestre, cuyo radio es de 6.400 km aproximadamente. Los principales componentes de la atmósfera son Nitrógeno molecular (78% del volumen) y Oxígeno molecular (21%). El 1% restante se divide en vapor de agua, dióxido de carbono (CO_2), y otros elementos gaseosos de menor concentración.

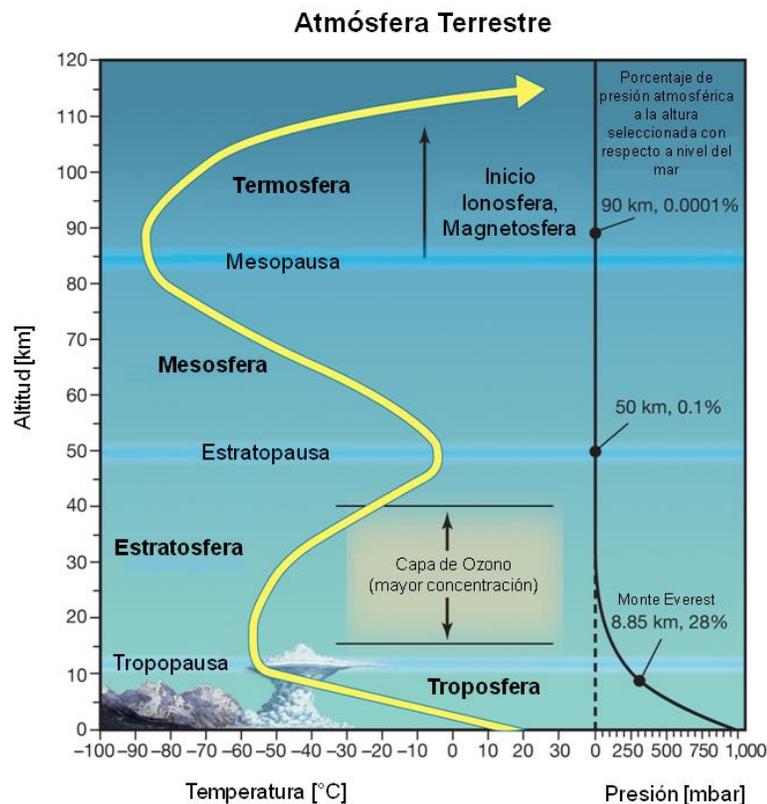


Figura 2.8 Esquema de la Atmósfera Terrestre. Adaptado de Enciclopedia Británica.

La Atmósfera se divide en diferentes capas por sus propiedades físicas y composición (Figura 2.8). Sin embargo, en el contexto de erupciones volcánicas nos centraremos únicamente en las dos primeras capas de la atmósfera (tropósfera y estratósfera) que son las involucradas directamente en el caso de una erupción.

2.4.1. Tropósfera

Corresponde a la capa más cercana a la superficie terrestre, es el lugar en donde se desarrolla la vida y ocurren la mayor parte de los fenómenos meteorológicos, de allí el nombre ("esfera cambiante"). Es de espesor variable según la latitud, siendo más delgada en los polos (8 km aproximadamente). Su espesor aumenta hasta los 16 km en el Ecuador. En esta capa el gradiente de temperatura es de aproximadamente -6.5°C por kilómetro. Es aquí donde se concentra el 75 % de la masa gaseosa de la atmósfera, así como también casi todo el vapor de agua. Esta capa limita superiormente con Estratósfera, este límite es conocido como la Tropopausa.

La Tropopausa marca el límite sobre la cual la temperatura se mantiene constante, antes de comenzar a aumentar nuevamente sobre los 20 km sobre el nivel del mar. Es esta característica térmica la que evita la convección del aire y mantiene los fenómenos climáticos en la Tropósfera.

2.4.2. Estratósfera

Es la capa que limita superiormente con la Tropósfera, y se encuentra aproximadamente entre los 10 y 50 km sobre el nivel del mar. En esta zona, los gases se encuentran separados de acuerdo a su peso, formado estratos o capas. Dentro de estas, se encuentra la capa de ozono, que es la encargada de proteger a la Tierra de los rayos ultravioletas provenientes del sol. En esta capa el gradiente de temperatura es positivo a medida que aumenta la altura, siendo cercana a los -60°C en la parte inferior y $10-17^{\circ}\text{C}$ en la parte superior. Este fenómeno de inversión térmica se explica por la absorción de radiación electromagnética por parte del ozono.

La parte superior de la Estratósfera, se conoce como Estratopausa, que es la zona que limita con la Mesósfera.

En esta capa los aerosoles permanecen más tiempo en suspensión debido a la estabilidad de ella, a diferencia de la Tropósfera. Es por eso que cuando la ceniza volcánica y los gases generados durante una erupción alcanzan esta capa, pueden permanecer en suspensión un mayor tiempo, a diferencia de lo que ocurre en la Tropósfera, en donde los fenómenos climáticos, como la lluvia, generan que la ceniza decante con mayor velocidad. La suspensión de aerosoles en la atmósfera genera un cambio en el albedo, provocando una reflexión de los rayos del sol. En casos de erupciones de gran emisión de ceniza y columnas de gran altura, Tambora (1815), Krakatoa (1883) y Pinatubo (1991), se han registrado una disminución de la temperatura global producto de la suspensión de ceniza.

2.5. Sismología en Volcanes

El estudio de la sismología volcánica es fundamental para conocer los patrones de actividad sísmica, con el fin de prever oportunamente una erupción. Esta actividad puede presentarse con meses e incluso años de anticipación a cualquier manifestación externa. Por esta razón, la sismología es una importante herramienta de conocimiento volcánico y determinante para la protección de la ciudadanía.

2.5.1. Característica de los diferentes tipos de sismos

Los sismos pueden agruparse según origen en: tectónicos, volcánicos y de colapso. Los sismos de colapso son producidos por derrumbes de techos de cavernas o minas, y solo son percibidos en áreas reducidas. Los sismos tectónicos corresponden a aquellos generados por ruptura de grandes de dimensiones, en la zona de contacto entre placas tectónicas o zonas internas de éstas. Los sismos volcánicos se generan tanto por el movimiento de fluidos (magma y gases) como por la generación de fracturas causadas por este movimiento.

En los días previos a una erupción, los sismos volcánicos se presentan con una frecuencia baja (algunos eventos por día o mes). Y, poco antes y durante la erupción, la actividad sísmica aumenta, presentando decenas hasta cientos de sismos en horas.

2.5.2. Significado de las señales sísmicas de un volcán.

Existen cuatro categorías de sismos volcánicos usados a escala mundial.

- Tipo A: poseen una apariencia similar a los tectónicos. Usualmente se generan a profundidades de hasta 20 km. Se considera que se deben a fracturas de los materiales corticales.
- Tipo B: son sismos de baja profundidad y muestran un aumento gradual en su amplitud con el paso del tiempo. Generalmente están constituidos por ondas superficiales. Se estima que se generan por presiones transitorias en un conducto o una fractura saturada con fluidos.
- Tremor Armónico: corresponden a una vibración de carácter continuo que puede prolongarse por horas. Posee amplitudes regulares y frecuencias estables. Se atribuye este tipo de movimiento al desplazamiento del magma.
- Sismos volcánicos explosivos: corresponden a los eventos sísmicos que se presentan durante las erupciones explosivas. Poseen magnitudes generalmente pequeñas y pueden percibirse a corta distancia del volcán.

3. MARCO GEOLÓGICO Y TECTÓNICO DEL COMPLEJO VOLCÁNICO PUYEHUE-CORDÓN CAULLE

En este capítulo se busca recopilar la información de la geología de la zona de estudio, en donde se expondrán tanto las unidades del basamento, como unidades volcánicas generadas por el mismo Complejo Volcánico, además de la tectónica que domina en el área. En la Figura 3.1 se observan las zonas aledañas al volcán, incluyendo los lagos que se mencionan más adelante.

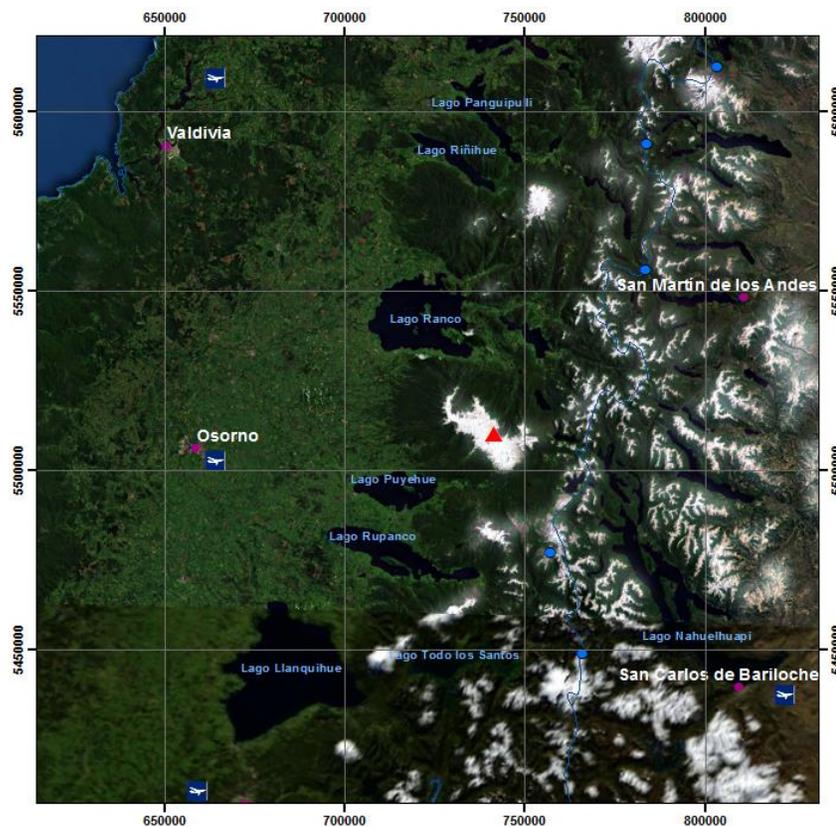


Figura 3.1 Mapa de las zonas próximas al volcán (triángulo rojo).

3.1 Marco Geológico.

3.1.1. Basamento

3.1.1.1. Paleozoico

El Paleozoico está representado en el Batolito Futrono-Riñihue (CPg).

El Batolito Futrono-Riñihue (Carbonífero-Pérmico, ca. 300Ma) corresponde a un conjunto de granitos, granodioritas y tonalitas de biotita y hornblenda junto con escasos pórfidos riódácíticos (Lara y Moreno, 2006). Estos se distribuyen de forma casi continua desde el lago Calafquén, en el norte, hasta el lago Ranco, por el sur (Rodríguez, 1999). Posee composición calcoalcalina, metaliminosa y alto potasio (Campos et al., 1998).

3.1.1.2. Mesozoico

En la zona cercana al volcán Cordon Caulle no se observan unidades Mesozoicas.

3.1.1.3. Cenozoico

3.1.1.3.1. Oligoceno

Representado por los Estratos de Lago Ranco (OMlr) (Oligoceno-Mioceno). Corresponde a una secuencia de rocas volcánicas intermedias y sedimentarias continentales, con intercalaciones marinas. Provenientes de un ambiente subáereo a subacuático continental a marino, alcanzando una potencia máxima de 1000 m (Campos et al., 1998).

3.1.1.3.2. Mioceno

El basamento Mioceno se ve representado por Granitoides (Mga y Mgb) y Estratos de Pitreño (MPpa y MPpb).

Los Granitoides Miocenos (ca. 15-5 Ma) corresponden a la unidad con mayor distribución en la zona. De orientación NS en torno a ZFLO. Está conformado por granitos, granodioritas, monzonitas, dioritas, tonalitas y gabros, además de pequeños cuerpos hipabisales de composición andesítica a dacíticas (Campos et al., 1998).

Los Estratos de Pitreño (Mioceno-Plioceno) corresponde a una secuencia sedimentaria y volcánica subhorizontal, formada por areniscas, conglomerados y lutitas fosilíferas. Cubiertas superiormente por lavas basálticas y andesíticas intercaladas en bancos diamícticos de bolones y bloques (Lara y Moreno, 2006). Se expone principalmente en farellones a lo largo de la ribera sur del lago Ranco.

3.1.2. Geología Complejo Volcánico Puyehue Cordón Caulle

La geología del Complejo Volcánico está compuesta por las rocas asociadas a la caldera de la Cordillera Nevada, la fisura Cordón Caulle y el volcán Puyehue.

3.1.2.1. Caldera de la Cordillera Nevada

La Cordillera Nevada es un estrato volcán colapsado cuyos productos (andesitas-basálticas a dacitas) cubren un área de 700 km² en el borde NW del complejo. La caldera es una estructura semicircular de 8.5 km de diámetro (Lara et al, 2006).

3.1.2.1.1. Volcanismo escudo y secuencia pre-caldera.

Cordillera Nevada 1 (Plcn1): Escudo basal (>ca. 377 ka), es una sucesión volcánica radial formada por flujos de lavas andesita-basálticas, gravas y escasas ignimbritas máficas cristalinas (Lara et al, 2006).

Cordillera Nevada 2 (Plcn2): Escudo superior (ca. 377-117 ka), corresponde a la sección más joven de la secuencia pre-caldera. Las lavas de esta unidad son principalmente andesita (Lara et al, 2006).

Ignimbritas San Pablo (Plcnsp): Asociada al colapso de la caldera. Esta ignimbrita cubre un área de aproximadamente 1500 km², con un espesor de un 1 m en las cercanías de la ciudad de Osorno (80 km al Oeste) y 70 m en los valles de los ríos Pilmaiquén y Bueno. Se estima un volumen total de 15 km³ para esta ignimbrita (Lara et al, 2006).

3.1.2.1.2. Fallas anulares y Volcanismo post-escudo.

Cordillera Nevada 3 (Plcn3): Relleno parcial de la caldera (< ca. 117 ka.) corresponde a lavas andesíticas probablemente extruidas desde fallas anulares. Adicionalmente se observa un afloramiento cónico de dacitas en el centro de la caldera (Lara et al, 2006).

Cordillera Nevada 4 (Plcn4): Actividad tardía de las fallas anulares (< ca. 40 ka.?) Lavas andesíticas a dacíticas son extruidas desde las fallas anulares. Esta unidad es morfológicamente equivalente a la unidad Plcc3 del Cordón Caulle (Lara et al, 2006).

3.1.2.2. Cordón Caulle

El Cordón Caulle corresponde a un sistema fisural de 9 km de largo y 5 km de ancho, contenido en un graben asimétrico de dirección NW.

3.1.2.2.1. Secuencia pre-graben: Volcanismo de escudo

Cordón Caulle 1 (Plcc1): Complejo escudo oriental (> ca. 430 ka.), esta unidad está compuesta por lavas silíceas, ignimbritas, sills y lacolitos, yuxtapuestos con las lavas pre-caldera de la Cordillera Nevada y el Volcán Mencheca (Lara et al, 2006).

Cordón Caulle 2 (Plcc2): Transición de volcanismo de escudo a fisural (ca. 300-70 ka.). Este volcanismo es previo a los grabens presentes y se reconocen dos secuencias distintas. La secuencia Occidental (Plcc2w) está dividida en dos secciones, la norte corresponde a una sucesión de 60 m de espesor de brechas piroclásticas, flujo de detritos y lavas andesíticas de matriz oxidada. La sección sur está compuesta por lavas y rocas piroclásticas de 150 m de espesor. La secuencia Oriental (Plcc2e) corresponde a una sucesión de lavas dacíticas, sill y domos dacíticos de 120 m de espesor (Lara et al, 2006).

3.1.2.2.2. Volcanismo intra-graben

Cordón Caulle 3 (Plcc3): corresponde a lavas e ignimbritas (<70 ka.) Corresponde a una sucesión subhorizontal de lavas dacíticas y riolíticas de 250 m de espesor (Lara et al, 2006).

Cordón Caulle 4 (PIHcc4): Domos y coladas intra-post glacial (<32 ka.). Los primeros domos son principalmente dacíticas de relación de aspecto cercanos a 2.5.

Cordón Caulle 5 (Hcc5): Domos y coladas post glacial (Holocenas). Domos y lavas-domo de composición dacítica y riolítica. La edad de estos domos postglaciales es desconocida (Lara et al, 2006).

Lavas fisurales históricas (1921): La erupción comenzó el día 13 de Diciembre de 1921 y continuó hasta el día 21 de Febrero de 1922. Inicialmente se formó una columna eruptiva de 6.2 km durante los primeros 7 días, acompañada de explosiones cíclicas y actividad sísmica sensible. Se emitió lavas dacíticas y tefra de un volumen estimado de 0.4 km³ durante la erupción (Lara et al, 2006).

Lavas fisurales históricas (1960): Luego del terremoto de 1960, comenzó la actividad volcánica, emitiendo lava de composición riolítica (0.25 km³ de volumen DRE) (Lara et al, 2006).

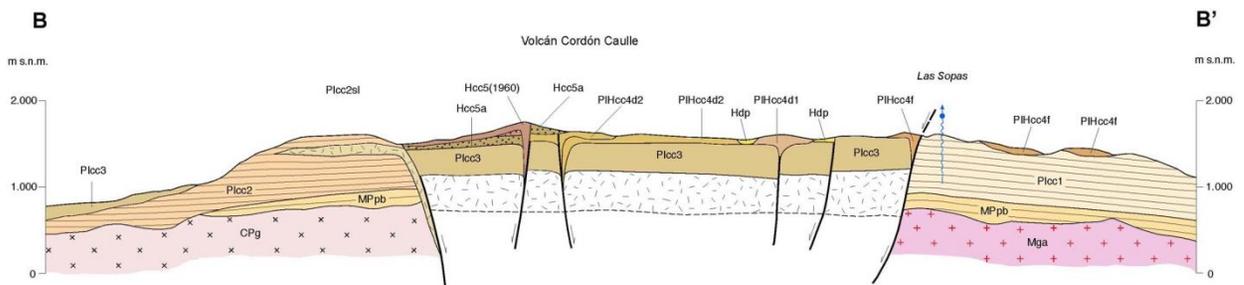


Figura 3.2 Perfil Volcán Cordón Caulle previo a la erupción 2011-2012. Lara & Moreno 2006.

En la Figura 3.2 se observa un perfil transversal del cordón publicado en la carta geológica previa a la erupción estudiada. Allí se pueden ver las unidades detalladas anteriormente (Lara et al, 2006).

3.1.2.3. Volcán Puyehue

Es un estratovolcán ubicado en el extremo sur del Complejo Volcánico, de 2236 m.s.n.m., y cubre un área de 160 km², con un cráter de 2.4 km de diámetro cubierto de hielo (Lara et al, 2006).

3.1.2.3.1. Secuencia Pre-caldera

Puyehue 1 (Plp1) Volcanismo escudo (245-96 ka.). La parte Occidental corresponde a secuencias de lavas andesíticas y brechas de 150 m de espesor. La zona Oriental corresponden a lavas de composición basálticas y andesitas máficas, cortadas por numerosas diques (Lara et al, 2006).

3.1.2.3.2. Estrato volcán Post-caldera

Puyehue 2 (Plp2): volcanismo intraglacial (69-34 ka). Corresponde a Secuencias lávicas de andesitas a dacitas intruidas por diques y filones (Lara et al ,2006).

Puyehue 3 (PIHp3): Lavas glaciales tardías (19-11 ka.). Múltiples flujos de lavas de composición basáltica a riodacitas, aflora en el flanco oeste del volcán (Lara et al 2006).

Puyehue 4(Hp4): Lavas postglaciales (ca. 7-2.5 ka.). Principalmente lavas y domos de composición riolítica, afloran en flanco este del volcán (Lara et al, 2006).

3.2. Marco Tectónico

El Complejo Volcánico Puyehue Cordón Caulle está ubicado dentro de la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui (ZFLO). Ver Figura 3.3.

La Zona de Falla Liquiñe-Ofqui (ZFLO) es una estructura de gran importancia en los Andes del Sur. Corresponde a un sistema de fallas transcurrentes de intra-arco de escala cortical, que se extiende por más de 1000 km, entre los 40°s y los 47°S. Ubicado en el centro del Batolito Norpatagónico (NPB), paralelo al arco volcánico actual (Hervé 1994). La orientación de la Falla es generalmente NNE-SSW, sin embargo, en el extremo sur su orientación cambia al SW (Charrier et al., 2007).

Estudios demuestran que ZFLO ha estado activa como una estructura transpresiva de rumbo dextral durante los últimos 6 Ma. Otros autores en cambio sostienen que su actividad remonta hace 25 Ma (Hervé et al., 2004).

La traza de la falla pasa por el lado Este del Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle.

Adicionalmente en la zona se observan lineamientos NW correspondientes a fallas de rumbo generados como consecuencia de la evolución geológica de los Andes del Sur. Son de eventos principalmente Paleozoico Superior y Triásico. Algunos autores sugieren una reactivación como fallas de rumbo sinestrales (López-Escobar et al, 1995; Lara et al, 2006; Melnick et al, 2006).



Figura 3.3 Esquema morfoestructural de la zona de estudio. Lara & Moreno 2006.

4. ERUPCIÓN CORDÓN CAULLE JUNIO 2011-MARZO 2012

En esta sección se detallará la serie de eventos en orden cronológico de los reportes del *Global Volcanism Program, Smithsonian Institution*⁶, y prensa nacional entre los días 28 de Abril 2011 a 3 de Junio 2012. Este capítulo tiene como objetivo ordenar la información disponible antes del este trabajo.

4.1. Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle (40.5°S 72.2°W)

Se ubica en la alta cordillera, entre los lagos Ranco (al norte) y Puyehue (al sur). Es un complejo de edad Pleistocena medio-Holocena. Comprende la Caldera de la Cordillera Nevada, Sistema de fisura Cordón Caulle y el Volcán Puyehue (2240 m).

El Cordón Caulle corresponde a una cadena fisural de 15 km de largo con 4 km de ancho, conformado por domos, conos de piroclastos, flujos lávicos (desde basaltos hasta riolitas) y cuellos volcánicos (Petit-Breuilh, 2004).

4.2. Erupciones previas

En la Tabla 4.1 se detalla las erupciones documentadas del Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle.

⁶ <http://www.volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=357150>

Tabla 4.1 Erupciones Históricas del complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle. Global Volcanism Program. Smithsonian Institute,

Fecha de inicio	Fecha de término	VEI	Evidencia	Área de actividad o
4 Junio 2011	21 Abril 2012?	3	Observación	Cordón Caulle
1990	Desconocida	1	Observación	Cordón Caulle
24 Mayo 1960	30 Julio 1960	3	Observación	Cordón Caulle
6 Marzo 1934	Desconocida	2	Observación	Cordón Caulle
7 Enero 1929	Desconocida	2	Observación	Cordón Caulle
13 Dic. 1921	12 Feb. 1922	3	Observación	Cordón Caulle-
1919	1920	2	Observación	Cordón Caulle
8 Feb. 1914	Desconocida	2	Observación	Cordón Caulle
1905 (?)	Desconocida	2	Observación	Cordón Caulle
1893 (?)	Desconocida	2	Observación	Cordón Caulle
1759 (?)	Desconocida	2	Observación	Cordón Caulle
1220 ± 150 años	Desconocida		Radiocarbono	
1140 ± 100 años	Desconocida		Radiocarbono	
860 ± 75 años	Desconocida	5	Radiocarbono	Puyehue
500 ± 100 años	Desconocida		Radiocarbono	
140 ± 300 años	Desconocida		Tefrocronología	Puyehue?
110 ± 200 años	Desconocida		Radiocarbono	
490 ac ± 300 años	Desconocida		Radiocarbono	
990 ac ± 500 años	Desconocida		Tefrocronología	
1490 ac ± 150 años	Desconocida		Radiocarbono	
3250 ac ± 1000 años	Desconocida		Ar/Ar	Puyehue
4230 ac ± 200 años	Desconocida		Radiocarbono	
4450 ac ± 1000 años	Desconocida		Ar/Ar	Puyehue
4460 ac (?)	Desconocida		Tefrocronología	
4690 ac ± 200 años	Desconocida		Radiocarbono	
5080 ac ± 150 años	Desconocida	5	Radiocarbono	Puyehue

Dentro de las últimas erupciones se destacan la de 1921 y la de 1960.

La erupción del año 1921 comenzó el día 13 de Diciembre con una serie de violentas explosiones. Grandes cantidades de ceniza y pómez fueron expulsadas por el volcán, las cuales llegaron hasta la ciudad de La Plata, a 3.000 km de distancia, en el territorio Argentino. Durante el mes de Enero (1922) se observaron diversas corrientes

de lava avanzando principalmente hacia el norte, por el río Riñinahue (González Ferrán, 1995).

La erupción de 1960 ocurrió 47 horas después del gran terremoto del sur de Chile (el sismo de mayor intensidad registrado a nivel mundial), el día 24 de Mayo. Comenzó con una violenta explosión acompañada de una columna eruptiva de 8 km de alto. El centro de emisión estaba ubicado a 5.5 km al noroeste del borde de la caldera del volcán Puyehue. Los vientos, principalmente de Oeste y Noroeste, dispersaron el material hacia territorio argentino, siendo la zona de Nahuelhuapi (Bariloche y alrededores) la zona más afectada. Junto con el aumento de intensidad de la erupción comenzaron a aparecer nuevos centros eruptivos alineados en una fisura de 5.3 km de largo, donde la mayoría de estos solo emitían vapor de agua.

Durante esta erupción se emitió una lava viscosa dacíticas (68.3% SiO₂) desde 8 cráteres distintos, principalmente en dirección suroeste. Luego de esta fase efusiva, se reactivó la emisión de ceniza y pómez, hasta el final de la erupción (González Ferrán, 1995).

4.3. Erupción Junio 2011-Marzo 2012.

Producto del aumento de la sismicidad del Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle, el día 27 de Abril de 2011, se declaró alerta amarilla para el volcán. Al día siguiente, la ONEMI (Oficina Nacional de Emergencias del Ministerio del Interior) decretó alerta amarilla para las comunas de Futrono, Lago Ranco y Río Bueno, en la

región de Los Ríos, y alerta temprana y preventiva para Puyehue, región de Los Lagos (Noticia EMOL. 28 de Abril 2011).



Figura 4.1 Sobrevuelo realizado por el Ejército al inicio de la erupción. Fuente EFE.

El OVDAS-SERNAGEOMIN reportó que los equipos sismológicos instalados en el Cordón Caulle registraron en promedio 60 eventos sísmicos por hora durante los dos días previos al inicio de la erupción. Sin embargo, en un lapso de 6 horas, durante el día 4 de junio 2011, la sismicidad aumentó a un promedio de 230 eventos por hora, de profundidades de 1-4 km. La alerta amarilla nivel 4 fue cambiada a alerta roja nivel 5 y se comenzó a evacuar alrededor de 700 personas de los alrededores. Más tarde, una explosión proveniente del Cordón Caulle generó una columna eruptiva de 5 km de ancho y 12.2 km de alto (según estimaciones del OVDAS), con esto, el nivel de alerta fue aumentado a 6. La ONEMI continuó con las evacuaciones de 3000 habitantes de la zona. Residentes informaron un fuerte olor a azufre y una significativa caída de cenizas

y pómez. Durante los días 4-5 de Junio se registró en San Carlos de Bariloche una caída de ceniza que alcanzó varios centímetros de espesor (Global Volcanism Program, Smithsonian).

Durante los primeros días de la erupción, se cancelaron vuelos en diferentes aeropuertos, como en Argentina, Chile, Uruguay (el día 9 de Junio), zona sur de Brasil (64 vuelos cancelados el día 10 de Junio) e incluso zonas más alejadas como Sudáfrica Australia y Nueva Zelanda (EMOL).



Figura 4.2 Salmones afectados por la erupción del Cordón Caulle, Rio Nilahue. Fuente AP.

La erupción causó estragos en los ríos aledaños al volcán, en donde el río Nilahue presentó un aumento en el caudal producto de los sedimentos de ceniza y pómez, esto sumado al efecto de las lluvias, generaron desbordes durante el día 9 de Junio (EMOL 10 de Junio). Adicionalmente perjudicó a la industria salmonera, pues el

aumento de temperatura de los ríos a unos 45°C obligó el traslado de 5 millones de salmones, luego de la muerte de millones de estos peces. En la Figura 4.2 se observa un gran número de peces muertos producto del aumento de temperatura del río Nilahue (EMOL 11 de Junio 2011).

La intensa lluvia caída sobre la ceniza acumulada producto de la erupción, generó un alud cercano al paso fronterizo Cardenal Samoré, durante la noche del 10 de junio. Afortunadamente, gracias a que este lugar se encontraba cerrado, no se reportaron víctimas (Noticia EMOL, 10 de Junio).

A partir del día 13 de Junio, según prensa nacional (EMOL), la caída de ceniza empezó a afectar localidades dentro del territorio Chileno. La localidad de Riñinahue, ubicada al norte del volcán, junto al lago Ranco, comenzó a recibir productos volcánicos. Esto debido a un cambio en la dirección del viento en dirección norte.



Figura 4.3 Villa la Angostura luego de la erupción. Foto Reuters.

Dentro de las zonas más afectadas por la caída de ceniza se encuentra la localidad de Villa la Angostura, en Argentina, ubicada a 50 km al sureste del volcán. Fue declarada zona de desastre luego que la erupción dejara depósitos de material volcánico de hasta 30 cm de espesor (Figura 4.3), zonas sin abastecimiento eléctrico, agua potable y caminos parcialmente cortados. Además esto afectó directamente a la industria turística, siendo el principal sustento económico de la zona, la cual comenzaba la temporada invernal, potenciada por sus centros de esquí.

Debido a una disminución en la actividad eruptiva, el SERNAGEOMIN bajó el nivel de alerta de 6 a 5 el día 17 de Junio. Los registros sísmicos bajaron desde los 230 sismos por hora, al inicio de la erupción, a un promedio de 5 eventos de baja magnitud. Además la altura de la columna decreció hasta unos 3 km de altura y la concentración de material piroclástico alcanzó niveles similares a los del material particulado. El nivel de alerta 5 implica aun alerta roja, pero con menores medidas de prevención, por lo que solo los pobladores de las zonas más cercanas al volcán permanecían evacuados.

Dos días después las autoridades permitieron a las personas evacuadas regresar a sus hogares, debido al descenso de la actividad del volcán, la que ya no presentaba riesgo para la salud de las personas.

El día 20 de Junio se realizó un sobrevuelo en helicóptero por parte de algunas autoridades. Con ello se logró observar una columna de entre 3-4 km de altura con dispersión SE y material particulado fino. La base de la columna tenía un diámetro de unos 50 m aproximadamente, con escasos o nulos balísticos en su base. El color del penacho era blanco, sin embargo en la base presentaba colores grises en la zona E y blanco-amarillos en la zona W. Se observó una colada de lava de morfología irregular

en dirección SW, de consistencia viscosa, de dimensiones de 50 m de ancho con aproximadamente 100 m de longitud, limitada por la topografía local. Además se visualizó daño en la vegetación de las laderas del río Nilahue-Contrafuerte. Se vieron las fumarolas de Las Sopas, Los Venados y El Azufrales activas, con una pequeña fractura de 500 m de largo entre los centros de emisión y Las Sopas. En la Figura 4.4 se observa la columna eruptiva desde el helicóptero.



Figura 4.4 Imagen captada durante el sobrevuelo del volcán. Jorge Muñoz.

A partir del día 21 de Junio, producto de un cambio en la dirección de dispersión del viento, las ciudades de Temuco, Pucón y Villarrica comenzaron a ser afectadas por primera vez debido a la caída de ceniza. Posteriormente también afectaría la ciudad de Concepción, a unos 400 km al NW del volcán. Debido a ello, varios vuelos locales fueron cancelados con el fin de evitar accidentes. Adicionalmente durante los últimos

días de Junio y primeros días de Julio, fueron cancelados numerosos vuelos hacia Buenos Aires, vuelos locales de Argentina, además de zonas más alejadas como Nueva Zelandia y Australia (Noticias EMOL 21Junio- 7Julio).

Durante los primeros días de Julio, según lo informado por el SERNAGEOMIN, las señales de Tremor aumentaron, indicando que el flujo de lava aún se encontraba activo. Se mantuvo la alerta roja en nivel 6 (Global Volcanism Program, Smithsonian).

La actividad sísmica que había sufrido un aumento los primeros días de Julio, sufre un descenso en actividad importante para el 13 de Julio. Sin Embargo, el 15 de ese mes, la actividad sísmica indica que el flujo de lava comenzó a fluir nuevamente. Durante este mes la actividad sísmica sufre varios cambios de intensidad, para el día 22 de Julio la actividad sísmica indicaría una nula movilidad de lava, la cual se activaría 3 días después. Durante este mes se mantiene la alerta roja (Global Volcanism Program, Smithsonian).

Según noticias locales, el día 18 de Julio, luego de casi 45 días del inicio de la erupción, aterrizó por primera vez un vuelo en el aeropuerto de Bariloche (EMOL).

Durante los meses de Agosto se mantiene la alerta roja. Se observan columnas de entre 2 a 4 km de altura. El nivel de sismicidad se conserva baja. Se reporta caída de ceniza en Temuco (Global Volcanism Program, Smithsonian).

Durante Septiembre, la actividad volcánica se mantiene baja, con columnas de alturas inferiores a los 5 km, siendo usual que se alcance valores entre 1-3 km sobre el cráter. Se mantiene la alerta roja durante este mes (Global Volcanism Program, Smithsonian).

Durante mediados de Octubre se genera un fenómeno de resuspensión de ceniza, lo que ocasionó la cancelación de varios vuelos domésticos e internacionales en Argentina, Brasil, Chile y Uruguay. Este fenómeno se debió producto del aumento de la velocidad del viento y no de una reactivación del volcán, como se pensó en primera instancia. La sismicidad del volcán continua baja, con columnas bajas de entre 1-4 km. Se observó a finales de Octubre un aumento en la incandescencia del cráter. Los últimos días se observa una columna de unos 7.5 km de alto y caída sobre la localidad de Rio Bueno (80 km al NW del volcán). Se mantiene la alerta roja (Global Volcanism Program, Smithsonian).

Durante Noviembre se mantiene la alerta roja en la zona. Se observan alturas de columna de hasta 7 km durante este mes. La actividad sísmica se mantiene baja (Global Volcanism Program, Smithsonian). El día 22 de Noviembre, la ceniza volcánica proveniente del Cordón Caulle obligó nuevamente a cancelar vuelos comerciales dentro de Argentina y Uruguay. Según fuentes de la empresa Aerolíneas Argentinas, hasta la fecha había cancelado cerca de 3500 vuelos producto de la erupción volcánica (EMOL).

En el mes de Diciembre, la columna se caracterizó por disminuir su altura, de 7 km a un rango entre 1-3 km de alto. La actividad sísmica continua baja. Se mantiene aún alerta roja para las zonas cercanas al volcán (Global Volcanism Program, Smithsonian).

Continua la alerta roja durante el mes de Enero. La columna se alza en promedio entre 1-4 km sobre el cráter, con excepción de unos días a mediados de mes que alcanzó alturas sobre los 7 km. Continua la baja actividad según informes del OVDAS. El día 16 de Enero, nuevamente fue necesario cancelar vuelos comerciales en la ciudad

de Bariloche, incluso en zonas alejadas como Melbourne, Australia (Global Volcanism Program, Smithsonian).

Para el mes de Febrero las alturas estimadas no superan los 4 km sobre el cráter y el penacho alcanza solo hasta 100 km de extensión. La sismicidad medida se mantiene baja. Durante un sobrevuelo realizado el día 21 de Febrero se observan dos coladas de lava avanzado desde el cráter, una en dirección N y la otra en dirección W del cráter. Continúa la alerta roja durante este período (Global Volcanism Program, Smithsonian).

Durante el mes de Marzo, la actividad sísmica continua baja. La columna es notoriamente más baja, en torno a 1 km sobre el cráter, y solo alcanza extensiones de unas decenas de km sobre el volcán. El nivel de alerta descendió de Roja a Naranja a partir del 23 de Marzo (Global Volcanism Program, Smithsonian).

Durante el mes de Abril, la columna solo alcanza unos cientos de metros sobre el cráter. El día 23 de Abril se decreta alerta amarilla en la zona (Global Volcanism Program, Smithsonian).

En la Figura 4.5 es posible observa una fotografía aérea de la zona del volcán, luego de un año del inicio de la erupción. En ella se observa el paisaje cubierto de ceniza volcánica y una pequeña fumarola saliendo desde el volcán.



Figura 4.5 Imagen captada tras un año del inicio de la erupción. EMOL

5. METODOLOGÍA MODIS

En este capítulo se tratará específicamente la metodología implementada para la visualización de imágenes satelitales y su tratamiento para visualizar la ceniza volcánica. Además de los métodos implementados para estimar la altura de la columna.

5.1. Métodos de visualización de imágenes satelitales MODIS

Las imágenes satelitales MODIS son fotografías de la superficie terrestre, las cuales no son captadas siempre en el mismo sitio. Para trabajar los datos de forma uniforme fue necesario georeferenciar estas imágenes. Mediante el programa ENVI es posible realizar esta operación automáticamente a través de la herramienta *Georeference MODIS*. Esto permitió guardar las imágenes en formato GeoTIFF, las cuales pueden ser abiertas directamente en ArcGIS, sin necesidad de georeferenciar las imágenes manualmente. Además este proceso no solo permite ubicar las imágenes espacialmente, sino que también corrige la distorsión en los bordes, producto de la curvatura de la superficie terrestre.

5.1.1. Combinación de bandas espectrales

El programa ENVI también fue utilizado para visualizar diferentes productos, mediante la combinación RGB de las bandas 3-2-1, se logró obtener una imagen en

colores reales, tal como muestra la Figura 5.1A. Adicionalmente se utilizó la combinación de bandas 28-31-32 para obtener una visualización extra de la ceniza volcánica (ver Figura 5.1B). Esta combinación permite ver mejor la columna en puntos conflictivos (Watson et al, 2004) como un complemento al método BTD (*Brightness Temperature Difference*). La ceniza se observa en tonos rosados a negro, sin embargo, cabe destacar que solo corresponde a una aproximación y no una señal verdaderamente fiable.

Día 06 Junio 2011. 14:25 UTC

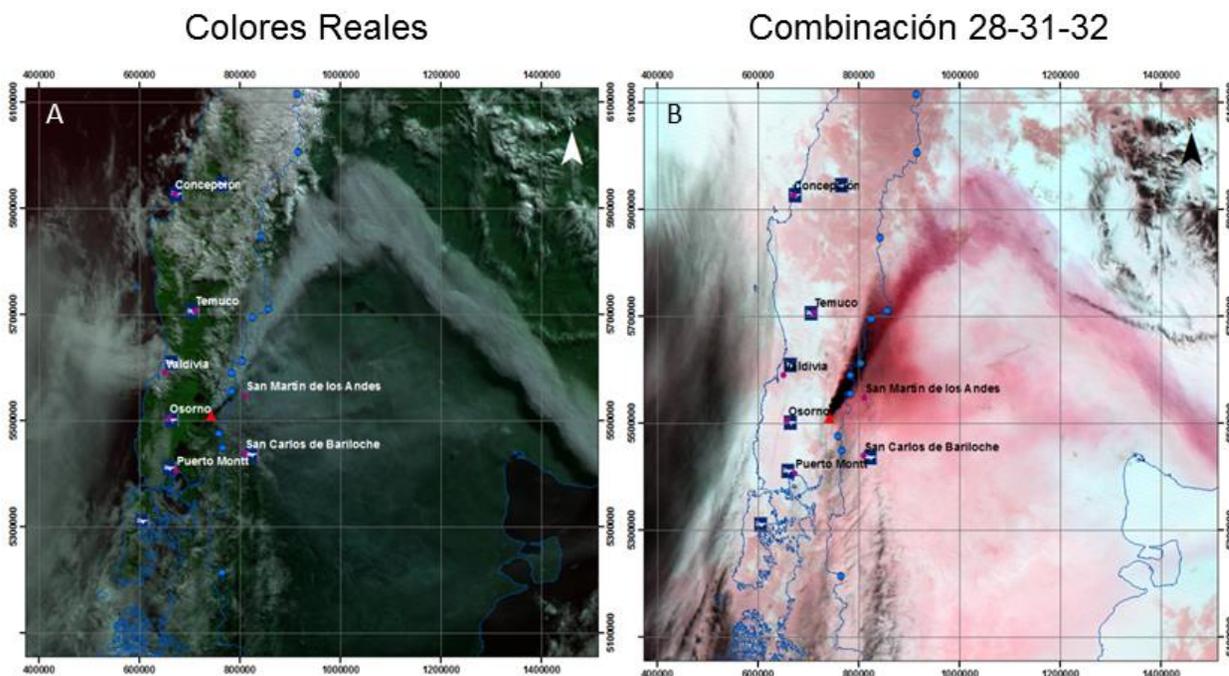


Figura 5.1 A) Visualización en colores reales, bandas 3-2-1. B) Combinación de bandas 28-31-32 (Watson et al, 2004). Día 6 de Junio 2011, 14:25 UTC.

5.1.2. BTD: Brightness Temperature Difference

El estudio de la actividad volcánica mediante imágenes satelitales en colores reales, presenta serias dificultades para distinguir entre nubes atmosféricas y ceniza volcánica debido a la similitud entre estas en el espectro visible.

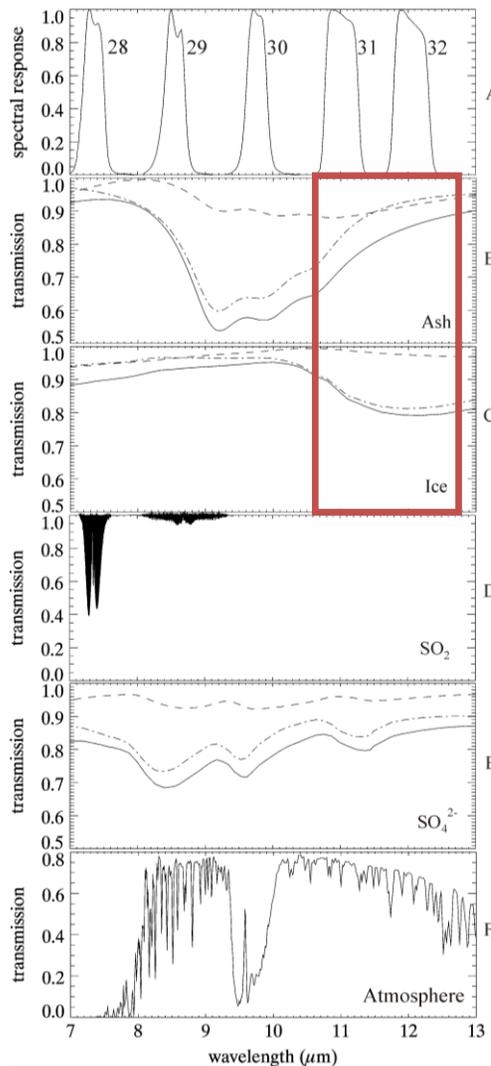


Figura 5.2 Adaptado de Watson et al., 2004. En el recuadro rojo se remarca la diferencia de pendiente que existe entre la ceniza volcánica y hielo entre las bandas 31 y 32 de imágenes MODIS.

En este trabajo, para solucionar este problema, se utilizará la metodología de BTM, *Brightness Temperature Difference* (Watson et al, 2004), para discriminar elementos no volcánicos de la imagen, como agua atmosférica y nieve. La ceniza volcánica posee una fuerte absorción y dispersión en los 11 μm , mientras que en las zonas de agua o hielo, es fuerte en los 12 μm (Figura 5.2). Esto se traduce como un cambio de pendiente de la transmisión entre estos canales, siendo positiva para la ceniza y negativa el hielo.

Esta propiedad es el fundamento de este método, el cual calcula la temperatura de brillo mediante la ecuación de Planck (5.1) en las bandas 31 y 32 (11 y 12 μm respectivamente). Las variables utilizadas para esta fórmula se explican en la Tabla 5.1.

$$I = \frac{2 h c^2 \times 1E^{-6} \exp\left(\left(\frac{hc}{\lambda_n k T_n}\right)-1\right)}{\lambda_n^5} \quad (5.1)$$

Despejando T, se obtiene:

$$T_n = \frac{hc}{\lambda_n k \ln\left(\left(\frac{2hc^2 \times 1E^{-6}}{I \lambda_n^5}\right)+1\right)} \quad (5.2)$$

Tabla 5. 1 Variables ecuación 5.1 y 5.2

Variable	Significado	Valor [unidades]
n	Número de Banda	1 a 36
h	Constante de Planck	-6.6*10 ⁻³⁴ [Js]
c	Velocidad de la luz en el vacío	3*10 ⁸ [m s ⁻¹]
k	Constante de Boltzmann	1.38*10 ⁻²³ [J K ⁻¹]
λ	Largo de onda	[m]
I	Radianza espectral	[W m ² μm^{-1} sr ⁻¹]
T	Temperatura de brillo	[K]

En donde "T" es el valor que se desea obtener; "h", "c" y "k" son constantes; λ corresponde al largo de onda según la banda espectral con la que se está trabajando, 11 y 12 μm , para λ_{31} y λ_{32} en este caso; I es la radianza espectral obtenida de la información de las imágenes MODIS para cada punto.

Una vez obtenido los valores de T_{31} y T_{32} , se restan entre sí, obteniendo como resultado un valor negativo para la señal de ceniza y positivo para el resto de fondo (nubes, hielo, superficie terrestre).

Utilizando la herramienta *Band Math* del software ENVI, se procesaron los valores crudos de la imagen MODIS para las bandas 31 y 32 según la ecuación 5.2:

$$T_{31} = h c / \lambda_{31} k \ln ((2hc^2 \times 1E^{-6}/I \lambda_{31}^5) + 1) \quad (5.3)$$

$$T_{32} = h c / \lambda_{32} k \ln ((2hc^2 \times 1E^{-6}/I \lambda_{32}^5) + 1) \quad (5.4)$$

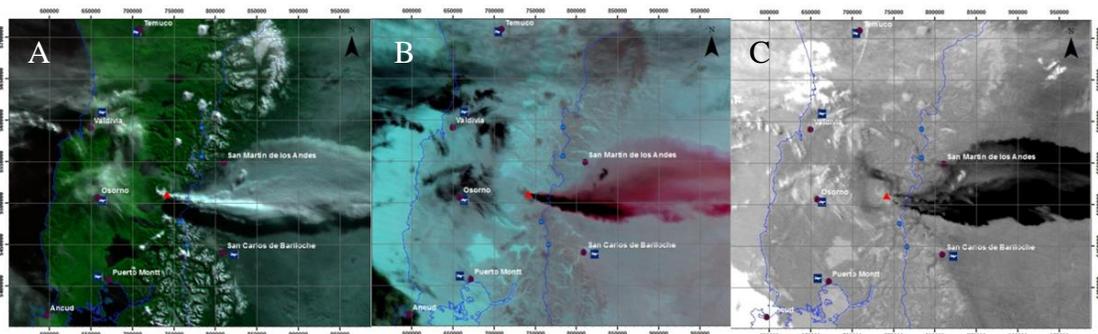


Figura 5.3 Imagen MODIS 13/06/2011 14:30 UTC. (a) Se observa una imagen sin tratar (bandas 3-2-1); (b) corresponde a la combinación de bandas 28-31-32 (Watson et al, 2004); en (c) se ve el resultado luego de aplicar el método BTDF, donde se aprecia en negro la ceniza

En la Figura 5.3, se observa imágenes del 13 de Junio 2011, a las 14:30 UTC, donde (a) corresponde a la imagen en colores reales, (b) a la combinación de bandas

propuestas por Watson et al, 2004, y (c) al resultado del método BTD. En esta última, la señal de ceniza volcánica se observa de color negro, resaltando notoriamente con respecto de las nubes meteorológicas (en blanco).

La mayor ventaja del método BTD es la fácil aplicación para la detección de ceniza volcánica, sin embargo, hay que tener en cuenta algunas desventajas: como presentar falsos positivos en superficies muy heladas y su valor varía dependiendo de la hora del día y el tipo de clima. Es por estas razones que no es completamente confiable, ni comparable numéricamente entre diferentes horas. De igual modo, permite una gran aproximación de las zonas afectadas por ceniza volcánica. Además, puede presentar falsos negativos producto de la interferencia de vapor de agua atmosférico. En el caso de columnas eruptivas con gran contenido de vapor de agua, puede interferir en la detección de ceniza (Piscini et al, 2011).

La combinación de bandas 28-31-32 permite observar en tonos rojizos la zona donde existe señal de ceniza con mayor concentración, de esta forma es posible limitar de modo más preciso el borde del penacho, corrigiendo un problema de detección mediante el método BTD.

5.2. Métodos para estimar altura de la columna eruptiva

5.2.1. CTOP: *Cloud Top Height*

El método de CTOP está diseñado para estimar la altura de nubes visibles. El algoritmo se basa en la medición de la temperatura de brillo (*brightness temperature*) desde el canal infrarrojo de 11 μm , correspondiente a la banda 31 en las imágenes

MODIS. Estas observaciones, combinadas con la temperatura de los perfiles meteorológicos obtenidos de los radiosondeos, permiten establecer un rango de altura en donde se encontraría el tope superior de la nube (Takacs et al, 2004). Todo esto es bajo la premisa de que la nube de ceniza deja de ascender cuando entra en equilibrio con la atmósfera, de esta forma, tanto la atmósfera como la nube, poseen igual temperatura.

Hay que tener en consideración que este método no discrimina origen de la nube, por lo que es posible visualizar la altura tanto de las nubes atmosféricas como las de ceniza. También es importante considerar que cuando la columna alcanza alturas superiores a la Tropopausa, los valores obtenidos mediante este método no son confiables debido a la estabilidad térmica de esta zona de la atmósfera, sin embargo es posible acotar inferiormente la altura.

Para poder visualizar este producto, es necesario realizar una operación similar a la empleada para el método BTM, el cual, mediante la ecuación de Planck, se calcula la temperatura de brillo en la banda 31 (Ecuación 5.3). Es posible además con el programa ENVI visualizar diferentes rangos de temperatura sobre la imagen en colores reales (Figura 5.4).

En la Figura 5.5 es posible distinguir valores de temperatura [K] para la columna el día 06 de Junio del 2011 a las 14:25 UTC. Es necesario tener la imagen BTM para corroborar si los datos de temperatura que se observan corresponden al penacho y no a una nube atmosférica, como se observa en la esquina superior izquierda de la imagen.

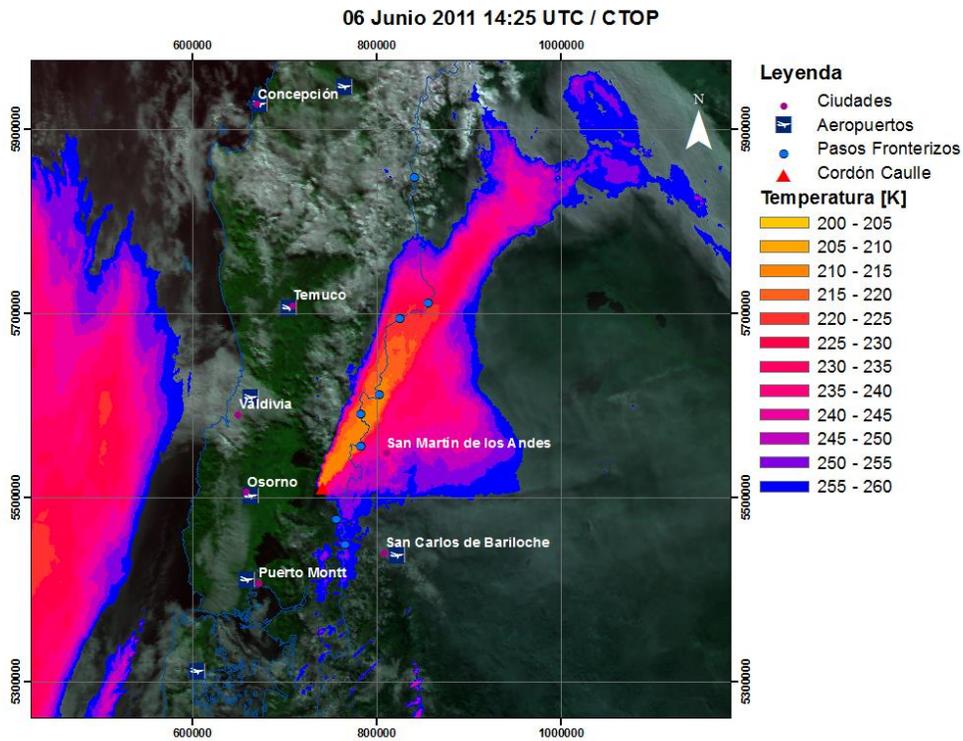


Figura 5.4 Visualización de la temperatura de brillo en la banda 31.

Una vez establecidos los rangos, se puede comparar con los resultados del radiosondeo, siendo el de Puerto Montt el punto más cercano al vent, para correlacionar los valores del día 6 de junio a las 12:00 UTC.

En la Figura 5.5, se puede visualizar según el mismo rango de color empleado en la Figura 5.4, para facilitar la comparación. Es importante destacar que los valores de temperatura no varían de forma lineal, ni disminuyen siempre a medida que se va alejando de la superficie. Adicionalmente, a medida que la altura alcanza un equilibrio térmico en la tropopausa, no es posible determinar la altura mediante este método.

Debido a esto no es posible obtener un valor exacto de altura mediante este método, pero si una aproximación bastante acertada.

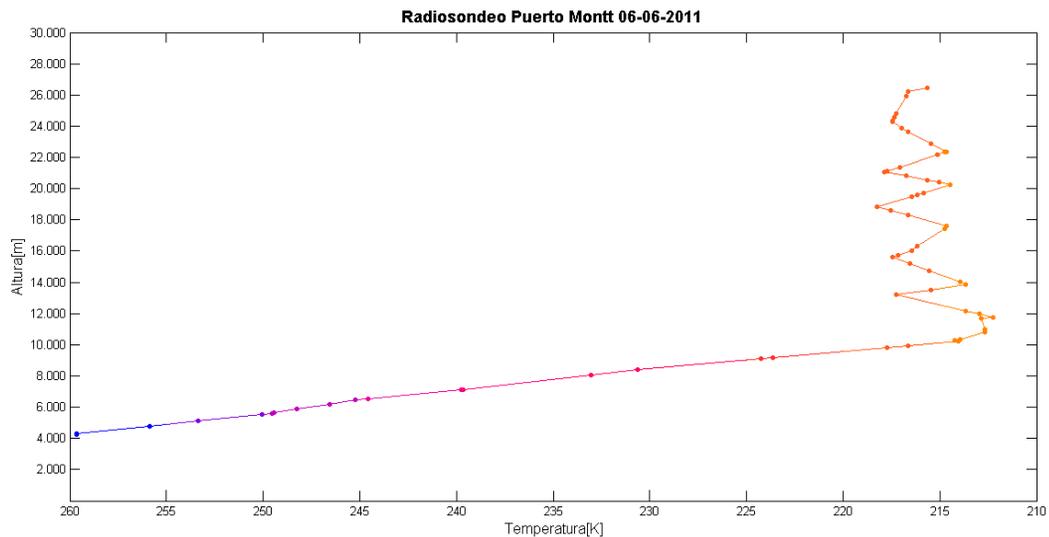


Figura 5.5 Radiosondeo de Puerto Montt para el día 06 de Junio 2011, 12:00 UTC

5.2.2. Método de la Sombra

Existe otro método empleado para determinar la altura de la columna a través de un método directo. Por medio de geometría, utilizando la sombra proyectada por el penacho en la superficie terrestre (Bertin et al, 2012) y mediciones simples es posible estimar la altura del penacho. En la Figura 5.6 se puede observar gráficamente el método.

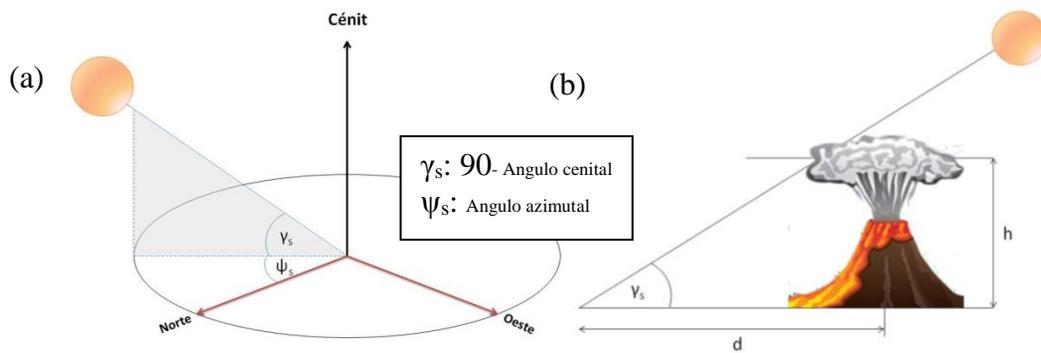


Figura 5.6 Esquemas para calcular la altura de la columna a través de la sombra proyectada. (a) indica los ángulos γ_s y ψ_s . (b) indica los valores d (distancia) y h (altura).

Mediante la ecuación

$$h = d \tan \gamma_s \quad (5.5)$$

Donde h corresponde a la altura que se quiere determinar, d la distancia entre la sombra proyectada y la columna, y el ángulo γ_s , el cual corresponde al complemento del ángulo cenital χ .

Para calcular (5.5) necesario conocer diferentes ángulos:

- Ángulo cenital χ : corresponde el lugar geográfico dado por su latitud ϕ para un día del año, con declinación solar δ (Ecuación 5.7) y a una hora del día expresada a través del ángulo horario h (Ecuación 5.8). Se calcula mediante la expresión

$$\cos \chi = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos h \quad (5.6)$$

- Declinación solar δ : Es el ángulo que existe entre la línea Sol-Tierra y el plano ecuatorial celeste (proyección del ecuador terrestre).

$$\delta = 23.45^\circ \cos\left(\frac{2\pi(d-d_{sv})}{365.25}\right) \quad (5.7)$$

En donde d corresponde al día Juliano para el cual se calcula la declinación solar (ej. el día 13 de junio, de un año no bisiesto, corresponde al día 164, 165 en caso de año bisiesto) y d_{sv} es el día juliano del solsticio de verano para el hemisferio norte ($d_{sv} \approx 173$).

- Ángulo horario h: es el arco contando desde el punto de intersección del ecuador con el meridiano del observador hasta el círculo horario del astro, en sentido horario. Ver Figura 5.7.

$$h = \left(\frac{2\pi}{24}\right) * (hora\ UTC - 12) - \lambda \frac{2\pi}{360} = \left(\frac{\pi}{12}\right) * (hora\ UTC - 12) - \frac{\lambda}{15} \quad (5.8)$$

En donde la hora UTC corresponde al tiempo universal coordinado, equivalente a la hora en el meridiano 0 (Greenwich) y λ es la longitud geográfica del meridiano local, positivo al W (ej.: Santiago $\lambda = +70.5$ (W)/180 [radianes]).

- Ángulo Azimutal ψ_s : Corresponde al ángulo que forma el punto cardinal Norte y la proyección vertical del astro sobre el horizonte.

$$\cos \psi_s = \frac{\sin(90-\chi) * \sin \varphi - \sin \delta}{\cos(90-\chi) * \cos \varphi} \quad (5.9)$$

Para este trabajo de utilizaron la imágenes previamente georeferenciadas para determinar los valores de la latitud ϕ , y luego en mediante el programa *Google Earth* es

posible determinar la distancia d , medida en dirección del azimut, de otro modo se sobrestimaría el valor de la altura de la columna (h).

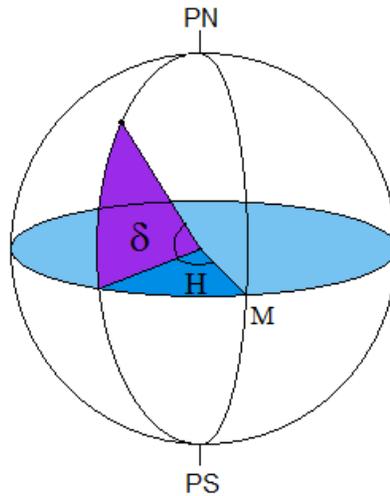


Figura 5.7 Esquema indicando el ángulo horario (h) y la declinación solar (δ). Donde M corresponde al meridiano de Greenwich.

5.2.3. Altura a través de las webcam

Las estaciones de vigilancia colocadas por el OVDAS cuentan webcam modelo AXIS P1343, para el caso de la estación Futangue. Desgraciadamente el zoom aplicado no es constante en todas las imágenes obtenidas, por lo que no son comparables entre diferentes días.

Para conocer las diferentes alturas de la columna mediante observaciones de la cámara web de la estación Futangue fue necesario escalarlas mediante datos medidos con otros métodos. De este modo, conociendo algunos valores de altura por el método de la sombra o CTOP desde las imágenes satelitales, es posible escalar la serie, obteniendo los valores aproximados de altura a lo largo del día.

6. FLUJO DE MASA

6.1. Flujo de masa

Con la finalidad de obtener el flujo de masa de la erupción, se utilizó el método empleado por Degruyter y Bonadonna (2012). En este artículo, se postulan dos ecuaciones de gran importancia para este estudio. En primer lugar la ecuación (6.1) de ese trabajo plantea una estimación analítica para determinar el flujo de masa \dot{M} durante la erupción, utilizando el valor de la altura del penacho (H) calculada previamente mediante los métodos de la altura de la sombra y estimaciones mediante CTOP.

$$\dot{M} = \pi \frac{\rho_{a0}}{g'} \left(\frac{2^{5/2} \alpha^2 \bar{N}^3}{z_1^4} H^4 + \frac{\beta^2 \bar{N}^2 \bar{v}}{6} H^3 \right) \quad (6.1)$$

Donde ρ_{a0} corresponde a la densidad atmosférica de referencia; g' es el valor de la gravedad reducida, según la capacidad calórica y temperatura de la atmósfera; α y β corresponden a constantes de arrastre (*Entrainment*); \bar{N} corresponde a la frecuencia media de flotabilidad (*average buoyancy frequency*) o frecuencia de Brunt–Väisälä, el cual hace referencia a la frecuencia que oscilan las partículas mientras se encuentran en suspensión dentro de la columna; \bar{v} corresponde a la velocidad promedio del viento que cruza la columna; H corresponde a la altura columna determinada por otros métodos (véase los puntos de CTOP : *Cloud Top Height* y Método de la Sombra); z_1 es una constante correspondiente a la altura máxima adimensional (Morton et al, 1956).

6.1.1. Constantes

Corresponde a los variables que no se modificarán para este análisis, los cuales se resumen en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1 Constantes

Constante	Significado	Valor
g	Gravedad	9.81 [m s ⁻²]
z_1	Altura max. adimensional (Morton et al, 1988)	2.8 [-]
R_d	Constante específica para gases en aire seco	287 [J kg ⁻¹ K ⁻¹]
C_d	Calor específico a presión constante en aire seco	998 [J kg ⁻¹ K ⁻¹]
C_s	Calor específico a presión constante para sólidos	1250 [J kg ⁻¹ K ⁻¹]
θ_0	Temperatura inicial	1200 [K]

6.1.2. Entrainment

Corresponden a las variables que caracterizan la entrada de aire a la columna (Tabla 6.2).

Tabla 6.2 Coeficiente de arrastre

Constante	Significado	Valor
α	Coeficiente de arrastre radial	0 - 2 [-]
β	Coeficiente de arrastre del viento	0 - 2 [-]

Los coeficientes de arrastre α y β son una parametrización de mezcla turbulenta entre la columna y la atmosfera circundante, de componente radial a la columna en el caso de α y normal para el caso de β . El rango de valores va entre 0 y 2, sin embargo se sugiere valores cercanos a 0.09 para la componente radial y entre 0.5 - 0.9 para la

componente normal⁷. Para este estudio solo se considerara el valor 0.1 para α y 0.5 para β .

6.1.3. Atmósfera

Tabla 6.3 Constantes Atmosféricas

Constante	Significado	Valor
θ_{a0}	Temperatura atmosférica en el vent	[K]
P_0	Presión atmosférica en el vent	[Pa]
ρ_{a0}	Densidad atmosférica	[kg m ⁻³]
H_1	Altura a la tropopausa desde el vent	[m]
H_2	Altura a la Estratósfera desde el vent	[m]
Tgrad1	Gradiente de temperatura entre el vent y H_1	[K m ⁻¹]
Tgrad2	Gradiente de temperatura entre H_1 y H_2	[K m ⁻¹]
Tgrad3	Gradiente de temperatura sobre H_2	[K m ⁻¹]

Para mayor precisión, los valores de temperatura y presión en el vent serán tomados directamente de los radiosondeos de Puerto Montt.

El valor de ρ_{a0} se estima directamente de la fórmula:

$$\rho_{a0} = \frac{P_0}{(R_d \theta_{a0})} \quad (6.2)$$

Los valores del perfil atmosférico (H_1 , H_2 , Tgrad1, Tgrad2 y Tgrad3) se tomaron de la parametrización realizada por Wood (1988) (Tabla 6.3).

Tabla 6.4 Perfil Atmosférico. Wood (1988)

Constante	Valor
H_1	12000 [m]
H_2	20000 [m]

⁷ <https://www.plumerise.bris.ac.uk/help/userguide/ParametersBox.php>

Tgrad1	-6.5/ 1000[K m ⁻¹]
Tgrad2	0 [K m ⁻¹]
Tgrad3	2/ 1000[K m ⁻¹]

6.1.4. Gravedad reducida

Para el cálculo de g' y \bar{G} , correspondientes a los términos de gravedad reducida, se ocuparon las siguientes fórmulas:

$$g' = g \left(\frac{c_0 \theta_0 - c_{a0} \theta_{a0}}{c_{a0} \theta_{a0}} \right) \quad (6.3)$$

$$\bar{G} = \left(\frac{g^2}{(c_d \theta_{a0}) \left(1 + \frac{c_d}{g * Tgradn} \right)} \right) \quad (6.4)$$

Donde \bar{G} es dependiente de la altura y Tgradn corresponde al gradiente de temperatura correspondiente para cada altura.

Luego, se puede determinar el valor de \bar{N} (frecuencia de flotabilidad media o Brunt–Väisälä).

$$\bar{N} = \bar{G}^2 \quad (6.5)$$

6.1.5. Perfil de vientos

Se estableció el perfil de viento según Bonadonna y Phillips (2003). Para ello se consideró como velocidad del viento máxima en la tropopausa. El perfil de viento considerado para este estudio se observa en la Figura 6.1.

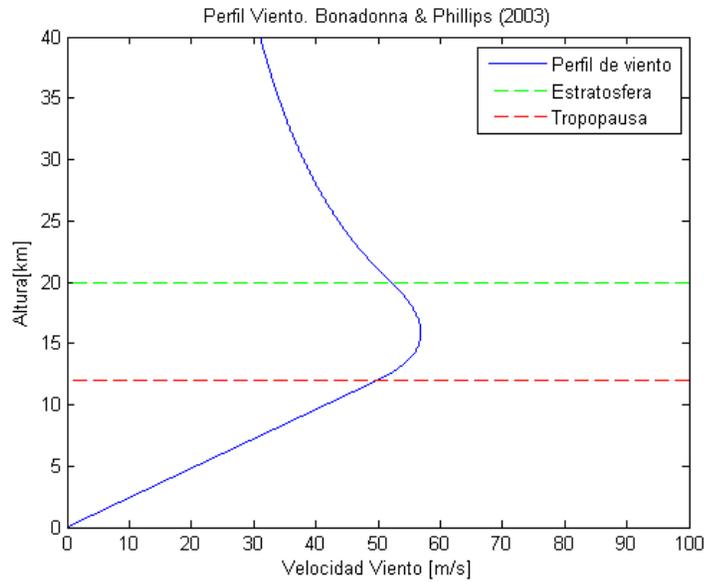


Figura 6.1 Perfil de viento. Bonadonna & Phillips 2003

6.1.6. Flujo de masa

Empleando como base el material auxiliar de la publicación de Degruyter y Bonadonna (2012), se efectuaron diferentes cambios en los parámetros de velocidad del viento, presión atmosférica y temperatura en el vent, para comparar qué factores afectan en mayor medida el comportamiento del flujo de masa.

6.1.6.1. Velocidad del viento

Para comprobar el efecto de la velocidad del viento en la tasa de flujo de masa de la columna, se varió la velocidad máxima del viento, manteniendo todos los otros parámetros constantes (Figura 6.2 y Tabla 6.5). Como resultado de este análisis se puede apreciar la disminución del flujo de masa a medida que la velocidad del viento se

hace menor; este efecto se ve exagerado a medida que la altura aumenta. Esto se ve incrementado 4.11 veces entre la tasa de flujo a 20 m/s con respecto a la tasa a los 100 m/s, para una columna de 5 km; pero cuando la columna alcanza los 20 km, esta diferencia se hace más notoria.

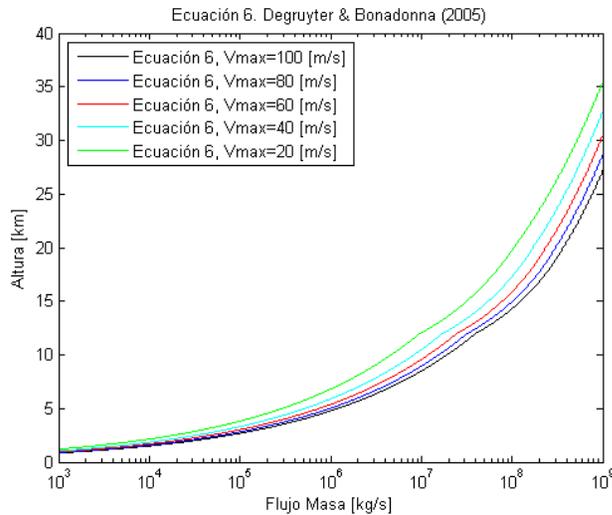


Figura 6.2 Variación de flujo de masa a diferentes velocidades de viento

Tabla 6.5 Flujo de masa a diferentes velocidades del viento

Velocidad	5 km	10 km	15 km	20 km
100 [m/s]	1.21e6	1.94e7	1.26e8	3.65e8
80 [m/s]	9.82e5	1.57e7	1.02e8	3.00e8
60 [m/s]	7.53e5	1.20e7	7.88e7	2.35e8
40 [m/s]	5.23e5	8.37e6	5.54e7	1.70e8
20 [m/s]	2.94e5	4.70e6	3.20e7	1.05e8

6.1.6.2. Presión atmosférica

El efecto que provoca el cambio de presión en el vent es mínima, como se observa en el gráfico (Figura 6.3), donde los valores de flujo de masa es casi la misma para cada una de las presiones, a igual altura. Es por ello que se desestima la influencia

que posee los cambios de presión en la base de la columna sobre la tasa de flujo de masa de la columna.

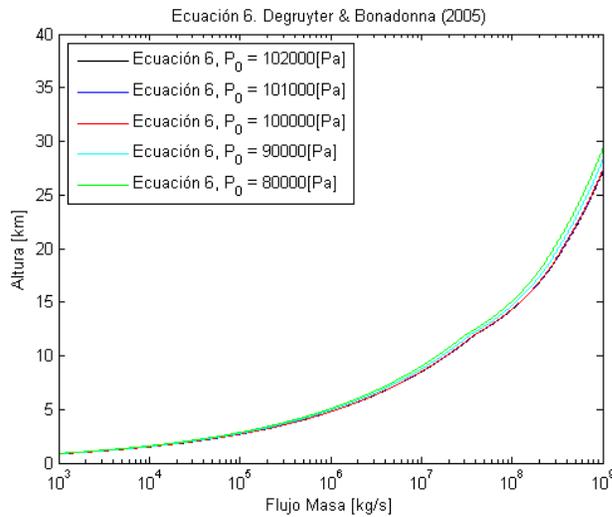


Figura 6. 3 Variación de flujo de masa a diferentes presiones.

Tabla 6.6 Flujo de masa a diferentes presiones.

Presión	5 km	10 km	15 km	20 km
102000[Pa]	1.21e6	1.94e7	1.26e8	3.65e8
101000[Pa]	1.20e6	1.92e7	1.24e8	3.62e8
100000[Pa]	1.19e6	1.90e7	1.23e8	3.58e8
90000[Pa]	1.07e6	1.71e7	1.11e8	3.22e8
80000[Pa]	9.50e5	1.52e7	9.85e7	2.87e8

6.1.6.3. Temperatura

El efecto de la temperatura en la tasa de flujo de masa es casi nula (Figura 6.4), donde a menor temperatura, la tasa de flujo aumenta para la misma altura observada (Tabla 6.7).

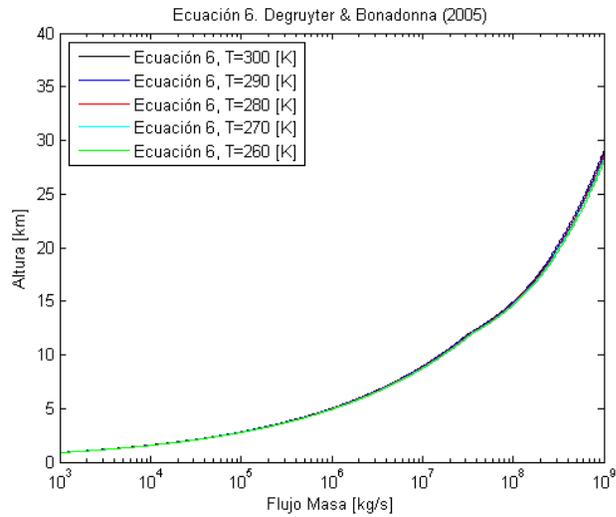


Figura 6.4 Variación de flujo de masa a diferentes temperaturas

Tabla 6.7 Flujo de masa a diferentes Temperaturas

Temperatura	5 km	10 km	15 km	20 km
300 [K]	9.83e5	1.57e7	1.02e8	2.96e8
290[K]	1.01e6	1.62e7	1.05e8	3.05e8
280[K]	1.04e6	1.66e7	1.08e8	3.13e8
270[K]	1.07e6	1.71e7	1.11e8	3.23e8
260[K]	1.10e6	1.76e7	1.14e8	3.34e8

Es por esto que se concluye que la velocidad del viento es la única variable que influye significativamente en la tasa de flujo de masa.

6.2. Parámetro adimensional Π

Además los autores introducen un nuevo parámetro adimensional Π , ecuación 6.6, con el cual posible determinar la influencia del viento en la dinámica del penacho, mostrando como el viento se vuelve dominante (caso $\Pi \ll 1$) si la altura (H), frecuencia

media de flotabilidad (\bar{N}), y coeficiente de arrastre radial (α) es menor con respecto a la interacción de la velocidad del viento (\bar{v}) y coeficiente de arrastre del viento (β).

$$\Pi = 6 \frac{z_1^{5/2}}{z_1^4} \frac{\bar{N}H}{\bar{v}} \left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^2 \quad (6.6)$$

Tabla 6.8 Variables de la ecuación 6.6

Variable	Significado	Valor [unidades]
\bar{N}	Frecuencia media de flotabilidad	[s ⁻¹]
H	Altura de la columna	[m]
\bar{v}	Velocidad del viento promedio	[m s ⁻¹]
α	Coficiente de arrastre radial	0.1 [-]
β	Coficiente de arrastre del viento	0.5 [-]
z_1	Altura máxima adimensional	2.8 [-]

6.3. Caso de estudio: 13 de Junio 2011

6.3.1. Análisis de los datos de Radiosondeo

Para un estudio más completo se escogió el día 13 de Junio, por ser uno de los días con mayor información (imágenes satelitales, serie de tiempo de la cámara de Futangue, radiosondeos de Puerto Montt, perfiles de vientos del modelos GDAS y Reanálisis, etc...), además de presentar diversos cambios en la altura de la columna a lo largo del día, lo que resulta de mayor interés para comprender los procesos que controlan el alzamiento y disminución del penacho.

En la Figura 6.5 se observan los radiosondeos para el día estudiado. En tonos azules se encuentran los Radios sondeos del modelo entre las 9 UTC (color más claro) a las 21 UTC (color más oscuro). En Rojo se observan los datos del radiosondeo de Puerto Montt a las 12 UTC (datos reales). Los perfiles de viento poseen un comportamiento similar entre sí. El perfil de viento en rojo es el único que posee mayor

interferencia, atribuible a la mayor cantidad de puntos (79 datos para el radiosondeo de Puerto Montt y 20 para el modelo).

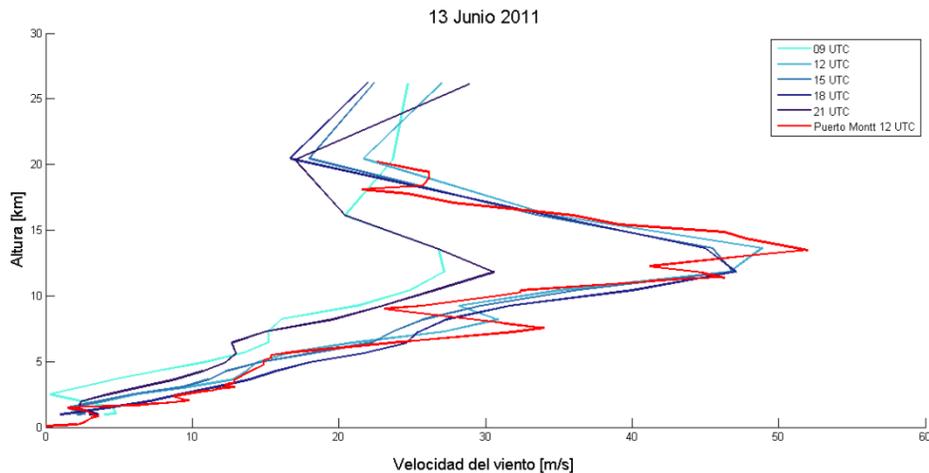


Figura 6.5 Comparación de perfil de velocidad de viento a distintas horas.

Posteriormente se realizó una comparación de los perfiles de dirección y velocidad del viento y temperatura atmosférica, para cada para cada radiosondeo de modo individual. Utilizando los perfiles de temperatura de cada radiosondeo es posible determinar los límites reales de la tropopausa y el límite con la Estratósfera, con un grado de error ligado a la cantidad de puntos de medición, marcados con 'o' cada punto. En el caso de los radiosondeos del modelo de vientos, la cantidad de puntos de muestreo son 20, en el caso del radiosondeo real se cuenta con 79 puntos de muestreo. Un factor a considerar es que la diferencia de altura entre puntos de muestreo no es constante, teniendo mayor densidad de datos a menor altura.

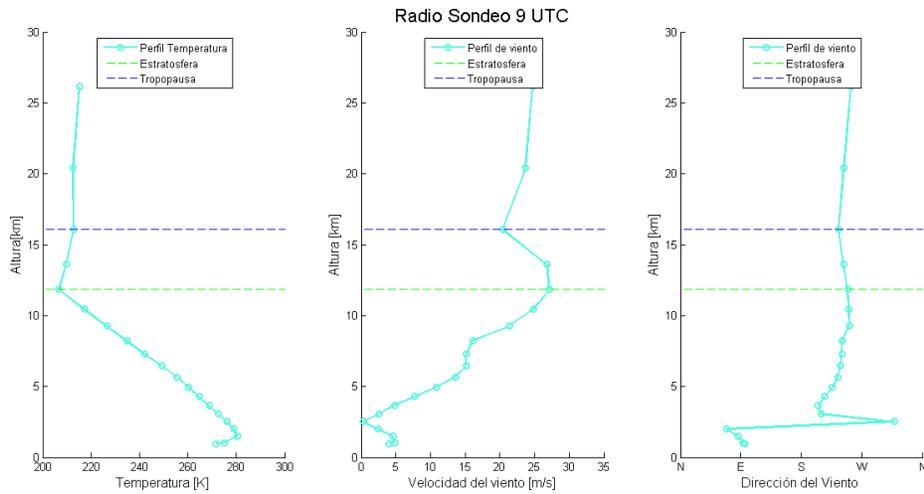


Figura 6.6 Perfil de temperatura modelos GDAS. 13 Junio 2011, 9 UTC.

Para el radiosondeo más temprano 9 UTC (5:00 am hora local) fue posible determinar la altura de la Tropopausa entre [10.4 - 13.6] cercano a los 11.9 km y el límite con la Estratósfera entre [13.6 - 20.4] cercano a 16 km (Figura 6.6). El viento alcanza velocidades de 27.2 m/s, con una dispersión principalmente desde el SW.

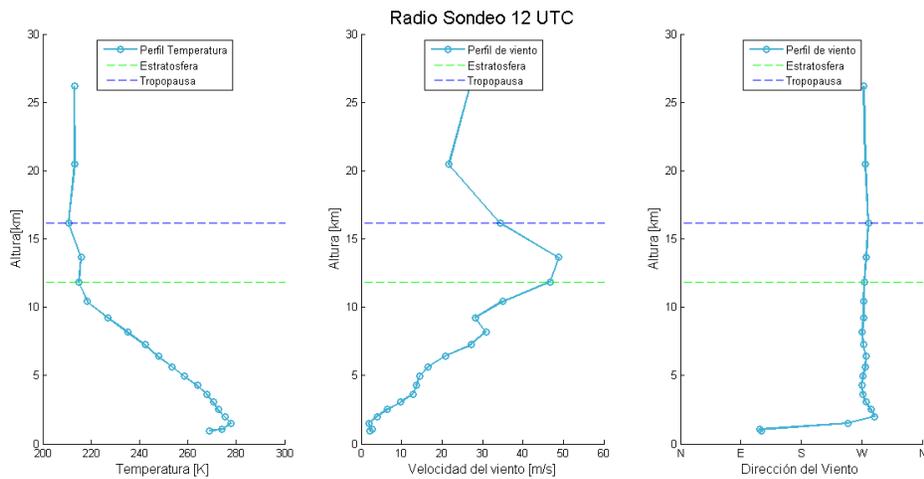


Figura 6.7 Perfil de temperatura modelos GDAS. 13 Junio 2011, 12 UTC.

Para el radiosondeo de las 12 UTC (8:00 am hora local) se determinó altura de la Tropopausa en torno a los 11.8 km, entre [10.4 - 13.7] y el límite con la Estratósfera en torno a los 16.1 km, entre el rango [13.7 - 20.5] (Figura 6.7). El viento alcanza velocidades de 48.9 m/s, con una dispersión de W a E.

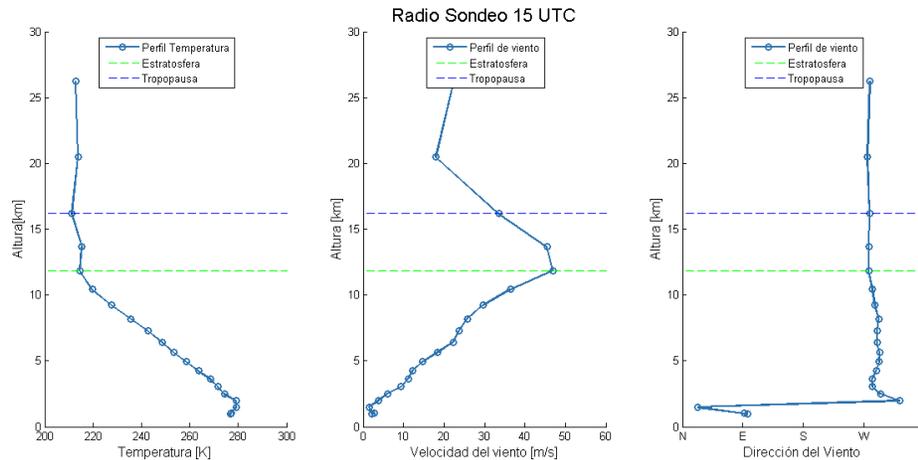


Figura 6.8 Perfil de temperatura modelos GDAS. 13 Junio 2011, 15 UTC.

A las 15 UTC (11:00 am hora local), se estimó la altura de la tropopausa cercana a los 11.9 km, dentro del rango [10.4 - 13.7] y el límite con la Estratósfera cercana a los 16.2 km [13.7 - 20.5] (Figura 6.8). El viento alcanza velocidades de 46.9 m/s, con una dirección de dispersión principalmente de W a E.

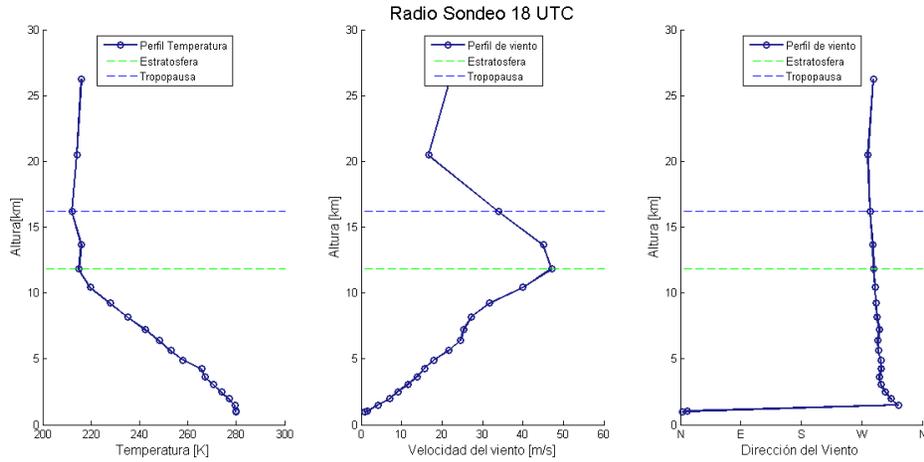


Figura 6.9 Perfil de temperatura modelos GDAS. 13 Junio 2011, 18 UTC

A las 18 UTC (14:00 hora local), se calculó la altura de la tropopausa en torno a los 11.8 km [10.4 - 13.7] y el límite de la tropopausa en 16.2 km [13.7 - 20.5] (Figura 6.9). El viento alcanza velocidades de 47.1 m/s, donde la dirección de dispersión es principalmente NW - SE.

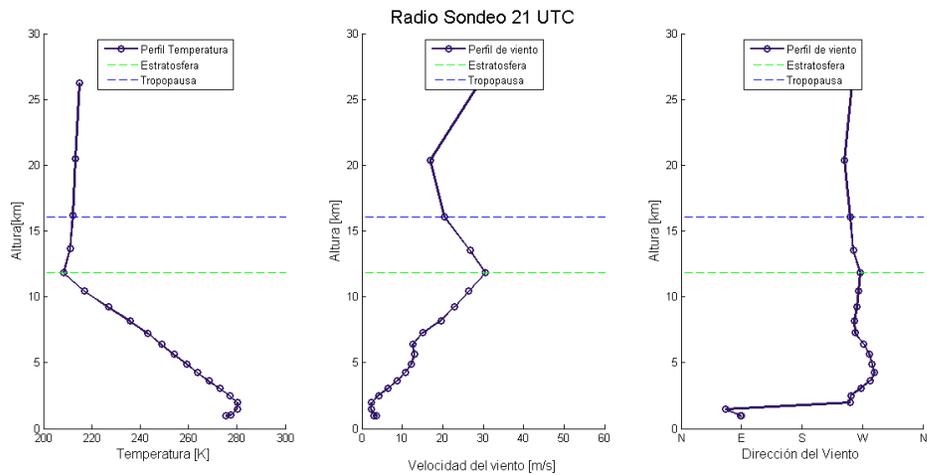


Figura 6.10 Perfil de temperatura modelos GDAS. 13 Junio 2011, 21 UTC.

A las 21 UTC (19:00 hora local), se estima una altura de la tropopausa en torno a los 11.8 km [10.4 - 13.6] y el límite de con la Estratósfera cercano a los 16.1 km [13.6 - 20.4] (Figura 6.10). El viento alcanza velocidades de 30.6 m/s, donde la dirección de dispersión vuelve a ser principalmente W- E.

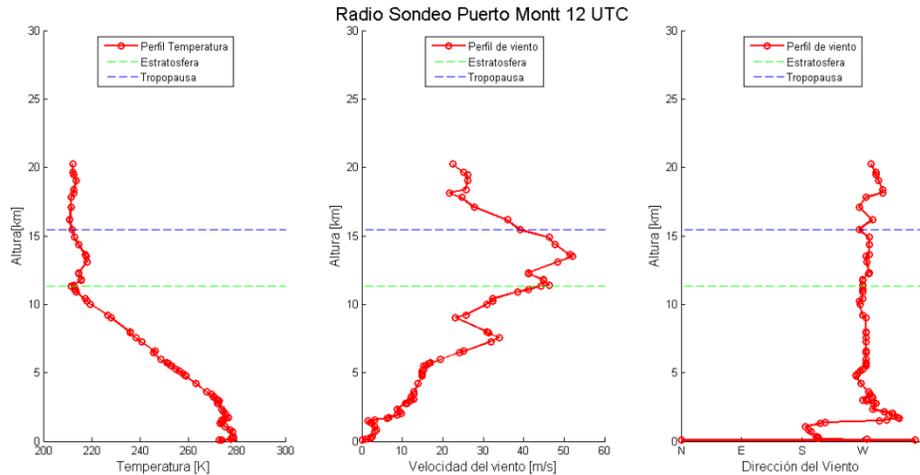


Figura 6.11 Perfil de temperatura Radiosondeo Puerto Montt. 13 Junio 2011, (12 UTC).

Con estos valores es posible determinar la altura de la Tropósfera dentro del rango [11.1 - 11.4] cercano a los 11.3 km y el límite con la Estratósfera en los 15.5 km [14.9 - 16.2]. El viento alcanza velocidades de 52 m/s, con una dirección de dispersión principalmente W-E, lo cual se ajusta bastante bien con el modelo.

El radiosondeo de Puerto Montt (Figura 6.11) corresponde a valores experimentales reales y no a los resultados de un modelo. Si bien la distancia con respecto al vent son mayores (120 km aprox.), corresponde a valores medidos en terreno, no a una integración de varios radiosondeos. Además es importante tener en cuenta que se poseen casi 4 veces más valores dentro del mismo rango que los del

modelo, por lo tanto se obtiene un rango de error mucho menor (Figura 6.12), por ende, más certero, es por esta razón que para los futuros gráficos la alturas H1 y H2 serán determinadas a partir de estos valores.

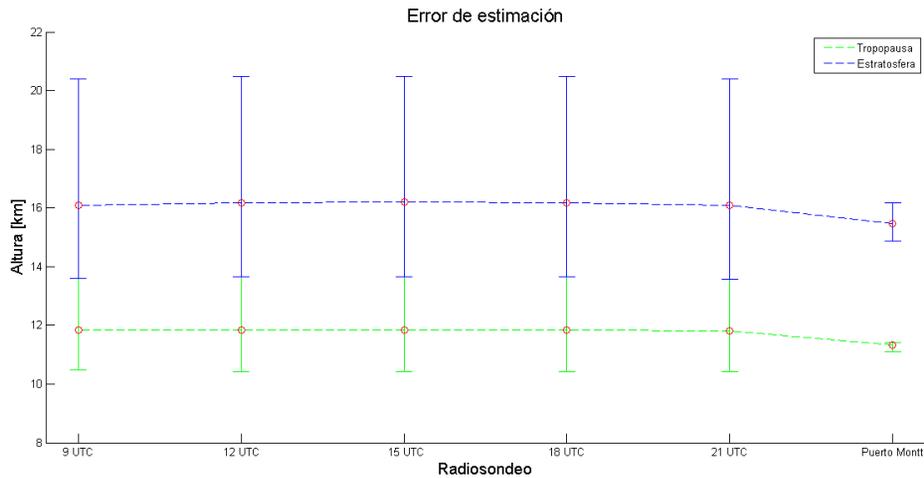


Figura 6.12 Error en determinación de altura de las capas de la atmósfera

6.3.2. Alturas medidas

A través de la serie de imágenes, aportadas por la cámara de Futangue, entre las 13:09 a 20:00 UTC del día 13 de Junio 2011 (Figura 6.13), se pudo establecer una serie de tiempo de la altura de la columna cada un minuto (Figura 6.14). Para ello fue necesario escalar cada imagen utilizando como referencia los valores ya conocidos de altura según el CTOP de las imágenes satelitales de Terra y Aqua, a las 14:30 y 18:45 UTC. Cabe destacar que los valores de altura máximos de la columna captados por la cámara es de 8.323 km, sobre ese límite, el tope superior de la columna sale del campo de visión de cámara, por lo que no es posible determinar un valor exacto, pero si acotar inferiormente.



Figura 6.13 Imagen Capturada por la Web Cam de Futangue. 13 de Junio 2011, 16:25 UTC

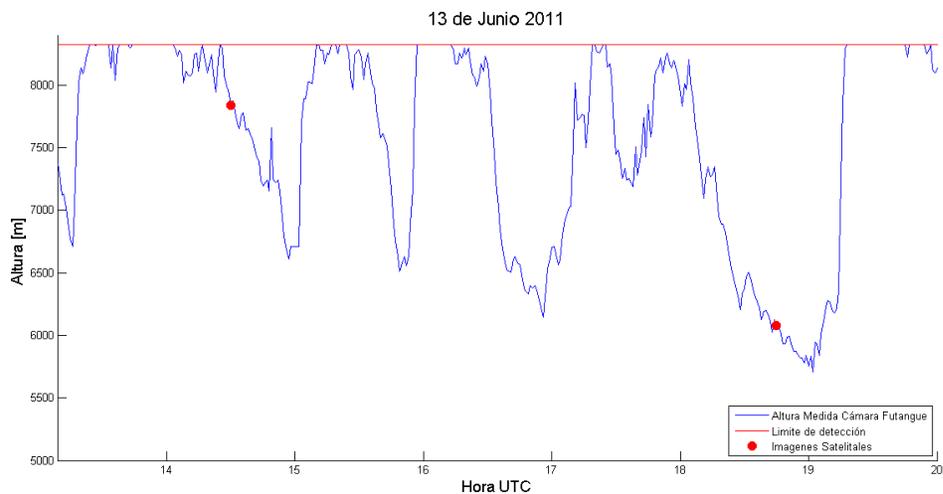


Figura 6.14 Serie de alturas de la columna. 13 de junio 2011

Como se observa en el gráfico de la Figura 6.14, la altura de la columna sufre una serie de variaciones durante el día, donde en cada ciclo, la altura disminuye paulatinamente, atribuido a un taponamiento del conducto volcánico, el que se

destapa violentamente producto de la presión interna, ocasionando un aumento explosivo en el tamaño de la columna. Este hecho habría pasado completamente inadvertido de contar únicamente con las imágenes satelitales (marcadas con puntos rojos).

6.4. Resultados

Para estimar el valor de flujo de masa, se escogieron dos momentos, uno en donde la columna se encontraba alta y otra baja, de manera de comparar los valores del flujo de masa para ambos casos. Fueron considerados únicamente instantes con altura determinada, por lo que se excluyen los instantes en donde la columna no se pudiese observar completamente por la cámara. Para el caso de la columna alta se escogió las 14:30 UTC, que corresponde al instante cuando el satélite Terra pasó sobre el volcán, la que poseía una altura de 7840 m sobre el nivel del mar. El caso de la columna baja se tomó el momento cuando pasó el satélite Aqua, correspondiente a las 18:45 UTC, donde la columna se encontraba con una altura de 6080m sobre el nivel del mar. Estos momentos se encuentran destacados con puntos rojos en la Figura 7.14. Para ambos casos, la altura fue determinada mediante el método de la sombra.

Para determinar las variables atmosféricas de temperatura, presión y gradiente de temperatura, se utilizó los datos obtenidos del radiosondeo de Puerto Montt por considerarse los valores más precisos dentro de los radiosondeos disponibles. Para la velocidad máxima del viento se utilizaron diferentes radiosondeos, en el caso de columna alta, se utilizó el radiosondeo del modelo a las 15 UTC, por ser el más

cercano; en el caso de columna baja se utilizó el radiosondeo de las 21 UTC. Ver Tabla 6.9, para información detallada de los parámetros implementados.

Tabla 6. 9 Variables Caso Alto y Caso Bajo

Variable	Caso Alto	Caso Bajo
Θ_{a0}	267 [K]	
P_0	86400[Pa]	
H_1	9918 [m]	
H_2	14055[m]	
TempGrad1	-7.1/1000 [K/m]	
TempGrad2	0 [K/m]	
TempGrad3	2/1000[K/m]	
$V_{m\acute{a}x}$	46.9 [m/s]	30.6 [m/s]
H	7840 [m]	6080[m]

Con estos parámetros se determinó el flujo de masa (Figura 6.15), donde el caso alto se obtuvo el valor mayor: $3.18 \cdot 10^6$, correspondiente no solo al caso con mayor altura, sino que con mayor velocidad del viento. En el caso bajo: $7.86 \cdot 10^5$, en rojo, refleja el cambio en la velocidad del viento y la diferencia en altura, obteniendo un valor cuatro veces menor con respecto al caso alto.

Se estimó además los valores de Π para ambas situaciones, donde en el de mayor altura, el valor de Π corresponde a 0.0393; y en el de menor altura, el valor Π corresponde a 0.0467. Esto quiere decir, que si bien en ambos casos el viento es un factor determinante en la altura de la columna, afecta de menor manera a la columna más baja.

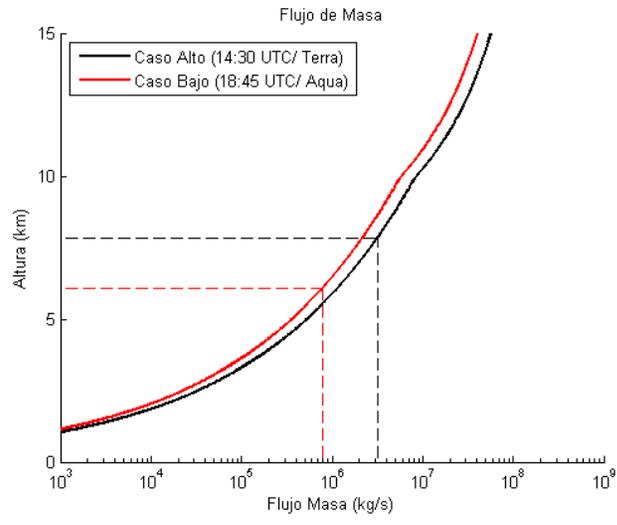


Figura 6.15 Flujo Masa Caso Alto y Bajo

7. ANÁLISIS MENSUAL DE MODIS

7.1. MODIS disponibles

Se recopilaron desde la página de la NASA⁸, todas las imágenes satelitales MODIS que captaran el volcán entre los días 4 de Junio 2011, día de inicio de la erupción, hasta el 1 de Abril de 2012, donde la actividad volcánica mermó en forma considerable y ya no fue percibida por los satélites, Terra y Aqua, por razones de escala.

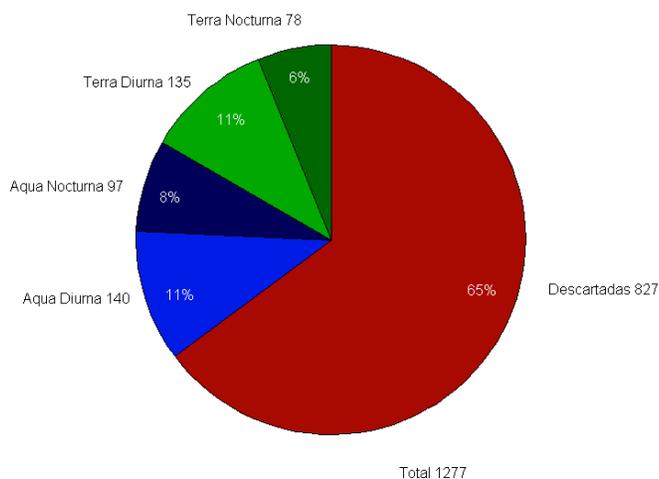


Figura 7.1 Distribución de las imágenes MODIS analizadas

⁸ <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>

De un total de 1277 imágenes disponibles (Figura 7.1), 827, correspondiente al 65%, fueron descartadas, ya sea que por la trayectoria del satélite no era posible observar adecuadamente la columna o por la nubosidad de la zona que cubría el volcán y el penacho, por lo que no es posible determinar la señal de ceniza en las imágenes. Entre las 450 imágenes que se consideraron, 275 corresponden a diurnas (135 Terra y 140 Aqua), por lo que es posible observar tanto con el método BTM como en el espectro visible; las 175 restantes (78 Terra y 97 Aqua), por ser nocturnas, solo es posible obtener información del método BTM.

Analizando estos datos de modo diario, de los 303 días de erupción considerados en este estudio, en 115 de ellos no se posee información de imágenes satelitales, por lo que es imposible obtener una línea de tiempo continua para este análisis. La distribución de días sin información se detalla en la Tabla 7.1, en donde, como era de esperar, los meses con menor información se concentran en los meses de invierno.

Tabla 7.1 Días sin información según mes.⁹

Mes	Total de días	Días sin información	Porcentaje sin información [%]
Junio 2011	27*	10	37
Julio 2011	31	16	52
Agosto 2011	31	16	52
Septiembre 2011	30	14	47
Octubre 2011	31	7	23
Noviembre 2011	30	11	37
Diciembre 2011	31	7	23
Enero 2012	31	11	35
Febrero 2012	29	13	45
Marzo 2012	32**	10	31
TOTAL	303	115	38

⁹ * Junio se considera desde el día 4 en adelante.

** El 1 de Abril, para efectos prácticos en este trabajo, se considera como parte de Marzo.

7.2. Análisis mensual

Para cada uno de los meses en estudio, se recopiló la dirección de dispersión de la columna, en grados con respecto al norte aumentando en sentido anti horario. Para la medición de los ángulos se utilizó el programa ImageJ sobre imágenes georeferenciadas previamente con el programa ENVI.

En el proceso de determinación del ángulo de dispersión, fueron tomados en cuenta algunos puntos con el fin de homogenizar la obtención de datos:

- En los casos en donde la columna sufría una inflexión en su forma, solo se consideró la zona más cercana al volcán.
- Los casos en donde la columna no poseía una dirección preferente, no fueron tomados en cuenta para realizar este análisis.

De forma simultánea, se realizó un conteo de ciudades afectadas por la columna cada día, calculando un porcentaje de días afectados con respecto al total de días con información. En este análisis se consideraron 5 ciudades importantes en Chile, debido carácter de capital provincial o regional (Concepción, Temuco, Valdivia, Osorno y Puerto Montt), adicionalmente, se contabilizaron también las ciudades de San Martín de los Andes y San Carlos de Bariloche en Argentina, Ver Figura 7.2. Resultados Figura 7.3.

Finalmente, a modo de comparación, se analizó el resultado acumulativo tanto para la dispersión preferente, como el conteo de ciudades afectadas. Además se

implementó el método CTOP y método de la sombra para estimar la altura de la columna para todo el período eruptivo, y con estos valores, se calculó el flujo de masa.

Para mayor detalle de los resultados, revisar las Tablas de la 2 a la 14 en el anexo.

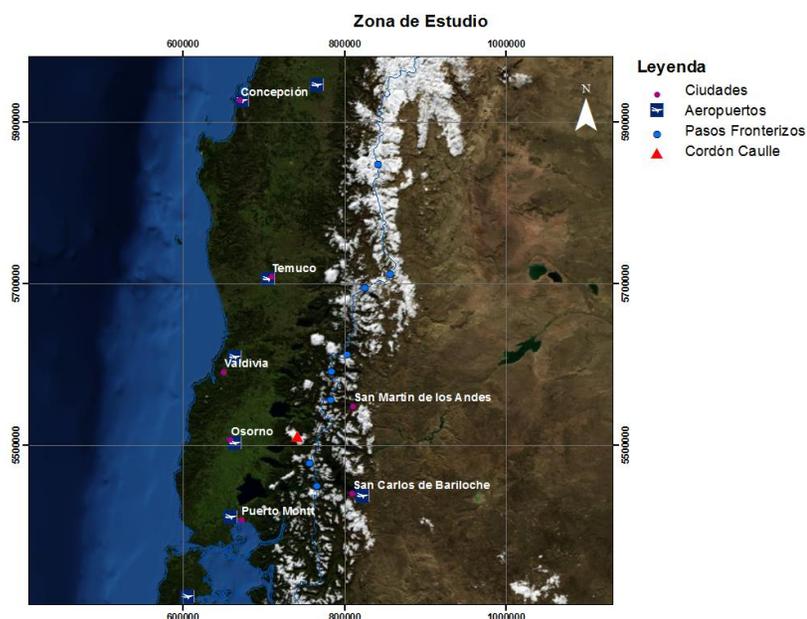


Figura 7. 2 Ciudades consideradas para el análisis.

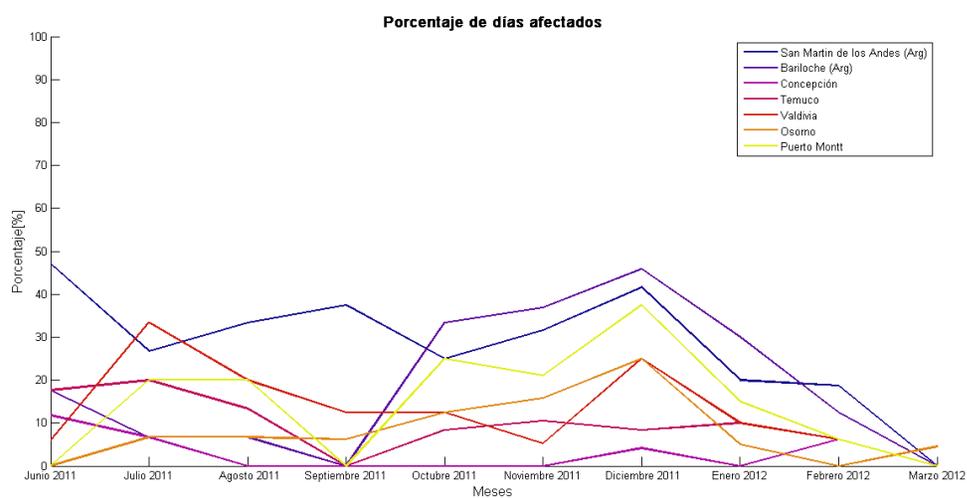


Figura 7.3 Porcentaje de días afectados para las ciudades de estudio durante el periodo eruptivo.

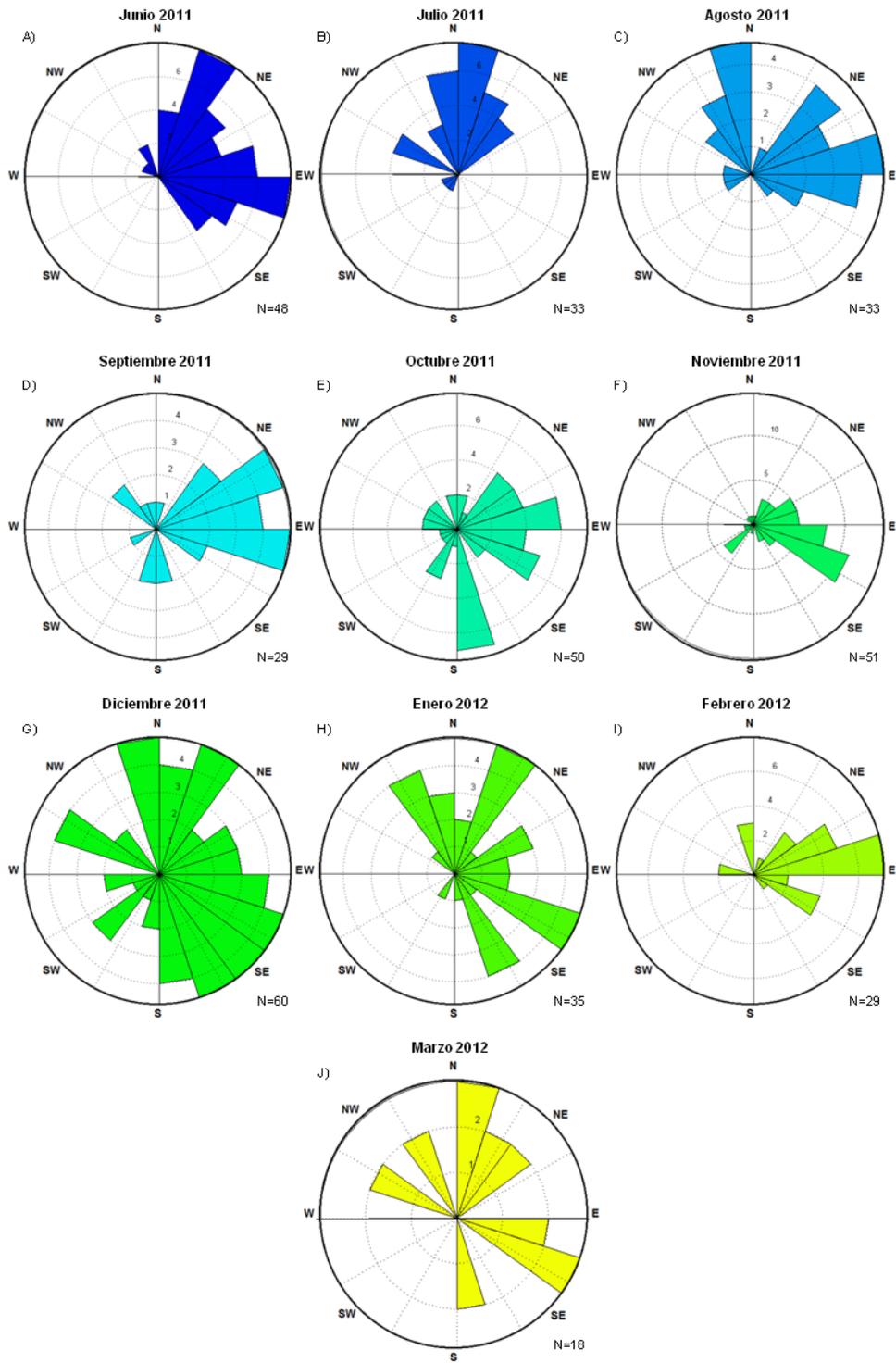


Figura 7.4 Dirección de dispersión medida para los diferentes meses de la erupción. Junio 2011-Marzo 2012

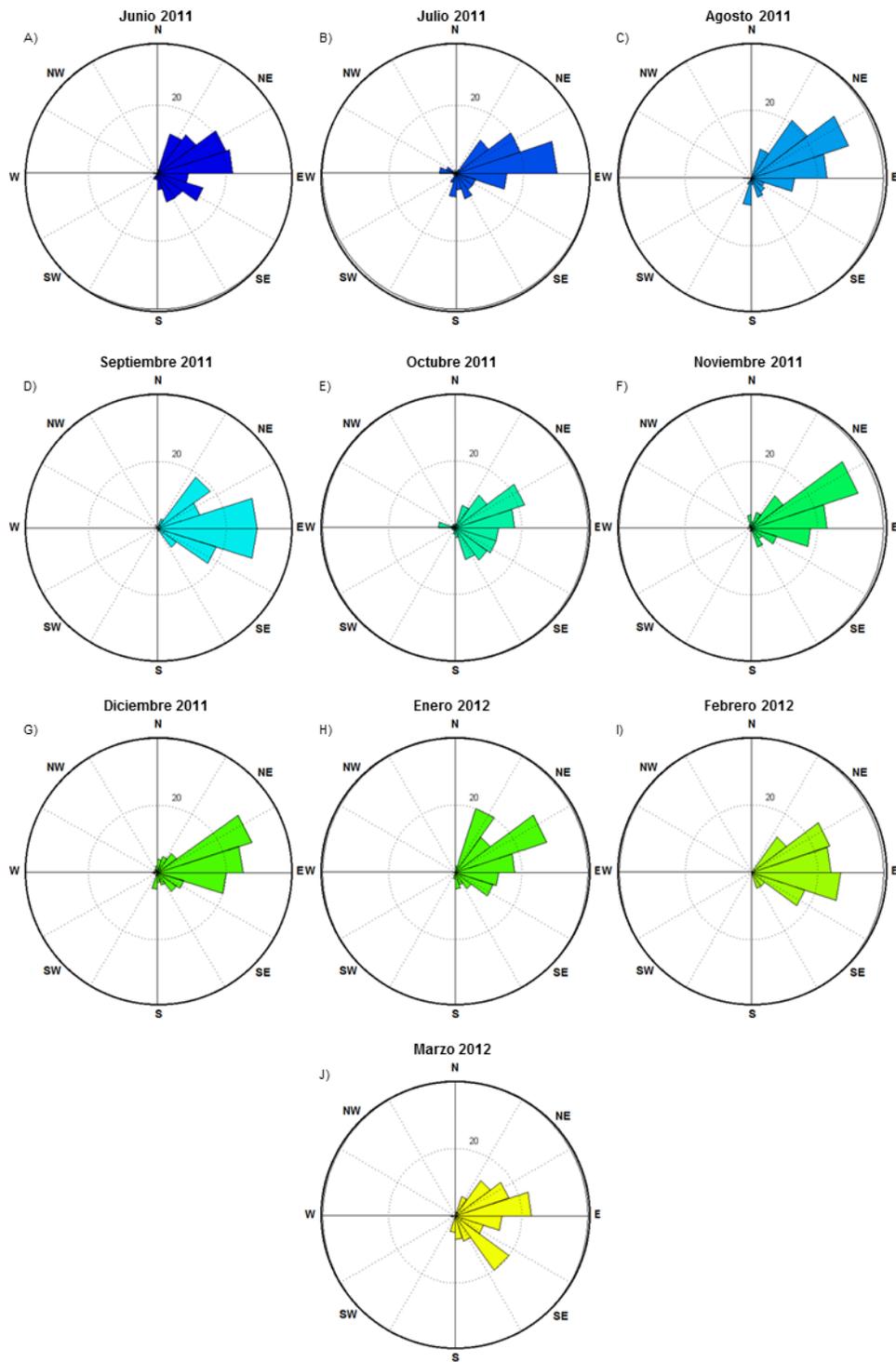


Figura 7.5 Dirección de dispersión para los diferentes meses de la erupción, según datos de Reanálisis, datos obtenidos cada 6 horas. Junio 2011-Marzo 2012

7.2.1. Junio 2011

Para el primer mes de erupción, se consideraron 48 imágenes MODIS, todas con dirección de dispersión definida, repartidas entre 17 días con información.

Para estos días la dirección de dispersión preferente se concentró en el primer cuadrante (Figura 7.4A), siendo San Martín de los Andes, en Argentina, la ciudad más afectada, donde un 47% de los días observados, el penacho pasaba por sobre la ciudad. En menor medida, afectó las ciudades de San Carlos de Bariloche y Temuco (Figura 7.3). Durante este mes no se observó señal de ceniza sobre las ciudades de Puerto Montt y Osorno.

Ver Tabla 7.2 para mayor detalle de porcentaje de días afectados.

Tabla 7. 2 Porcentaje de días afectados, Junio 2011

Ciudad	Porcentaje [%]
Osorno	00.00
Puerto Montt	00.00
Valdivia	05.88
Temuco	17.65
Concepción	11.76
Bariloche	17.65
San Martin de los Andes	47.06

7.2.2. Julio 2011

En el mes de Julio, correspondiente al segundo mes de la erupción, fueron consideradas 35 imágenes satelitales, distribuidas en 15 días con información. Del total de las imágenes, solo en 2 no fue posible medir una orientación preferencial de la dirección de dispersión.

La dirección preferente de dispersión del penacho se observa principalmente en dirección al N, con leves cambios al NE y NW, con casi nula dispersión al SW (Figura 7.4B). No se observó dispersión directa hacia el Sur, Sur-Este para este período, sin embargo, de igual manera ciudades como Bariloche o Puerto Montt se vieron afectadas durante Julio, esto producto de las inflexiones de la columna.

Para este período, aumento considerablemente el porcentaje de días afectados de las ciudades en el territorio Chileno (Figura 7.3), siendo Valdivia, con un tercio de los casos, la más perjudicada. San Martín de los Andes se mantiene dentro de las ciudades más afectadas, con un 26.67% de los días (ver Tabla 7.3). De igual manera, en el territorio chileno, Temuco y Osorno, se ven damnificadas con un quinto de los casos cada una.

Tabla 7.3 Porcentaje de días afectados, Julio 2011.

Ciudad	Porcentaje [%]
Osorno	20.00
Puerto Montt	06.67
Valdivia	33.33
Temuco	20.00
Concepción	06.67
Bariloche	06.67
San Martín de los Andes	26.67

7.2.3. Agosto 2011

Durante el mes de Agosto, se consideraron 35 imágenes, repartidas en 15 días con información útil. Se descartaron 2 de las imágenes, por no poseer una dirección preferencial clara.

Para este período, se observaron direcciones de dispersión preferenciales hacia el E y N, con escasa dispersión en el tercer cuadrante (Figura 7.4C).

Durante el tercer mes de erupción, la ciudad con mayor porcentaje de días afectados corresponde a San Martín de los Andes, con un tercio de los casos, manteniéndose como una de las ciudades más perjudicadas producto de esta erupción (Figura 7.3). Valdivia y Osorno se vieron aquejadas un 20% de los días observados; en menor medida Temuco, con un 13.33%; Bariloche y Puerto Montt, casi no se vieron afectadas. Concepción no registró señal de ceniza en este período (ver Tabla 7.4).

Tabla 7.4 Porcentaje días afectados, Agosto 2011.

Ciudad	Porcentaje [%]
Osorno	20.00
Puerto Montt	06.67
Valdivia	20.00
Temuco	13.33
Concepción	00.00
Bariloche	06.67
San Martín de los Andes	33.33

7.2.4. Septiembre 2011

En el mes de Septiembre se consideraron 16 días con información, para los cuales se poseen 31 imágenes distribuidas. Dentro de este mes solo se descartaron 2 de las 31 imágenes, por no poseer una dirección clara de dispersión.

Durante este período, la dirección de dispersión se concentró principalmente en dirección E, siendo casi nula en las otras direcciones (Figura 7.4D).

Durante el cuarto mes de la erupción, San Martín de los Andes se mantiene como la ciudad perjudicada en mayor cantidad de días (Figura 7.3), 37.5% de los casos. En menor medida, Valdivia (12.5%) y Puerto Montt (6.25%); el resto de las ciudades observadas no presentaron señal de ceniza positiva (ver Tabla 7.5).

Tabla 7.5 Porcentaje días afectados, Septiembre 2011

Ciudad	Porcentaje [%]
Osorno	00.00
Puerto Montt	06.25
Valdivia	12.50
Temuco	00.00
Concepción	00.00
Bariloche	00.00
San Martín de los Andes	37.50

7.2.5. Octubre 2011

El quinto mes de erupción, correspondiente a Octubre 2011, cuenta con 24 días con información útil, con 55 imágenes disponibles, 5 de las cuales fueron descartadas por no presentar una dirección de dispersión clara, sin embargo, el aumento de los datos para este mes es considerable.

Durante este período, la dirección de dispersión se concentró principalmente en dirección Sur a Sur-Este, con casi nula dispersión hacia los otros puntos cardinales (Figura 7.4E).

Durante este período, aumentó considerablemente el porcentaje de días afectados por la erupción en las distintas ciudades. Las ciudades turísticas argentinas de San Carlos de Bariloche y San Martín de los Andes fueron las más perjudicadas, con

un 33.33% y 25%, respectivamente, de los días estudiados (Figura 7.3). En la zona Chilena, Osorno se vio aquejada un cuarto de los días. Las ciudades de Valdivia y Puerto Montt fueron afectadas con un 12.5% de los días. Solo un 8.33% de los días observados perjudicó a Temuco. Durante el muestreo de Octubre no se vio afectada la ciudad de Concepción (ver Tabla 7.6).

Tabla 7.6 Porcentaje de días afectados, Octubre 2011

Ciudad	Porcentaje [%]
Osorno	25.00
Puerto Montt	12.50
Valdivia	12.50
Temuco	08.33
Concepción	00.00
Bariloche	33.33
San Martin de los Andes	25.00

7.2.6. Noviembre 2011

El mes de Noviembre cuenta con 53 imágenes repartidas entre los 19 días con información. Dentro de este período solo se descartaron 2 imágenes por no presentar una dirección preferente.

Durante este período la dirección de dispersión se concentró en dirección SE (Figura 7.4F), con algunas variaciones hacia NE y SW.

San Martin de los Andes y Bariloche (31.58 % y 36.84% respectivamente) nuevamente fueron las ciudades más afectadas (Figura 7.3), en menor medida las ciudades de Osorno, Puerto Montt y Temuco. Valdivia presenta una escasa señal de

ceniza para este lapso y en Concepción nuevamente no se visualiza señal de ceniza en este mes (Tabla 7.7).

Tabla 7.7 Porcentaje días afectados, Noviembre 2011

Ciudad	Porcentaje [%]
Osorno	21.05
Puerto Montt	15.79
Valdivia	05.26
Temuco	10.53
Concepción	00.00
Bariloche	36.84
San Martin de los Andes	31.58

7.2.7. Diciembre 2011

El séptimo mes de la erupción, correspondiente a Diciembre 2011, posee 24 días con información útil, con 66 imágenes disponibles. De las 66 imágenes, 6 no presentaban una dirección de dispersión clara, por lo que no fueron tomadas en cuenta para los resultados a continuación.

Durante este mes, no se presenta una clara tendencia en la dispersión, siendo las direcciones con mayor frecuencia SE y N (Figura 7.4G).

Por la gran variedad en dirección de dispersión, se observan varias ciudades perjudicadas durante este mes (Figura 7.3). Las Ciudades Argentinas de San Carlos de Bariloche y San Martin de los Andes concentran casi un 50% de los días afectados. En Chile, Osorno es la ciudad más aquejada, con un 37.5% de los días. Valdivia y Puerto Montt poseen un cuarto de los días con presencia de ceniza. En menor medida,

Temuco presenta señal de ceniza para el 8.33% de los días observados y Concepción un 4.17% (ver Tabla 7.8).

Tabla 7.8 Porcentaje días afectados, Diciembre 2011

Ciudad	Porcentaje [%]
Osorno	37.50
Puerto Montt	25.00
Valdivia	25.00
Temuco	08.33
Concepción	04.17
Bariloche	45.83
San Martin de los Andes	41.67

7.2.8. Enero 2012

Para el primer mes del año 2012, de los 20 días con información, se observaron 39 imágenes MODIS. De las 39 del total, se descartaron 4 por no poseer una dirección determinada de dispersión.

Durante este período se concentra la dispersión en dirección NNE, SE y NNW (Figura 7.4H). Casi no se observa dispersión hacia el W o S.

Bariloche es la Ciudad más afectada durante este período (Figura 7.3), con un 30% de los días. Con un 20% de los casos se encuentra San Martin de los Andes. En menor medida las ciudades Chilenas de Osorno (15%) y con un 10% Temuco y Valdivia. Puerto Montt solo con un 5%, mientras que no se detectó señal de ceniza en Concepción durante este mes (ver Tabla 7.9).

Tabla 7.9 Porcentaje días afectados, Enero 2012.

Ciudad	Porcentaje [%]
Osorno	15.00
Puerto Montt	05.00
Valdivia	10.00
Temuco	10.00
Concepción	00.00
Bariloche	30.00
San Martin de los Andes	20.00

7.2.9. Febrero 2012

El noveno mes luego del inicio de la erupción, cuenta con 16 días con información, con 32 imágenes donde 3 fueron descartadas por no poseer una dirección preferente de dispersión.

Durante este período la dirección de dispersión preferencial fue principalmente E (Figura 7.4I), siendo casi nula en las otras direcciones.

Durante el mes de Febrero, disminuyó notoriamente el porcentaje de días afectados para cada ciudad, donde San Martin de los Andes, solo con un 18.75%, es la que presentan más días con señal de ceniza (Figura 7.3). La segunda mayoría la presenta Bariloche, con un 12.5%. Osorno, Valdivia, Temuco y Concepción presentan un 6.25%, mientras que para Puerto Montt no se detectó señal de ceniza (ver Tabla 7.10)

Tabla 7.10 Porcentaje días afectados, Febrero 2012

Ciudad	Porcentaje [%]
Osorno	06.25
Puerto Montt	00.00
Valdivia	06.25
Temuco	06.25
Concepción	06.25

Bariloche	12.50
San Martin de los Andes	18.75

7.2.10. Marzo 2012

Durante el último mes de la erupción, casi no se obtuvieron datos debido a la casi nula dispersión al final de la erupción, donde de las 56 imágenes trabajadas de este período, solo 18 presentaron una dirección preferente.

Dentro de las imágenes con una dispersión marcada, no se observa una dirección preferente, siendo más frecuente direcciones hacia el E y N (Figura 7.4J).

Este Período, solo se observó señal de ceniza en la zona de Puerto Montt (Figura 7.3), esto se explica por su escasa proyección y casi nula dispersión de la columna durante la fase final de la erupción (ver Tabla 7.11).

Tabla 7. 11 Porcentaje de días afectados, Marzo 2012

Ciudad	Porcentaje [%]
Osorno	00.00
Puerto Montt	04.55
Valdivia	00.00
Temuco	00.00
Concepción	00.00
Bariloche	00.00
San Martin de los Andes	00.00

7.3. Acumulativo

Durante el lapso total de la erupción se manejaron 450 imágenes satelitales MODIS, de las cuales 386 poseían una dirección preferente. Con estas últimas se estimaron las direcciones preferentes de dispersión durante todo el período eruptivo.

Durante toda la erupción se observó una dirección preferente marcada en el primer cuadrante (Figura 7.6), principalmente hacia el E- SEE, disminuyendo hacia el N. La dirección que presenta menor frecuencia es en torno a punto cardinal SW.

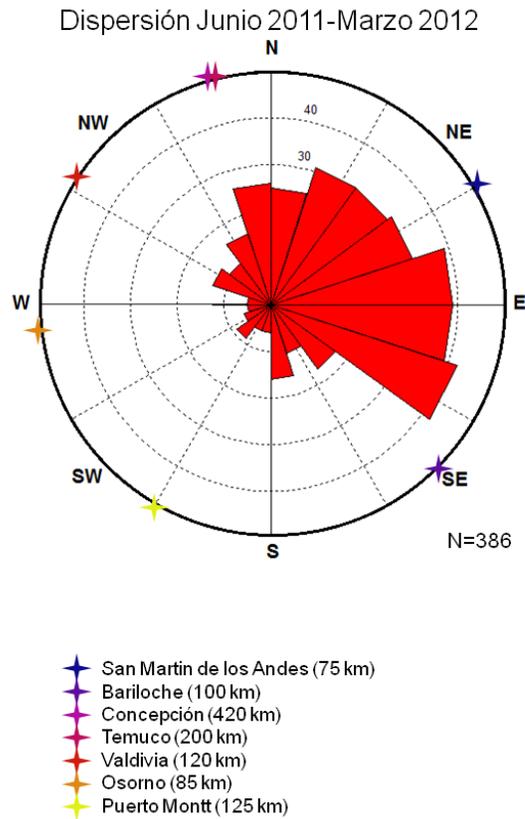


Figura 7.6 Rosa de dirección de dispersión entre Junio 2011-Marzo 2012

Dentro de las ciudades más perjudicadas por la ceniza, están las Argentinas de San Martín de los Andes 27.66% y Bariloche 20.74% (Figura 7.7) como era de esperar, dado la dirección de dispersión vista anteriormente. Dentro de Chile, la ciudad más afectada es Osorno, con 15.43% de los días, en este caso la relación no va tanto por la frecuencia de dirección, sino por la cercanía a la fuente de emisión. Las ciudades de

Valdivia, Puerto Montt y Temuco son aquejadas en menor medida (12.77% en el caso de Valdivia, y 9.04% en el caso de Puerto Montt y Temuco) (Tabla 7.12). La ciudad menos dañada dentro de las que se consideraron, es Concepción, con solo con un 2.66% (correspondiente a solo 5 veces, dentro de las imágenes analizadas), esto porque en la mayoría de los casos en donde la columna dispersaba en dirección NW, al llegar a la costa sufría una inflexión, en dirección W o N, evadiendo la ciudad (Figura 7.8).

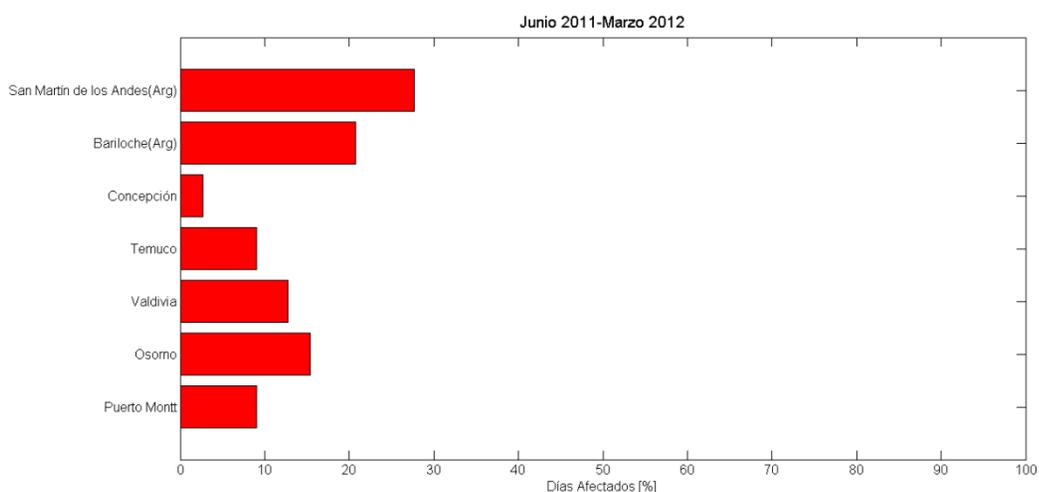


Figura 7.7 Porcentaje de días afectados para cada ciudad, entre Junio 2011-Marzo 2012

Tabla 7.12 Porcentaje de días afectados, Junio 2011-Marzo 2012

Ciudad	Porcentaje [%]
Osorno	15.43
Puerto Montt	09.04
Valdivia	12.77
Temuco	09.04
Concepción	02.66
Bariloche	20.74
San Martin de los Andes	27.66

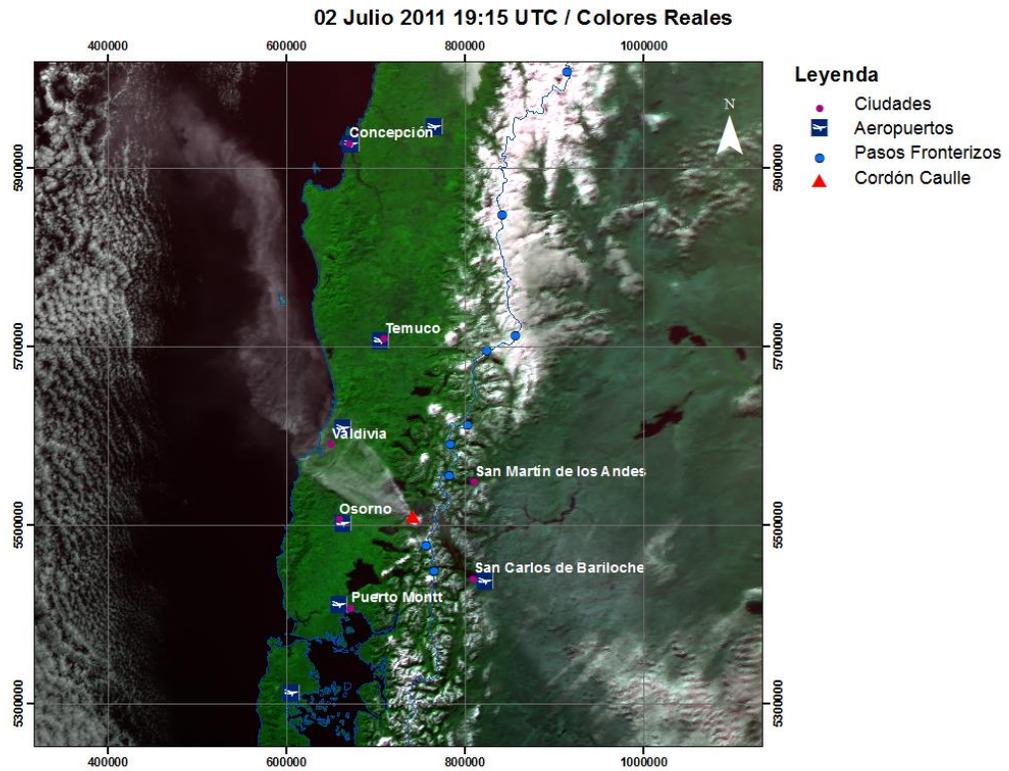


Figura 7.8 Imagen Aqua MODIS, 02 Julio 2011, 19:15 UTC

Con los valores de altura obtenidos mediante el método CTOP y el método de la sombra durante todo el período eruptivo fue posible generar una evolución de la variación de altura del penacho. En la Figura 7.9 se observan las diferentes alturas obtenidas por ambos métodos, en donde se aprecia una altura inicial de 18 km en los primeros días, decayendo considerablemente para el resto de la erupción. En las Tablas 13 y 14 en los Anexos es posible obtener una información detallada de estas mediciones.

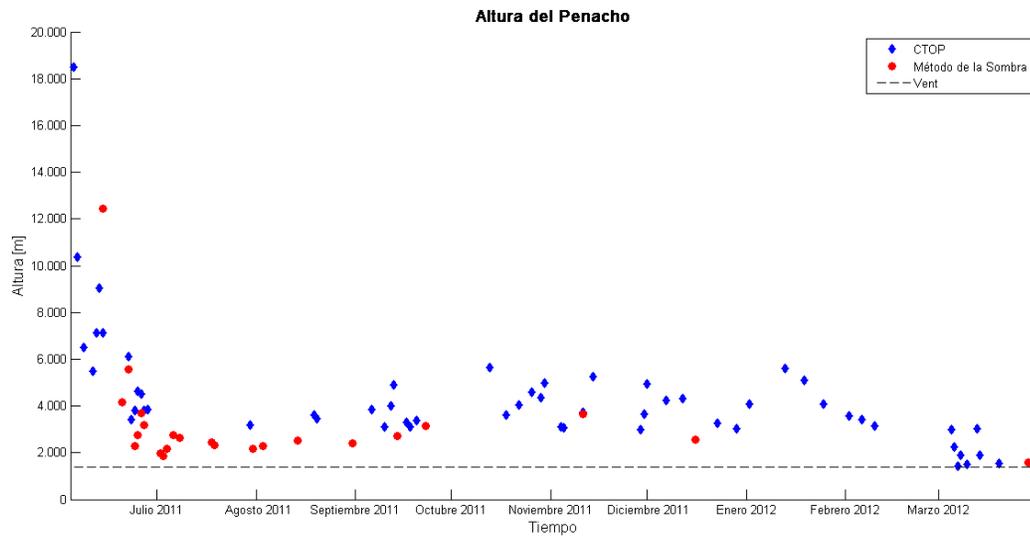


Figura 7.9 Evolución de la altura del penacho a lo largo de la erupción, mediante los métodos CTOP (azul) y el Método de la Sombra (rojo).

Una vez obtenidos los resultados de altura, y obteniendo la velocidad del viento a dicha altura desde los radiosondeos de Puerto Montt en cada caso, se calculó el flujo de masa durante el período de estudio según se explicó en el capítulo 6. En la Figura 7.10 se observa el cálculo de \dot{M} con la fórmula de Degruyter y Bonadonna (2012). En la imagen se observa un flujo de masa se orden de 10^8 kg/s en fase inmediata de la erupción, decayendo rápidamente un orden de magnitud al final de la primera semana. Desde la mitad de Junio a Febrero, el flujo se masa varió entre 10^4 y 10^6 kg/s. Durante el último mes de erupción el flujo disminuyó a extinguirse.

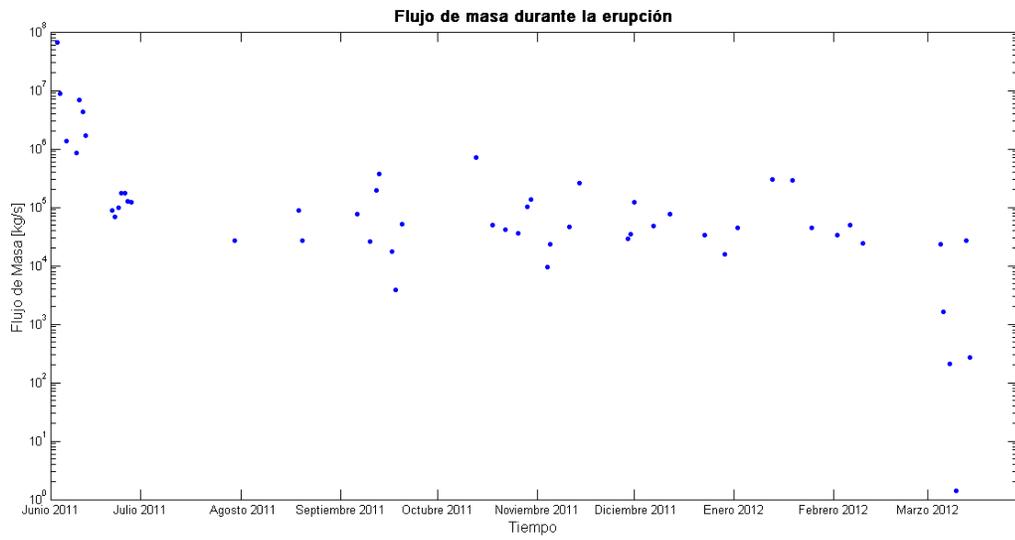


Figura 7.10 Flujo de masa durante de la erupción del volcán Caulle.

8. EVOLUCIÓN MORFOLÓGICA DEL PENACHO VOLCÁNICO

8.1. Aspectos generales

La erupción del cordón Caulle durante los meses de Junio 2011-Marzo 2012 se caracterizó por tener diferentes ciclos de actividad sísmica (Figura 8.1). El inicio de la erupción (4 Junio 2011), se marca por una gran actividad sísmica, la que comenzó a mermer, para luego reactivarse a mediados de Julio. Luego de este aumento en la actividad, comenzó a disminuir paulatinamente hasta reactivarse nuevamente durante el mes de Noviembre. Finalmente la actividad disminuyó hasta desaparecer a finales de Marzo.

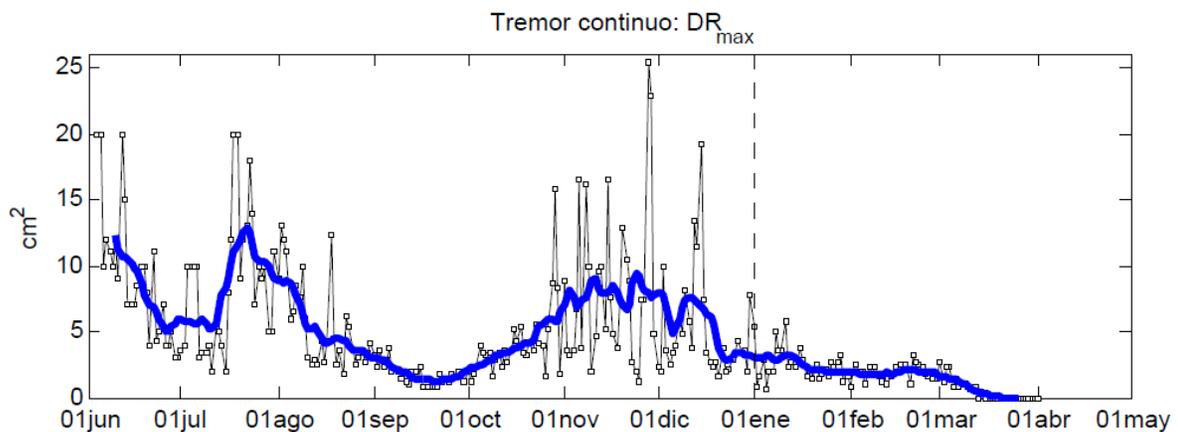
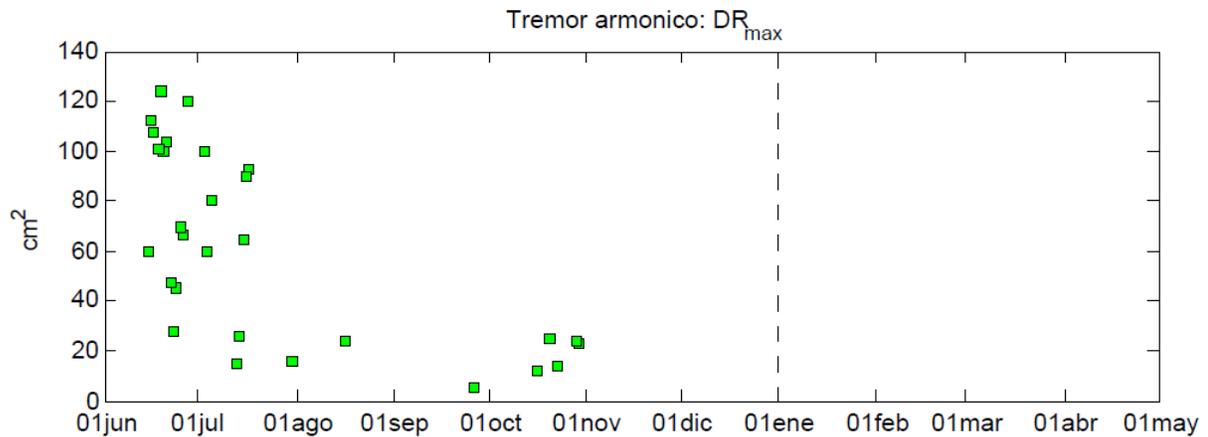


Figura 8.1 Análisis de Tremor Continuo mensual. Álvaro Amigo

La emisión de lava, asociada al Tremor Armónico (Figura 8.2) decae notoriamente entre los meses de Junio, donde se observa la máxima actividad, hasta Agosto. Durante los últimos días de Septiembre se reactiva la emisión hasta finales de Octubre, donde desaparece totalmente.



Es importante destacar que el peak de Julio no se consideró como un mes clave, debido a la falta de información disponible, principalmente por nubosidad durante este mes, además por la cercanía al período anterior, no aportaba información nueva al análisis.

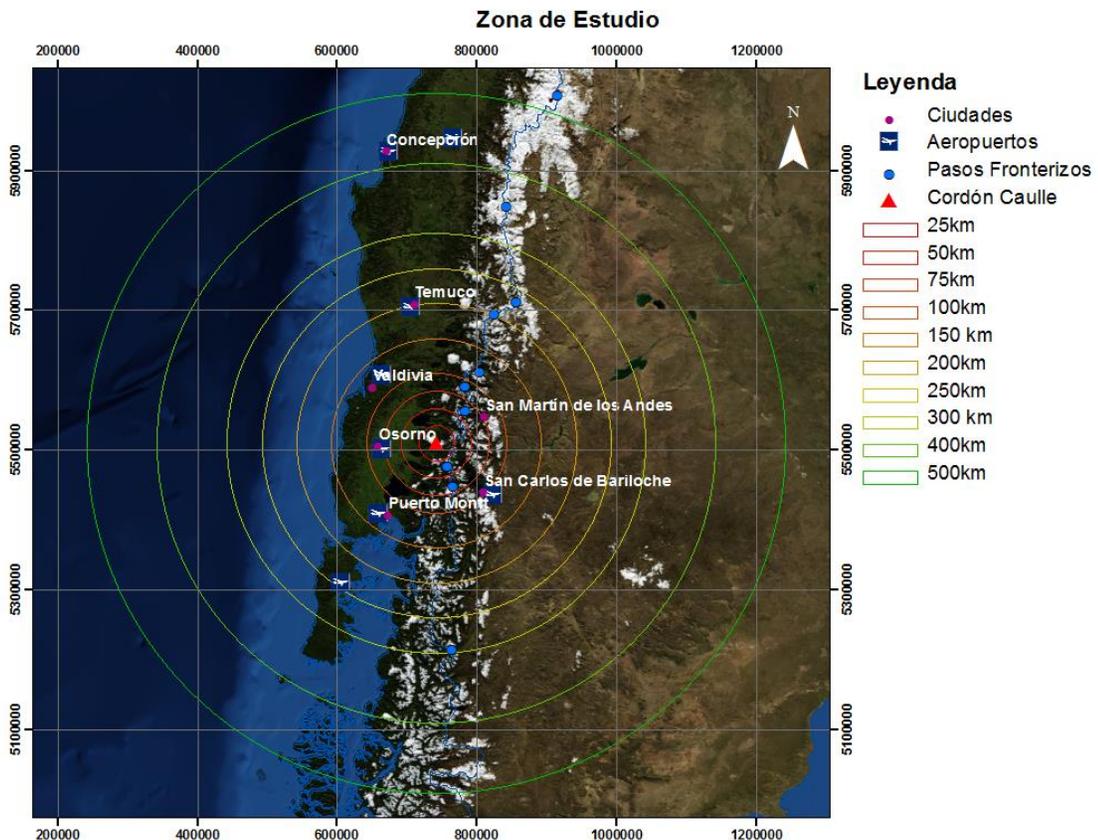


Figura 8.3 Círculos concéntricos al volcán de diferentes radios

Para cada uno de los meses se analizará la morfología promedio del penacho, en donde se considerarán la forma, la densidad, el grosor de la columna. Además se considerarán los valores de alturas, calculados a través del método de la sombra o CTOP (revisar Metodología). Dentro de los parámetros de comparación se midió la

longitud alcanzada por el penacho con el programa ArcGIS, a través de círculos concéntricos al volcán con radios de 25, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 400 y 500 km, tal como se observa en la Figura 8.3, con el fin de determinar un radio de alcance máximo de la ceniza. Adicionalmente se estimó un parámetro para estimar la relación de aspecto del penacho, dividiendo el ancho del penacho por el largo, de este modo es posible comparar entre las diferentes fases de manera numérica.

8.2.1. Junio

El primer mes de la erupción corresponde al mes de Junio 2011. Durante este mes el penacho se caracteriza por ser alargada y muy fina, con una relación de aspecto de 0.08 (ver Tabla 8.1). Generalmente constituye un penacho muy denso, siendo imposible ver a través de la ceniza. Ocasionalmente, se observa la parte distal más diluida, como se observa en la Figura 8.4, correspondiente al día 25 de Junio 2011, a las 19:10 UTC.

Tabla 8.1 Relación de aspecto del penacho para el mes de Junio 2011

Día	Hora	Largo	Ancho	Ancho/Largo
6	14:25	2000	72	0,04
8	14:15	2000	133	0,07
11	3:40	1200	52	0,04
13	5:05	1430	106	0,07
20	14:40	229	17	0,07
22	5:20	788	69	0,09
24	14:15	220	40	0,18
25	5:30	980	32	0,03
26	6:15	828	20	0,02
27	5:20	125	25	0,20
Promedio				0,08

La altura de la columna en un comienzo de la erupción supera los 18 km, según estimaciones con el método CTOP en la imagen del día 5 de junio 2011 a las 15:20 UTC (Ver Tabla 14 en el Anexo), decreciendo hasta valores cercanos a los 3.000 metros sobre el nivel del mar para finales del mes de Junio (ver Tablas 13 y 14 en los Anexos).

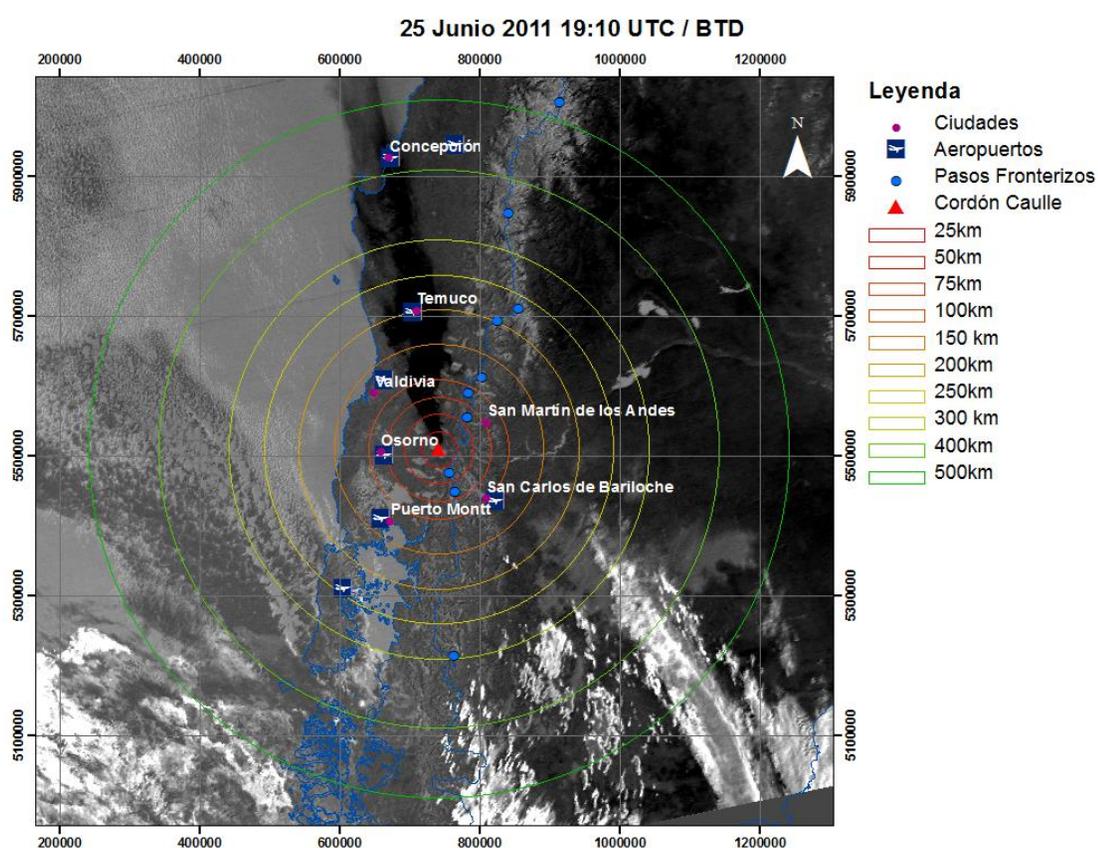


Figura 8. 4 Imagen BTD del 25 Junio 2011, 19:10 UTC

Esta primera etapa se caracteriza por cubrir grandes extensiones de terreno, donde el 74% de los casos el penacho alcanza distancias sobre los 500 km desde el

vent (Figura 8.5). Cabe destacar que el único valor bajo los 200 km corresponde a la imagen captada al inicio de la erupción (el día 4 de Junio a las 18:55 UTC), cuando aún se estaba formando el penacho.

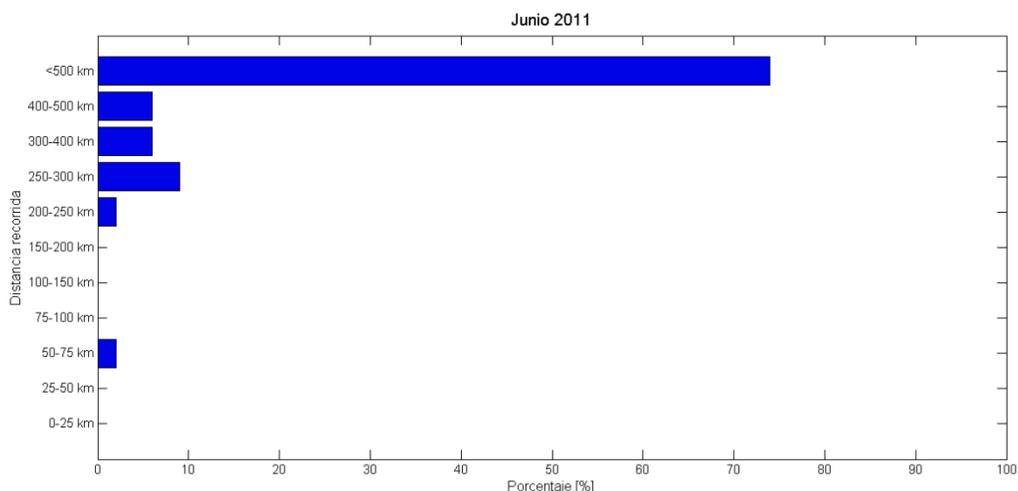


Figura 8. 5 Distancia recorrida, Junio 2011

Con respecto a la forma, se caracteriza por ser de aspecto alargado y recto dentro de la zona proximal al volcán. Existen inflexiones sobre los 400 km del origen, como el caso día 6 junio a las 18:40 UTC, como se observa en la Figura 8.6.

Por lo tanto, este mes se caracteriza por poseer una columna eruptiva de gran energía: se disgrega poco, alcanza largas extensiones. Es el período en donde alcanza las alturas más elevadas.

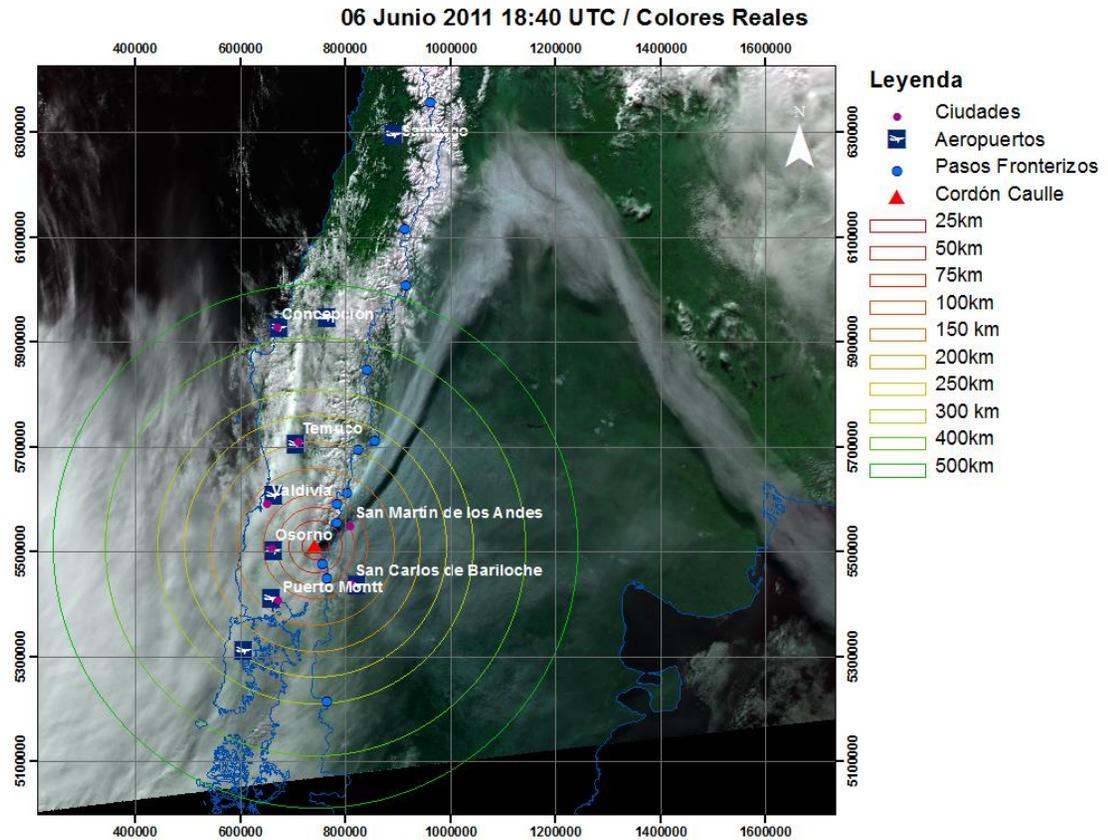


Figura 8. 6 Apariencia de la columna día 6 Junio 2011, 18:40 UTC.

8.2.2. Septiembre

Corresponde al cuarto mes de la erupción, en donde la actividad eruptiva ha decrecido considerablemente. La columna se presenta de menor extensión y notable disminución de la densidad, donde es posible ver a través de esta, esto denota una disminución en la concentración de ceniza a lo largo del penacho. En esta etapa el penacho presenta unan relación de aspecto de 0.29 (ver Tabla 8.2), denotando un aumento en el ancho con respecto al largo en comparación a la fase anterior.

Tabla 8.2 Relación de aspecto del penacho para el mes de Septiembre 2011

Día	Hora	Largo	Ancho	Ancho/Largo
12	14:15	40	12	0,30
13	5:30	61	9	0,15
14	14:00	48	12	0,25
17	5:05	135	9	0,07
17	14:40	53	38	0,72
19	18:30	60	32	0,53
22	14:50	100	38	0,38
25	5:55	140	4	0,03
26	5:00	120	22	0,18
Promedio				0,29

En las Figura 8.7 se observa el penacho tanto en espectro visible como con el método BTM para el día 17 de Septiembre, en donde el penacho fluye en dirección Oeste. No se observa con una forma definida y fina como se observaba en el mes de Junio, sino que disgregada y poco concentrada, donde en sectores solo puede visualizada mediante el método del BTM. Esto constituye una gran diferencia con respecto al período anterior, en donde la ceniza en muchos casos está tan disgregada que no es posible observarla en el espectro visible, lo que contrasta notoriamente con la fase inicial, en donde la ceniza no permitía observar la superficie.

La extensión del penacho también es considerablemente menor (Figura 8.8), en donde el 29% de las imágenes analizadas se extienden en el tramo 100-150 km, y ninguna sobrepasa los 400 km, considerando que para el mes de Junio el 74% de las imágenes superaban los 500 km de extensión. Es un cambio importante que marca una clara disminución en la actividad durante este mes.

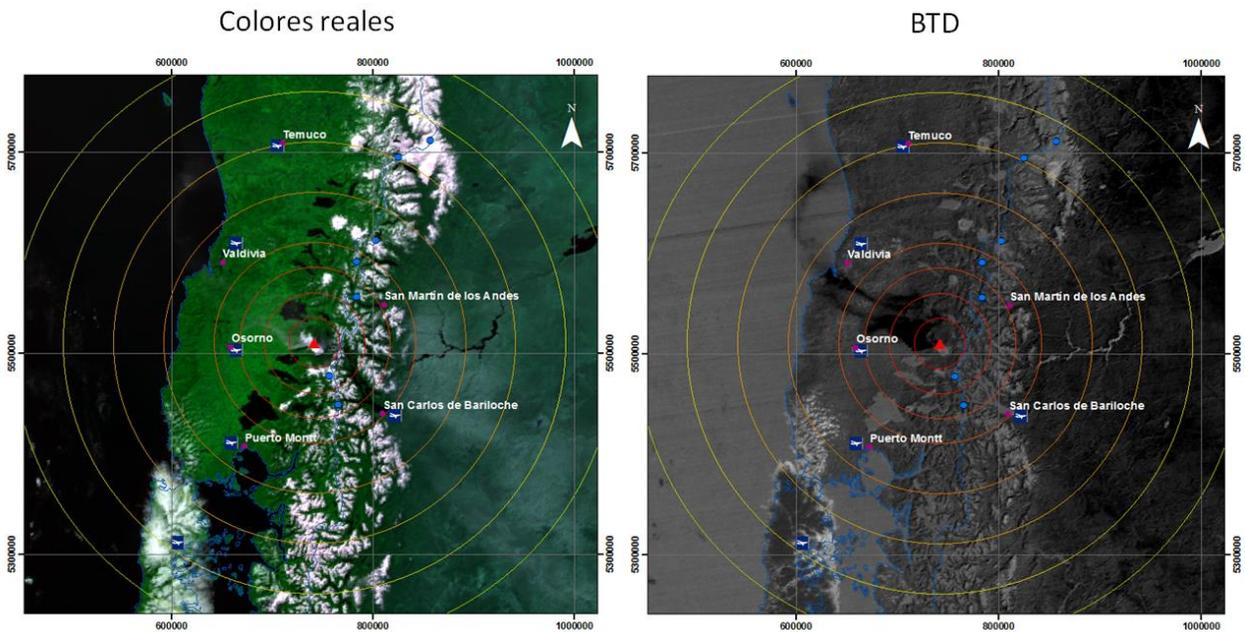


Figura 8.7 Apariencia de la columna día 17 de Septiembre 2011, 18:45 UTC. En colores reales (izquierda) no es posible distinguir a simple vista la ceniza, sin embargo a con el método BTD (derecha) se distingue una forma irregular con dispersión al W.

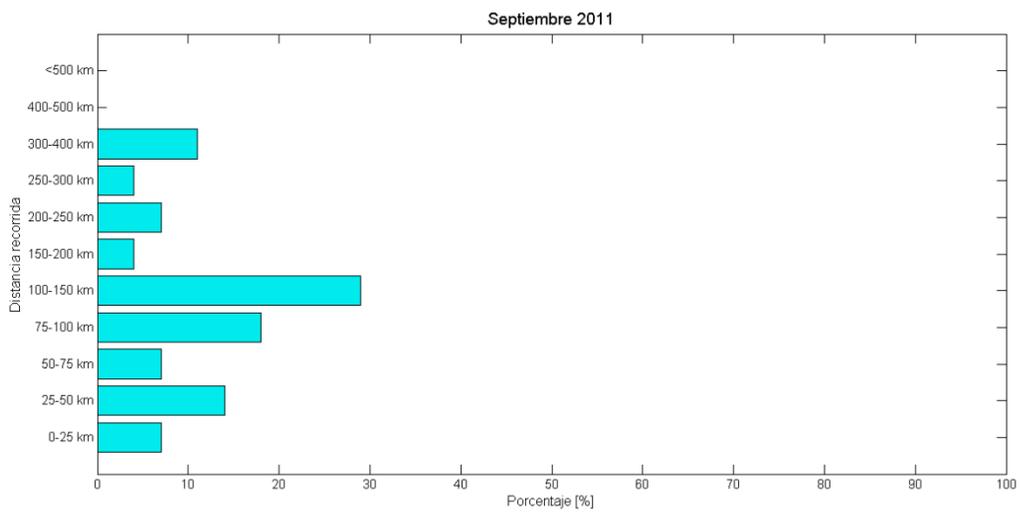


Figura 8.8 Distancia recorrida, Septiembre 2011

Las alturas medidas con el método de la sombra y CTOP (ver Tablas 13 y 14 en los Anexos), la columna alcanza altitudes entre los 3 y 5 km sobre el nivel del mar.

Analizando la forma del penacho, se observan morfologías más dispersas, poco rectas, incluso sinuosas.

En la Figura 8.9, correspondiente al día 12 de Septiembre 2011 (14:15 UTC), se observa un penacho de escasa longitud (cercano a los 25 km), además, a diferencia de la forma promedio del mes de Junio, es más gruesa.

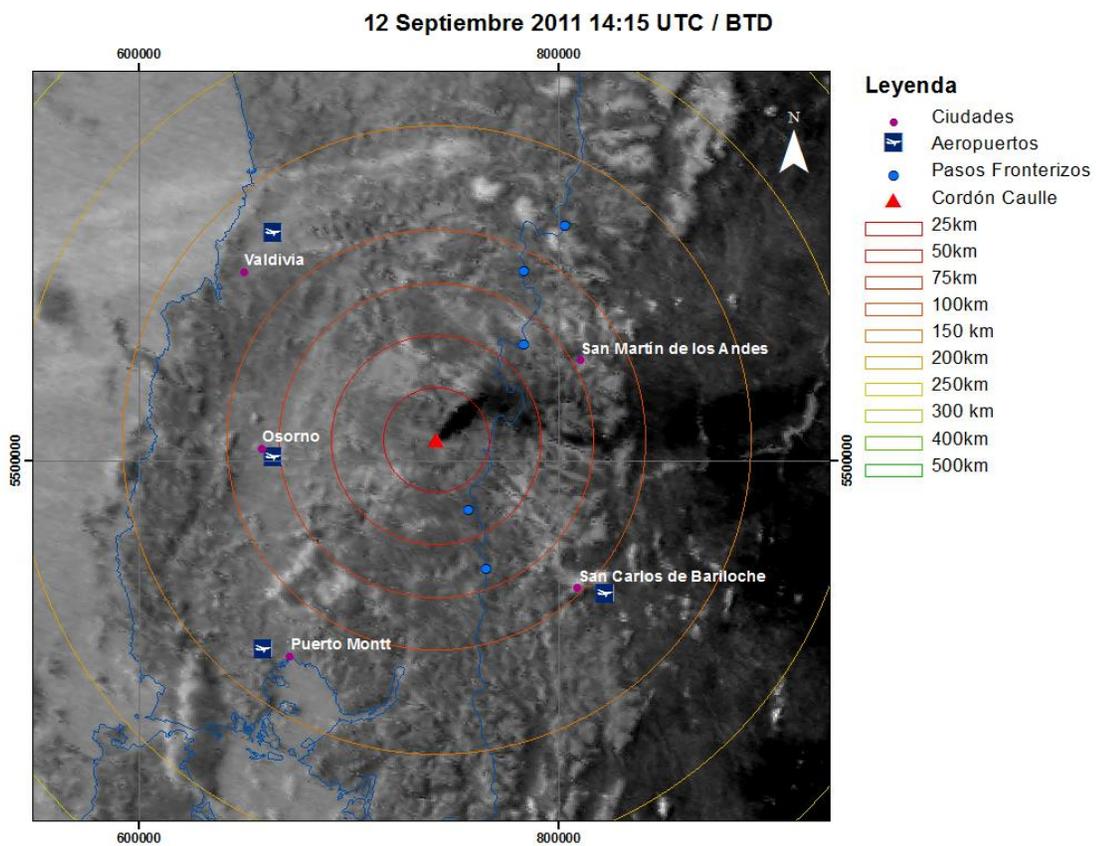


Figura 8.9 Apariencia de la columna día 12 Septiembre 2011, 14:15 UTC. BTD

8.2.3. Noviembre

El sexto mes de la erupción, correspondiente al mes de noviembre, se ve un aumento en la actividad sísmica, lo que se ve reflejado en un aumento de distancia recorrida por la ceniza. En la Figura 8.11 se observa los diferentes rangos de alcance de la columna, en donde aumenta considerablemente las distancias mayores con respecto al período anterior. El 27% de los casos analizados corresponden a columnas sobre los 400 km, distancia que se aplicó como cota superior en Septiembre. También es importante destacar que no se observaron penachos de menos de 75 km de extensión.

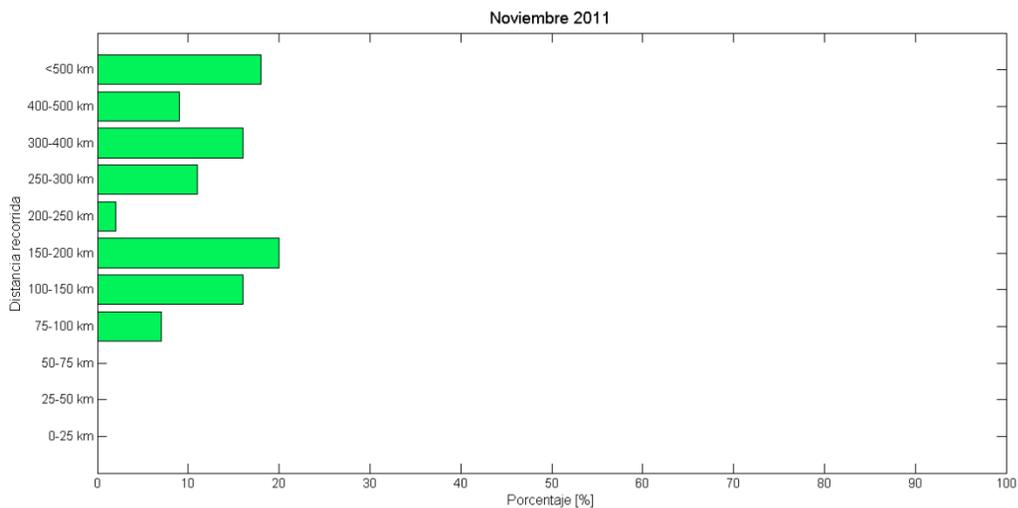


Figura 8.10 Distancia recorrida, Noviembre 2011

Con respecto a la forma, durante este período se observaron morfologías alargadas, pero gruesas, con penachos de menor densidad que los observados durante el inicio de la erupción, pero más concentrados con respecto a Septiembre. Se

determinó una relación de aspecto de 0.09 (ver Tabla 8.3), solo un poco mayor a la relación del mes de Junio.

Tabla 8.3 Relación de aspecto del penacho para el mes de Septiembre 2011

Día	Hora	Largo	Ancho	Ancho/Largo
4	14:30	382	42	0,11
5	15:15	108	8	0,07
11	18:50	82	10	0,12
12	15:20	580	29	0,05
14	15:10	174	14	0,08
16	14:55	234	30	0,13
17	6:15	366	45	0,12
26	6:10	348	42	0,12
29	14:25	592	34	0,06
30	15:10	277	16	0,06
Promedio				0,09

En ocasiones fue difícil determinar el límite entre el material en suspensión con respecto a la ceniza superficial. Como se puede apreciar en la Figura 8.11, la señal de ceniza en la parte distal del penacho es cortada por los lagos de la zona, por lo que se concluye que corresponde a ceniza superficial. Sin embargo, no es posible determinar el límite exacto en donde termina el penacho y en donde la señal corresponde a material en la superficie. En este caso en particular, el límite se fijó entre los 150-200 km, dado que cercano a los 150 km, la ceniza atraviesa un lago, y antes de los 200 km, se observa claramente los límites de un cuerpo de agua.

Para este período no se registra un aumento notorio de la altura de la columna, según los datos de altura por el método de la sombra (ver Tabla 13 en el Anexo) o los datos obtenidos mediante el método CTOP (ver Tabla 14 en el Anexo)

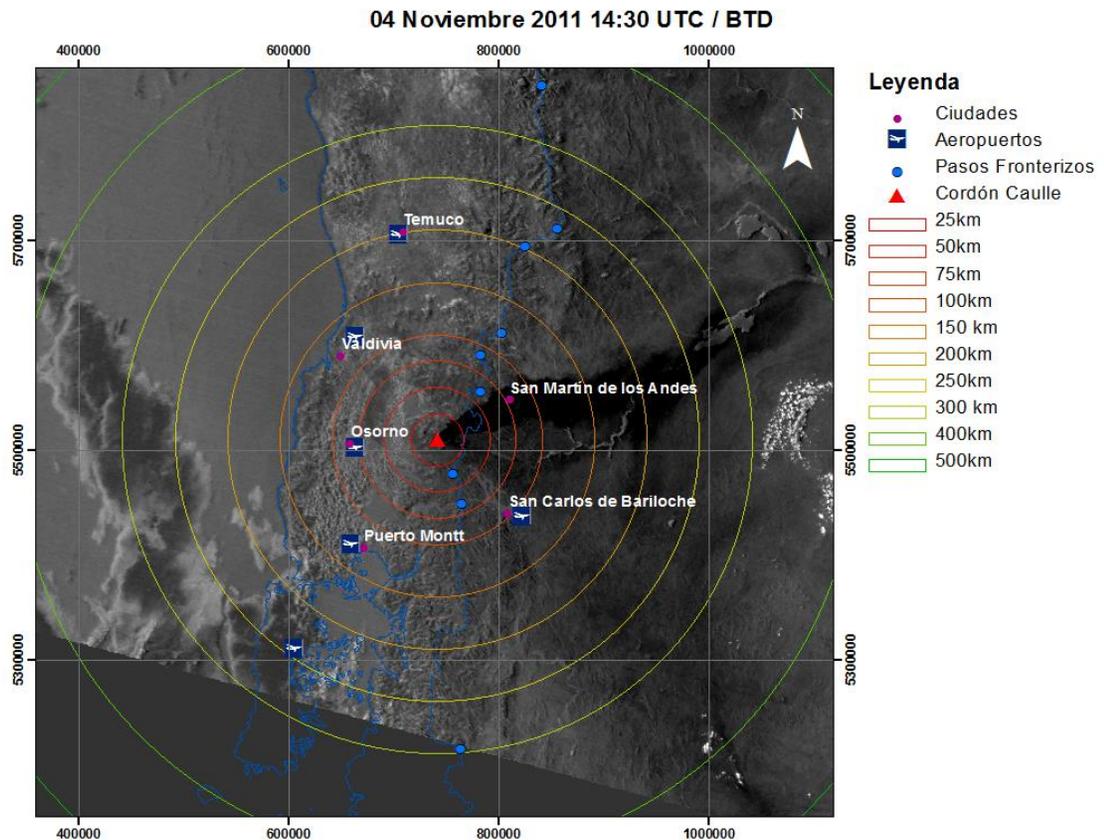


Figura 8.11 Apariencia de la columna día 04 Noviembre 2011, 14:30 UTC. BTD.

8.2.4. Marzo

El último mes estudiado de la erupción corresponde al mes de Marzo, en donde la actividad ha disminuido considerablemente, pues el 59% de las imágenes analizadas no superan los 25 km de largo (Figura 8.12), en muchas de las que ni siquiera se observa la señal de ceniza.

Las alturas medidas mediante el método CTOP para este período alcanzan los 3 km de altitud, pero en su mayoría la columna se eleva solo unos cientos de metros por sobre el cráter (ver Tabla 14 en los Anexos).

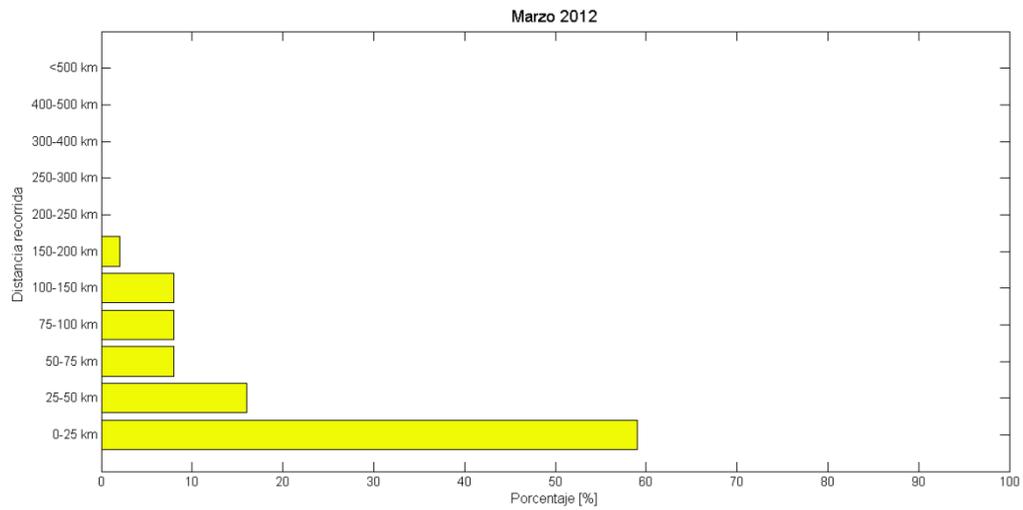


Figura 8.12 Distancia recorrida, Marzo 2012

Morfológicamente existen dos tipos de penachos, por un lado se tienen unos de forma alargada y extremadamente finos, de longitud media, casi imperceptible en colores reales, como se visualiza en la Figura 8.13, correspondiente al día 13 de Marzo.

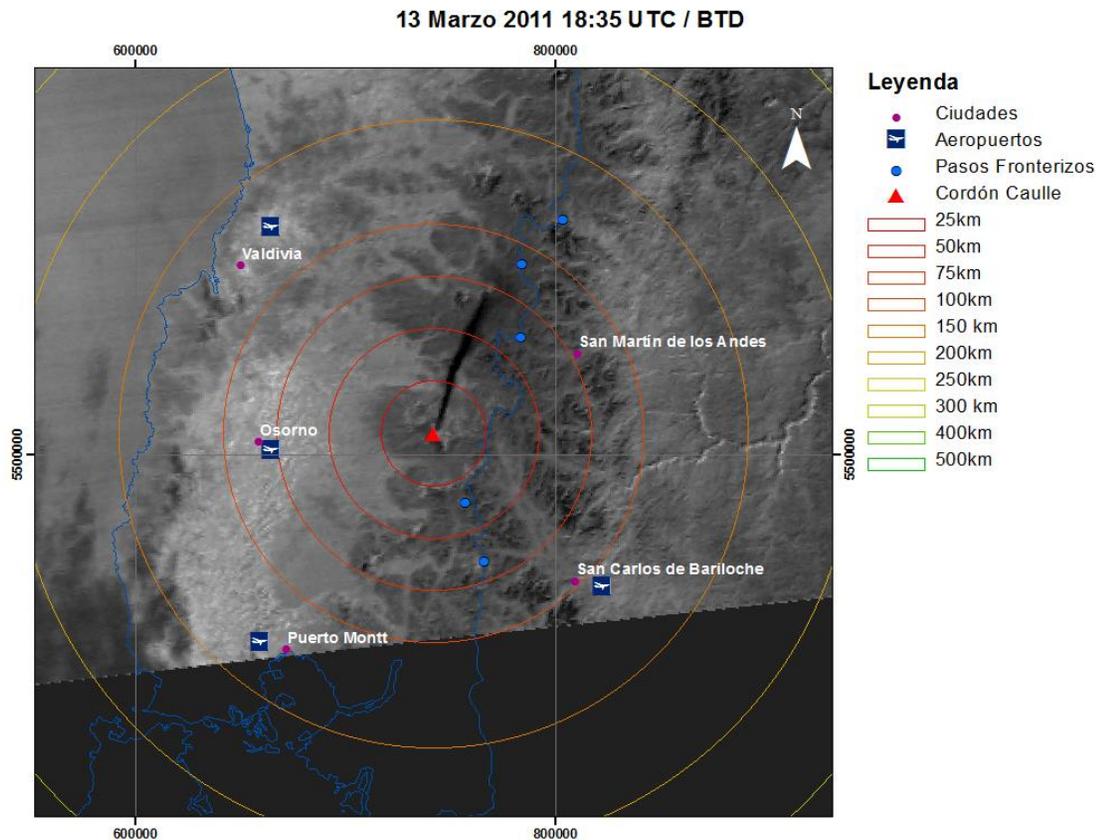


Figura 8.13 Apariencia de la columna día 13 Marzo 2012, 19:45 UTC. BTB

La otra morfología que se observa en este período es un penacho disperso, sin forma definida ni dirección preferencial de dispersión. No abarcan grandes extensiones de terreno, generalmente no superan los 25 km desde el volcán. Son únicamente visibles en el espectro infrarrojo, con el método BTB. En la Figura 8.14, correspondiente al día 8 de Marzo a las 18:15 UTC, se observa este tipo de morfología.

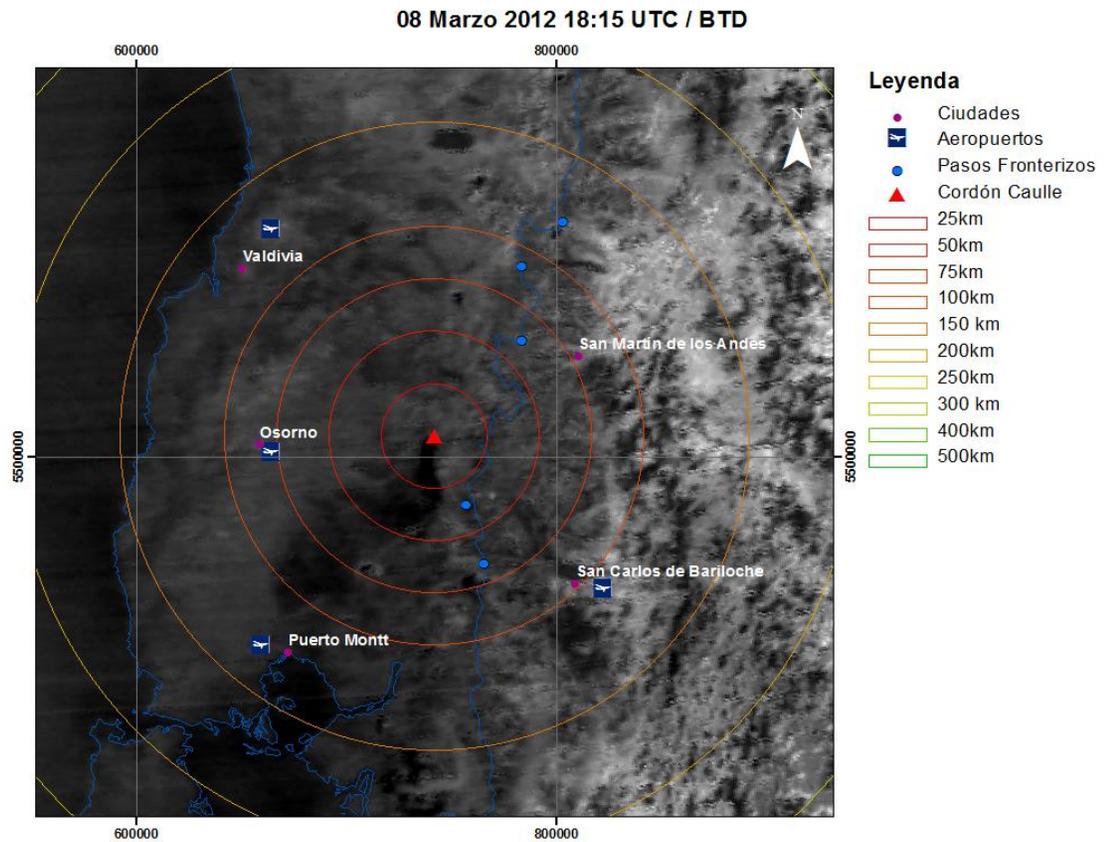


Figura 8.14 Apariencia de la columna día 08 Marzo 2012, 18:15 UTC. BTD.

Para este mes se calculó una relación de aspecto promedio de 0.38, siendo la mayor obtenida dentro de las fases calculadas. Cabe destacar que en ocasiones el ancho del penacho superaba el largo. En algunos casos no fue posible determinar el largo o ancho, por lo que no fueron considerados para este análisis.

Tabla 8.4 Relación de aspecto del penacho para el mes de Marzo 2012

Día	Hora	Largo	Ancho	Ancho/Largo
6	14:15	33	2	0,06
7	3:50	78	17	0,22
7	19:10	23	7	0,30

8	18:15	27	7	0,26
10	19:40	125	24	0,19
13	14:20	70	4	0,06
14	19:15	44	12	0,27
15	14:10	48	19	0,40
16	19:05	20	14	0,70
20	14:25	24	8	0,33
22	18:35	15	5	0,33
25	14:45	17	8	0,47
26	19:40	171	61	0,36
29	3:15	10	13	1,30
Promedio				0,38

8.3. Resumen de las distintas fases

Con el fin de determinar los diferentes efectos generados por el aumento o disminución de actividad volcánica se generó la siguiente Tabla resumen (Tabla 8.5)

Tabla 8.5 Tabla resumen de las fases claves

Mes	Actividad Sísmica	Distancia	Factor de Apariencia	Características generales del penacho
Junio 2011	Alta	74% sobre los 500 km	0.08	<ul style="list-style-type: none"> • Alargado, recto y delgado. • Abarca grandes distancias. • Densa y compacta. • Presenta inflexiones lejos de la fuente de emisión (<400km). • Altura disminuye de 18 km (inicio) a 3 km (final).
Septiembre 2011	Baja	29% entre 100-150 km. No supera los 400 km.	0.29	<ul style="list-style-type: none"> • Formas más dispersas y gruesas. • Abarca distancias acotadas. • Poco densas. Ocasionalmente la ceniza es solo visible en el infrarrojo. • Alturas entre 3-5 km.
Noviembre 2011	Alta	27% sobre los 400 km. Todos los casos mayores a 75 km.	0.09	<ul style="list-style-type: none"> • Formas más definidas, alargadas y gruesas. • Abarca grandes distancias. • Densidad media. • Alturas entre 3-5 km.
Marzo 2012	Baja	59% no supera los 25 km, No supera los 200 km,	0.38	<ul style="list-style-type: none"> • Formas indefinidas, anchas, dispersas. • Abarca escasa distancia. • Poco densas. Ocasionalmente la ceniza es solo visible en el infrarrojo. • Alturas entre 3-1.5 km.

9. CASOS DESTACADOS

Dentro de todos los días estudiados a lo largo de la erupción, existen algunos casos que merecen ser analizados en forma particular.

9.1. 20 Junio 2011

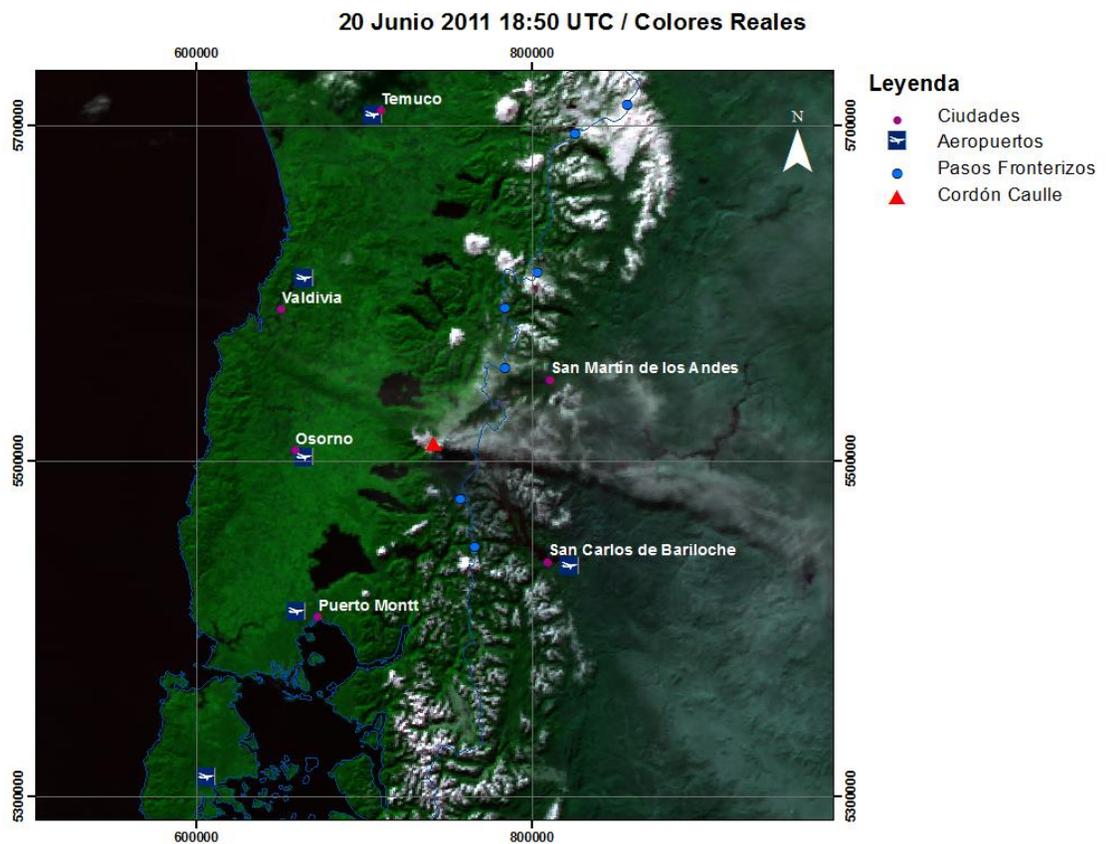


Figura 9.1 Imagen Aqua MODIS, 20 Junio 2011, 18:50 UTC. Colores Reales

El día 20 de Junio a las 18:50 UTC, se observó en la imagen Aqua MODIS (Figura 9.1) un fenómeno curioso en la dispersión de la columna, en donde se observan 3 direcciones distintas. La primera, en dirección E, corresponde a la más notoria de las tres, de aproximadamente 3500 m de altura según mediciones con el método CTOP. Una segunda en dirección NNE, algo más fina, corresponde a de altura más baja de 2800 metros aproximadamente. Finalmente, una en dirección NW, debido a que esta última es apenas visible en las imágenes satelitales MODIS no tratadas, las necesarias para utilizar en ENVI, se estimó su altura a través del método de la sombra en una imagen de mayor resolución, obteniendo una altura de 7500 m aproximadamente.

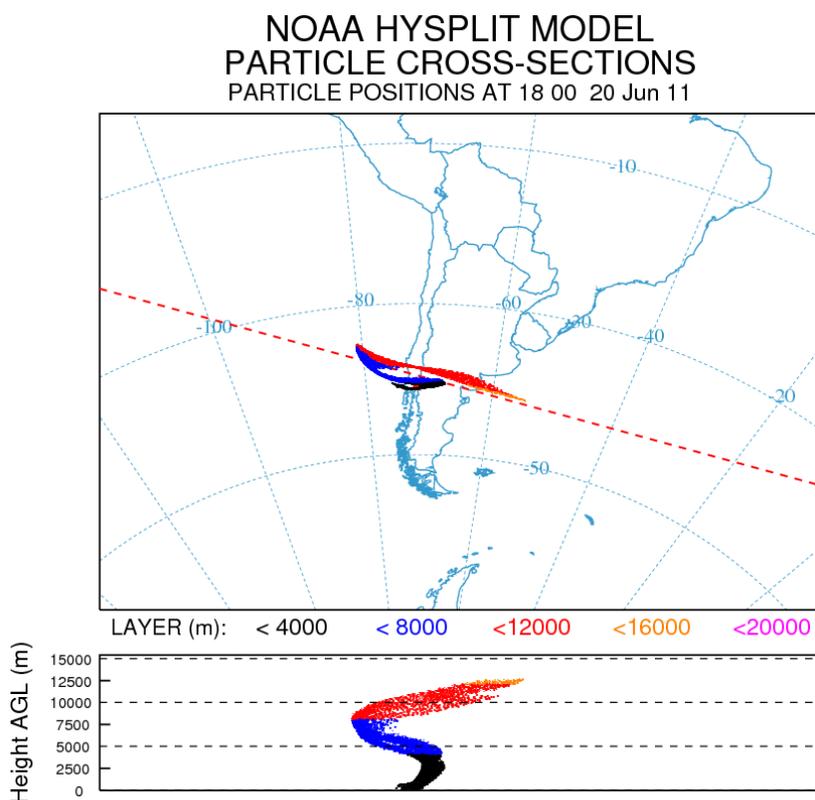


Figura 9.2 Trayectoria para las 18:00 UTC. La línea punteada marca la sección de perfil que aparece abajo.

Para analizar el efecto del viento en la columna para este caso en particular, se analizaron dos tipos distintos de gráficos trabajados desde la página de NOAA¹⁰, con el modelo de HYSPLIT (*Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory*) el cual calcula la trayectoria de las partículas mediante simulación de diversos parámetros atmosféricos. En la Figura 9.2 se observa la trayectoria de las partículas a las 18:00 UTC. En el perfil transversal, representado con línea punteada en el mapa, se observan los diferentes cambios de dirección de dispersión a las diferentes alturas.

En el gráfico es posible observar diferentes direcciones de dispersión, que coinciden con lo observado en la imagen satelital (Figura 9.1), en donde en color negro (0-4000 m) se observa claramente la dirección de dispersión hacia el E. En color azul (4000-8000 m) se observa un cambio de dirección hacia el W, que coincide con el penacho más alto. El penacho de dirección N, el de menor altura, no es posible observarlo en el modelo, lo que se le atribuye a un problema generando por la baja altura, cercana a la topografía. Los cambios de dirección se explican por diferentes direcciones de dispersión del viento a medida que aumenta la altura, por esta razón es posible ver más de una dirección preferente.

9.2. 18 Julio 2011

Se escogió este día en particular para estudiar los abruptos cambios en la dirección de dispersión del penacho durante la jornada.

¹⁰ <http://ready.arl.noaa.gov/hysplitashc-bin/dispatype.pl>

Se poseen 3 imágenes satelitales de este día (ver Tabla 9.1), en donde varía de dirección SW en la madrugada a dirección E en la tarde.

Tabla 9.1 Imágenes Satelitales 18 Julio 2011.

Día	Hora UTC	Satélite	Dirección de dispersión
18-jul	5:40	Aqua	135
	15:05	Terra	22
	19:15	Aqua	303

En la Figura 9.5 se observa la imagen satelital captada por el satélite Aqua a las 5:40 UTC (1:40 am hora local), en donde se ve una dirección preferencial de la columna hacia el SW, afectando principalmente a la ciudad de Puerto Montt. Al llegar al canal de Chacao, la columna sufre una inflexión en dirección W.

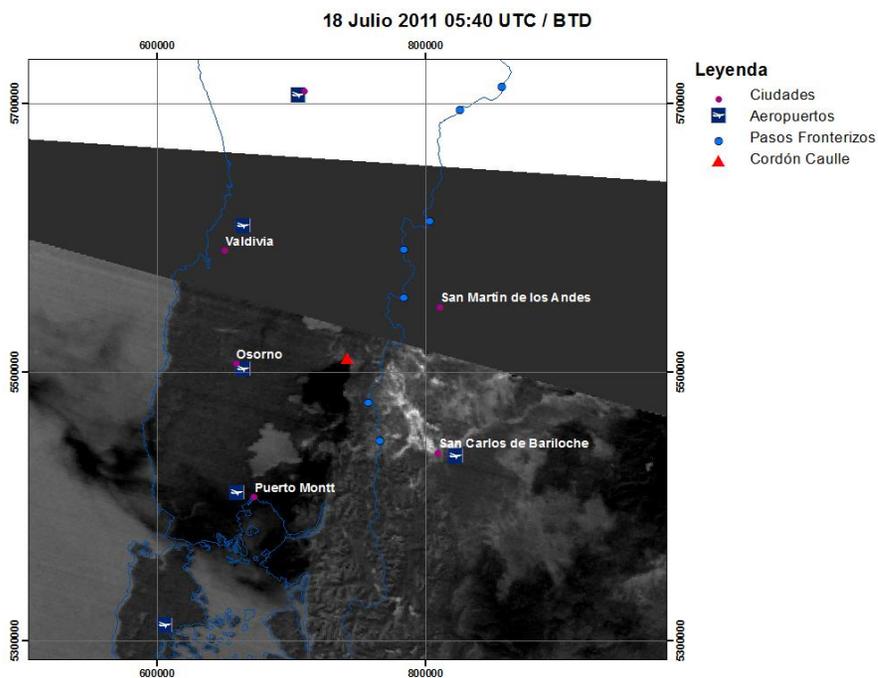


Figura 9.3 Imagen BTM del día 18 de Julio 2011, 05:40 UTC

En la imagen captada por el satélite Terra a las 15:05 UTC, 11:05 am hora local (Figura 9.6), se observa un cambio abrupto de dirección con respecto a la imagen anterior, captada 10 horas antes. El penacho posee una dirección de dispersión NW, con más de 100 grados de diferencia con respecto a la imagen nocturna.

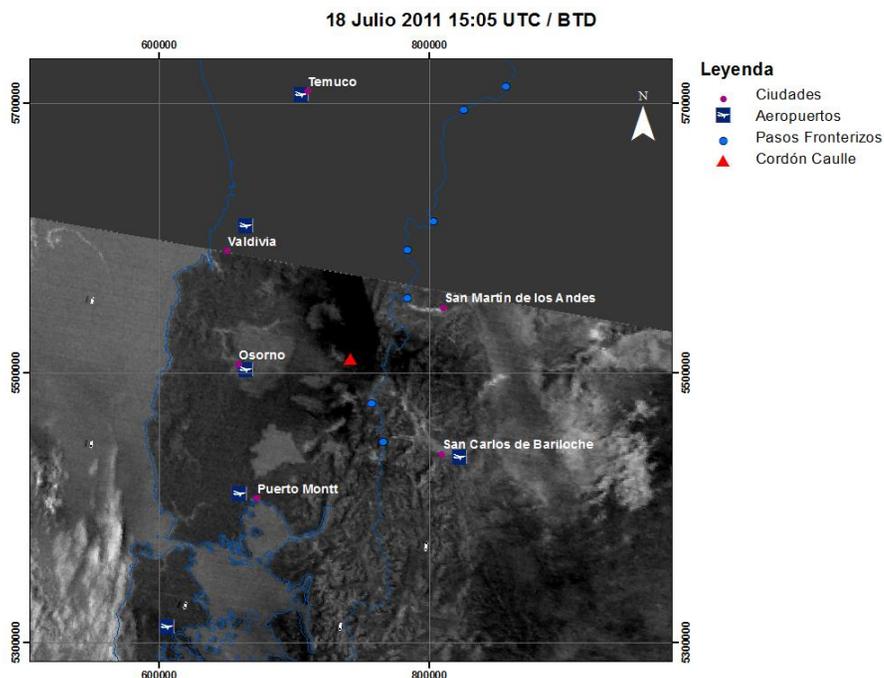


Figura 9.4 Imagen BTM del día 18 de Julio 2011, 15:05 UTC

En la Figura 9.7, captada a las 19:05 UTC (15:05 hora local), se visualiza el penacho con una dirección completamente opuesta a la MODIS de la madrugada, marcando una dirección NE/NEE, Afectando a los pasos fronterizos de Hua Hum, Carirriñe y Mamuil Malal.

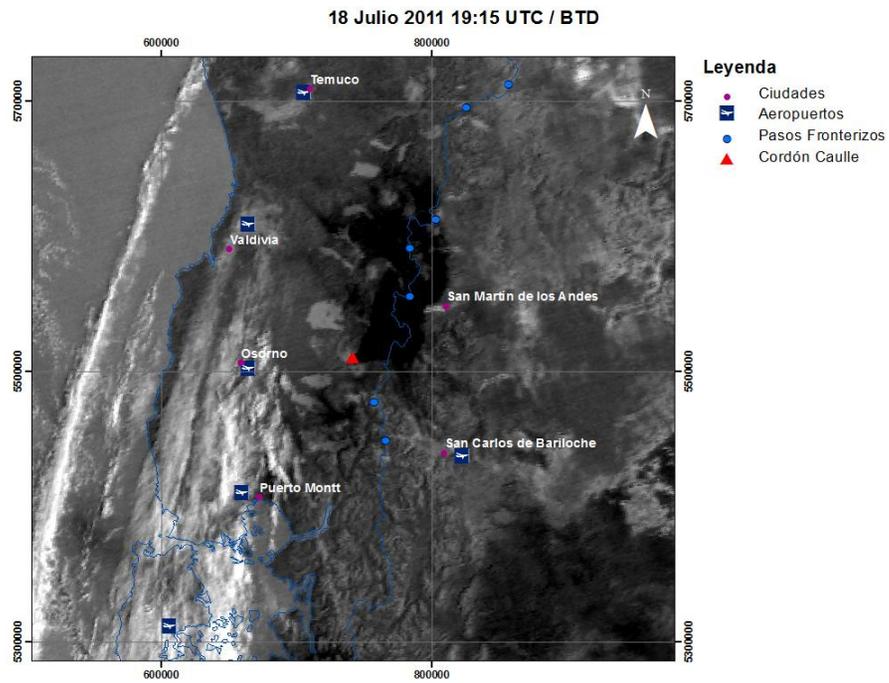


Figura 9.5 Imagen BTD del día 18 de Julio 2011, 19:15 UTC

Los comportamientos de esta naturaleza generan preocupación por la rapidez en cómo cambia la dirección de dispersión del penacho, donde en un lapso de 15 horas la dirección varió en casi 180°. Los vuelos comerciales son los más afectados con este comportamiento, porque se ven imposibilitados para operar en estas condiciones. Como se observa en la Tabla 9.2, de un total de 30 vuelos comerciales que aterrizaron o despegaban el día 18 de Julio 2011 en el aeropuerto Tepual, Puerto Montt, solo 2 vuelos operaron de forma normal (ambos de la aerolínea Sky) y un vuelo proveniente de Santiago, de la aerolínea LAN, llegó en la madrugada con 90 min de retraso; el resto de los vuelos fueron cancelados.

Tabla 9.2 Vuelos Aeropuerto Tepual, Puerto Montt para el día 18 de Julio 2011

Llegadas				Salidas			
Vuelo	Origen	Hora	Situación	Vuelo	Destino	Hora	Situación
LAN061	Santiago	1:50	Retrasado	LAN060	Santiago	6:45	Cancelado
LXP296	Punta Arenas	8:30	Cancelado	SKY084	Concepción-Santiago	9:00	Arribado
LXP281	Santiago	9:45	Cancelado	LXP296	Santiago	9:00	Cancelado
LAN075	Santiago	10:20	Cancelado	LXP281	Punta Arenas	10:1	Cancelado
SKY085	Santiago	11:00	Despegado	LAN075	Balmaceda	10:5	Cancelado
SKY025	Santiago	11:25	Cancelado	SKY025	Balmaceda-Punta	11:5	Cancelado
LXP257	Santiago	11:55	Cancelado	LAN074	Santiago	14:2	Cancelado
LAN074	Balmaceda	13:55	Cancelado	SKY108	Balmaceda	15:1	Cancelado
LXP273	Santiago	15:05	Cancelado	LXP256	Santiago	15:3	Cancelado
LXP280	Punta Arenas	15:46	Cancelado	LXP273	Balmaceda	15:3	Cancelado
LXP285	Santiago	16:35	Cancelado	LXP280	Santiago	16:1	Cancelado
SKY108	Balmaceda	18:00	Cancelado	LXP285	Punta Arenas	17:0	Cancelado
SKY028	Punta Arenas-	18:25	Cancelado	SKY028	Santiago	18:5	Cancelado
LXP272	Balmaceda	19:00	Cancelado	SKY092	Concepción-Santiago	18:5	Cancelado
LXP263	Santiago	21:15	Cancelado	LXP272	Santiago	19:3	Cancelado
SKY087	Santiago	21:20	Cancelado	LXP262	Santiago	21:4	Cancelado

Para este día se determinó una altura de 2430 m con el método de la sombra, por lo que se considerará la capa entre 0 a 3000 m dentro del mismo modelo visto anteriormente. En la Figura 9.8 se puede observar la diferentes concentraciones de ceniza cada 3 horas, partiendo a las 00:00 UTC del día 18 de Julio 2011, hasta el fin del mismo día. En la Figura es posible observar los diferentes cambios en la dirección de dispersión a lo largo del día, correspondiente a lo observado en las imágenes satelitales antes expuestas. En donde en el rango de tiempo entre las 3:00-6:00 UTC la dirección de dispersión se observa en dirección SW, similar a lo observado en la Figura 9.5, en el período entre 12:00-15:00 UTC se observa un cambio de dirección hacia el NW,

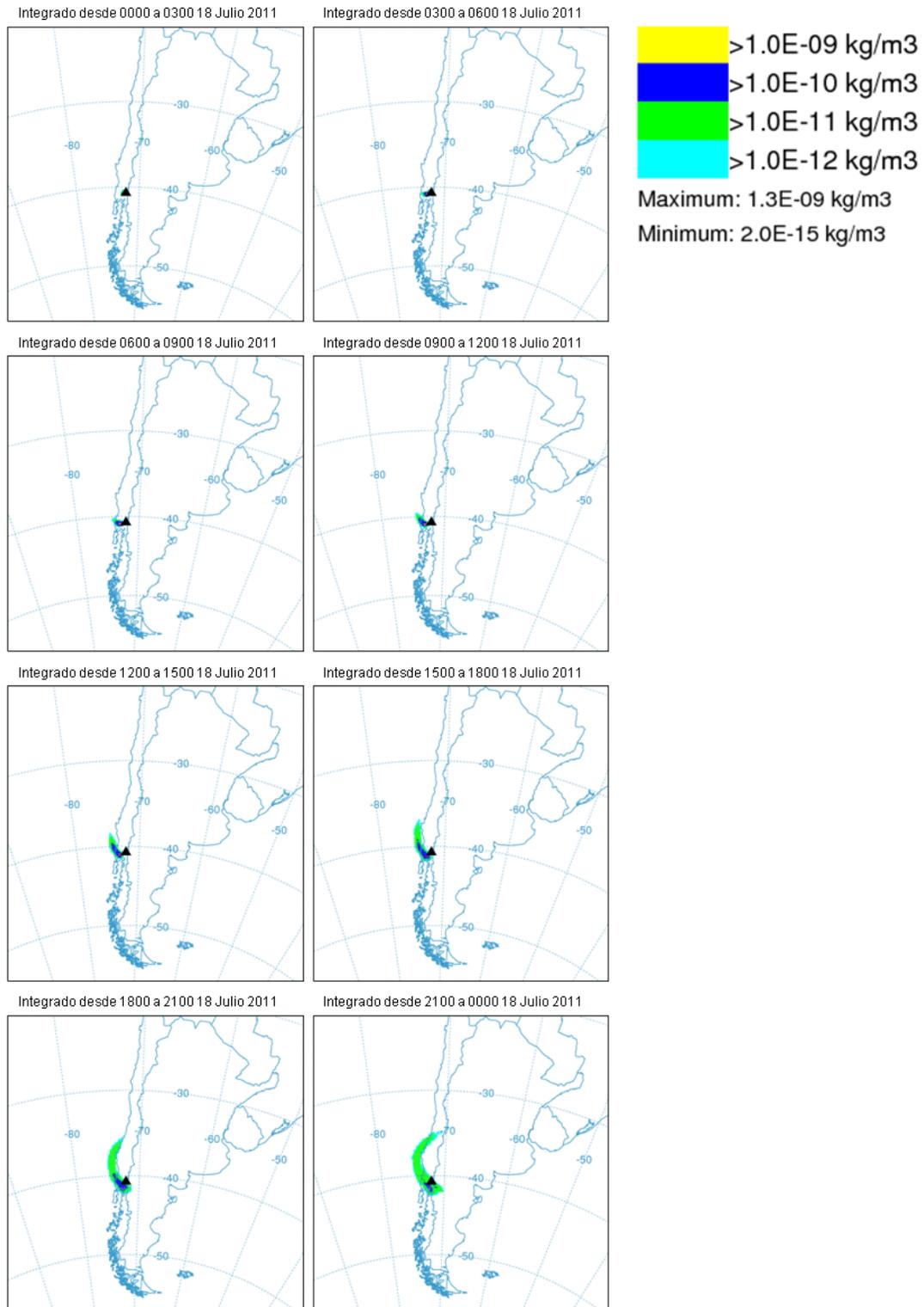


Figura 9.6 Diferentes concentraciones de ceniza volcánica cada 3 horas, del día 18 de Julio 2011

coincidentalmente con lo observado a las 15:05 UTC en la Figura 9.6. Finalmente en el rango de tiempo entre las 18:00-21:00 UTC se observa un cambio de dirección hacia el NE, observado en la Figura 9.7, a las 19:15 UTC. Este cambio de dirección hacia el NE aumenta al final del día, pero no existe imagen satelital para poder comparar en ese momento.

9.3.1 Abril 2012

En la Figura 9.9 en donde se observa el penacho del día 1 de Abril, a las 19:05 UTC, en donde solo es posible visualizarlo con el método BTM. En el campo visible no es posible distinguir el penacho.

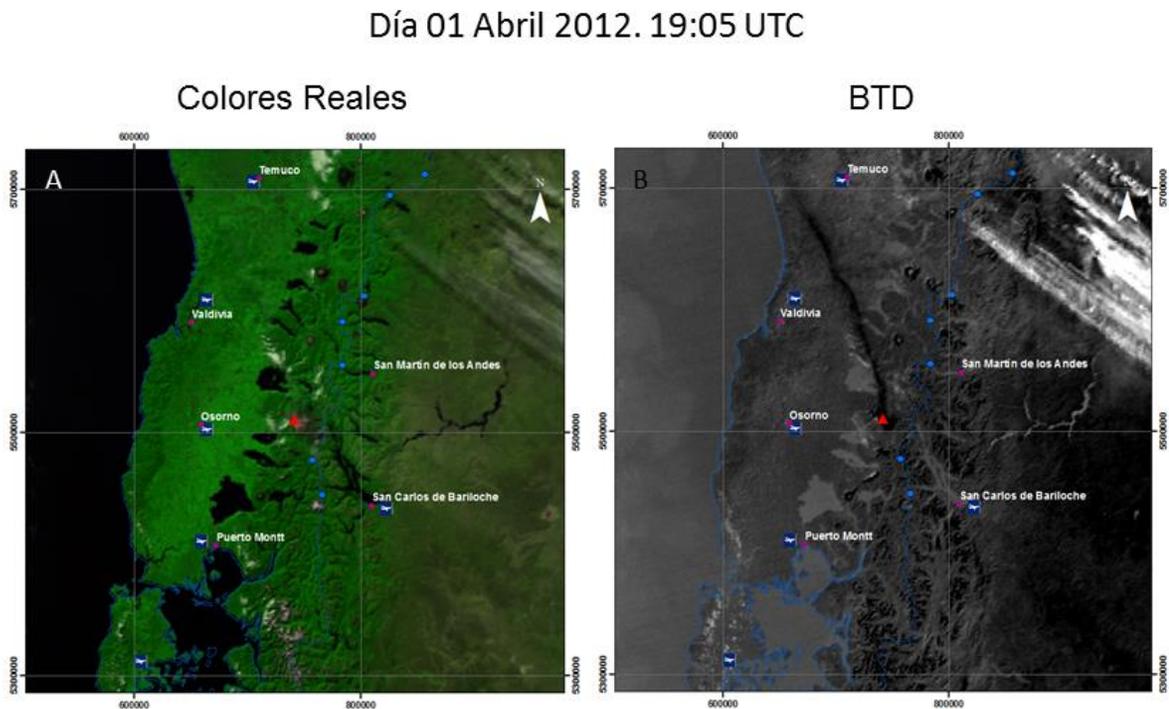


Figura 9.7 Apariencia de la columna día 01 Abril 2012, 19:05 UTC. A) Colores Reales. B) BTM.

Este día presenta un notorio incremento de actividad con respecto a todo el período, en el cual la actividad volcánica había decrecido considerablemente (ver capítulo evolución morfológica del penacho volcánico).

Con el fin de obtener información adicional que explique dicho aumento del alcance del penacho, se revisaron las imágenes de la Webcam de Futangue. En la serie de imágenes que se observan en la Figura 9.10, captadas el día 1 de Abril de 2012, entre las 12:24 a las 12:34 UTC, se observan explosiones como emisión de pulsos de ceniza. Este comportamiento se repite varias veces a lo largo del día (al menos 12 explosiones se observan el registro de las imágenes obtenidas del OVDAS).

Es este mismo pulso de ceniza el que se observa en las imágenes satelitales. Al ser eventos puntuales y no una emisión continua de ceniza explica la falta de densidad y la imposibilidad de distinguirla en la imagen satelital con colores reales. Con esto se descarta un aumento notorio de la actividad volcánica, pues corresponde solo a un fenómeno de baja energía.

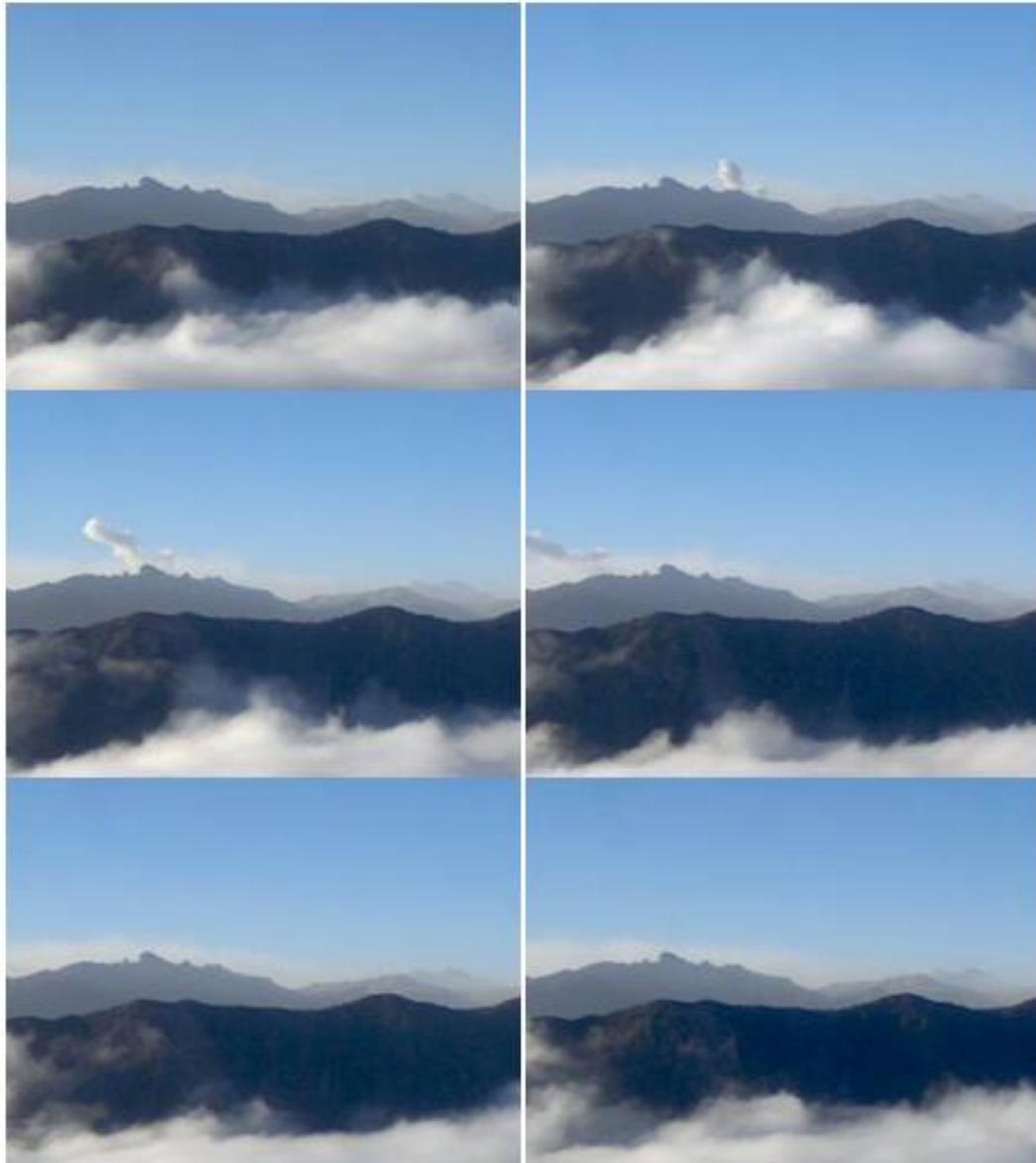


Figura 9.8 Secuencia de imágenes de la webcam de Futangue, el día 1 de Abril. Imágenes cada 2 min, desde 12:24 a 12:34 UTC.

10. DISCUSIONES

10.1. Factores Internos y Externos

El comportamiento del penacho volcánico es el resultado de la interacción de los factores internos del volcán (tasa de emisión, energía liberada, cantidad de volátiles, presión interna de la cámara magmática, etc....) y los factores externos (la velocidad y dirección del viento, presión atmosférica y temperatura ambiente). Con el fin de estimar que factores influyen en mayor medida en el comportamiento se estudiaron diversos casos. Como referente de la actividad interna fue considerado el registro sísmico. Para los factores internos se estimó indirectamente a partir del modelo propuesto por Degruyter y Bonadonna (2012).

10.1.1. Factores Externos o Exógenos

En el capítulo 6 se variaron diferentes factores externos que modifican el comportamiento del penacho volcánico, en particular, la altura.

Utilizando el modelo de Degruyter y Bonadonna (2012) se graficaron diversos parámetros para la velocidad del viento, presión atmosférica y temperatura ambiental. Asumiendo igual flujo de masa es posible comparar como afecta cada factor a la altura de la columna. En el caso de la presión atmosférica y temperatura, el cambio mostrado es irrelevante para la escala, por lo que no serán considerados como factores

determinantes en el comportamiento del penacho. La velocidad del viento en cambio afecta notoriamente la altura de la columna, pues en los casos con vientos de menor velocidad el penacho alcanza mayor altura con respecto a los casos de mayor velocidad del viento, con igual flujo de masa. Esta diferencia se vuelve más notoria a medida que la columna posee mayor flujo de masa.

Otro factor determinante en el comportamiento del penacho es la dirección del viento, la cual se ve reflejada en la dirección de dispersión del penacho (ver capítulo 7, Figuras 7.4 y 7.5).

En esas Figuras, se observa una buena correlación entre la dirección de dispersión y la dirección del viento para el modelo a 4 km sobre el nivel del mar. Con esto es posible afirmar que la dirección del viento influye directamente en la dirección de dispersión del penacho. Es importante tener en cuenta que los valores medidos no son necesariamente bien distribuidos en el tiempo o de manera continua, sino según la disponibilidad de imágenes.

10.1.2. Factores Internos o Endógenos

Con el fin de estudiar el comportamiento del penacho volcánico ante cambios internos, se estudiaron diferentes casos considerando el registro sísmico como referente. En el capítulo 8 se caracterizó cuatro fases marcadas dentro de la erupción.

La fase inicial, correspondiente al mes de Junio, se caracterizó por un registro sísmico de gran intensidad inicial, decayendo con el transcurso del mes. Se observó durante esta etapa inicial penachos de gran extensión, finos y densos. Esta fase contrasta con la de Septiembre, la que corresponde a una de baja actividad sísmica

según el registro. En este período se observa un penacho translúcido, más grueso y de escasa extensión. Con ello se puede estimar que la dinámica del penacho no solo se ve afectada en cuanto a altura con un aumento de actividad volcánica, sino que la forma y extensión también se ve alterada.

Coincidentemente, en la tercera fase, correspondiente a Noviembre, al incrementar la actividad volcánica aumentó la extensión del penacho. Comparando las fases de Septiembre y Noviembre no se observa una gran diferencia en cuanto a alturas medidas (ver Tabla 14 en el Anexo), la velocidad del viento en ambos meses es relativamente similar, ver Figura 10.1, por lo que no sería un factor determinante en la extensión.

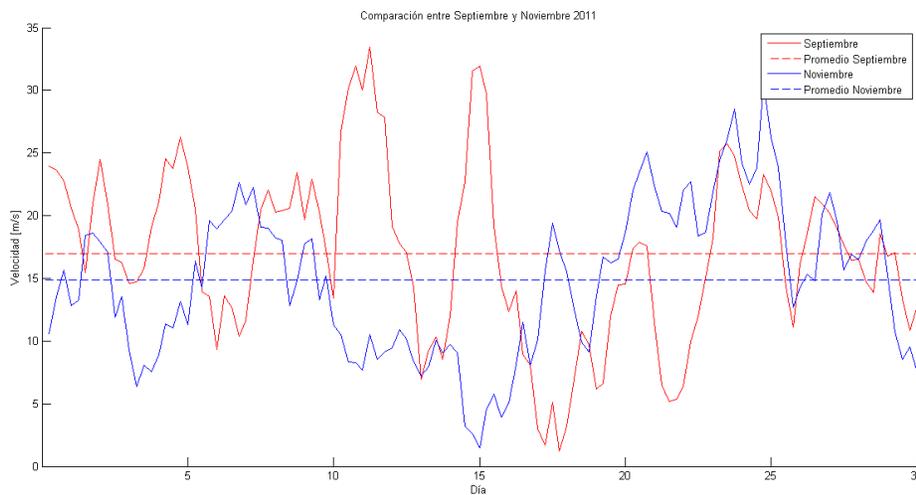


Figura 10.1 Comparación de vientos entre los meses de Septiembre 2011 y Noviembre 2011.

Analizando la última fase de la erupción, fase terminal, correspondiente a Marzo 2012, la extensión de la columna es casi nula, en donde el 59% de los casos no supera

los 25 km desde el cráter. Además en esta etapa, cuesta distinguir una dirección preferente y usualmente se observa como una capa translúcida de ceniza.

Dado estos parámetros, es posible establecer una conexión con la actividad sísmica, indirectamente relacionada con la emisión, y la extensión del penacho. Donde al aumentar la actividad sísmica, la extensión alcanzada por la ceniza es mayor. Así mismo, la densidad de material piroclástico observado disminuye a medida que la actividad decrece.

10.1.3. Línea de tiempo de la erupción

Para obtener una visión más general de toda la erupción se realizó una figura resumen de todo el período (Figura 10.2). En ella se observan las distintas mediciones de altura realizadas en imágenes satelitales, con el método CTP y método de la sombra; el registro sísmico; flujo de masa (Q), según la metodología de Degruyter y Bonadonna (2012); ciudades afectadas por la caída de ceniza y extensión promedio mensual del penacho.

Comparando el registro sísmico con la extensión del penacho, se observa una clara tendencia a aumentar la extensión a medida que la actividad sísmica aumenta. A su vez cuando presenta baja actividad sísmica, la extensión decae notoriamente, como se observa en la etapa final, en donde el penacho alcanza escasos km y el registro sísmico es casi nulo.

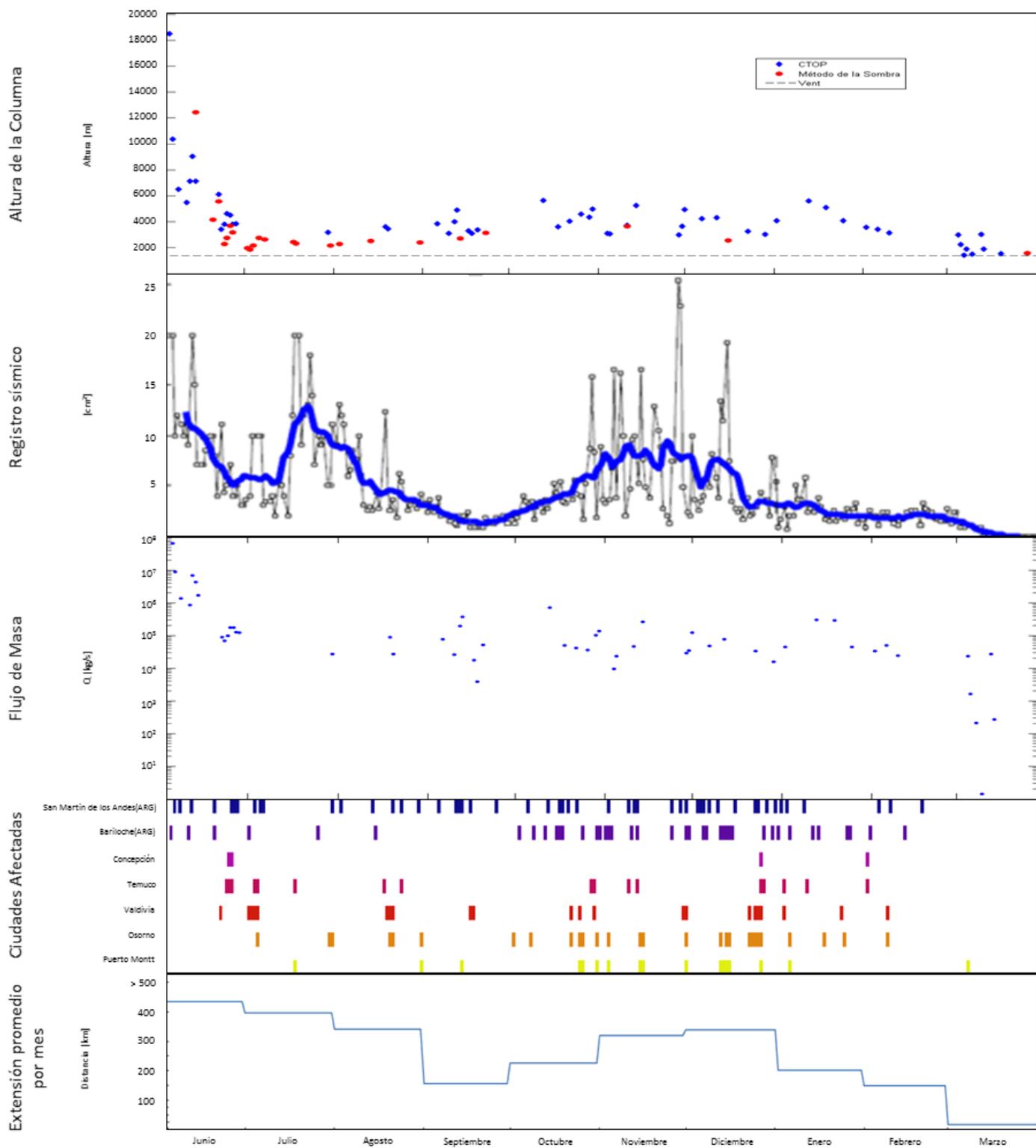


Figura 10.2 Línea de tiempo de toda le erupción. Altura de la columna, Registro sísmico, Flujo de masa, Ciudades afectadas y Extensión promedio del penacho.

La ciudad de San Martín de los Andes, en Argentina se ve claramente más afectada durante todo el período eruptivo. En el territorio chileno, la ciudad de Osorno se ve afectada homogéneamente durante la erupción, aunque en menor medida con respecto a San Martín de los Andes.

La altura del penacho no responde al registro sísmico como se pensó que lo haría antes del estudio. Al inicio de la erupción, correspondiente a la fase de columna fuerte, se registraron mediciones de altura de gran magnitud, y a medida que cambia a fase de columna débil, se estabilizó en torno a los 2-4 km de altura.

El flujo de masa está ligado directamente con la altura de la columna, en donde se obtienen valores iniciales del orden de 10^7 - 10^8 [kg/s]. En la fase columna débil el flujo de masa se encuentra estable en torno a los 10^3 [kg/s]. Al finalizar la erupción, este es cercano a 0.

10.2. Detección de Ceniza

La técnica de detección de ceniza BTM para imágenes MODIS permite reconocer zonas en donde la ceniza se encuentra presente en la atmósfera. Sin embargo, es necesario tener en cuenta las características técnicas de las imágenes, en donde la resolución máxima de datos corresponde a un pixel de un kilómetro cuadrado sobre el nadir, el cual disminuye su calidad hacia los bordes laterales de la imagen. Es por ello que la información entregada puede sobreestimar las regiones con presencia de ceniza. Existen además otros factores que pueden alterar la detección de ceniza como suelos ricos en cuarzo, como por ejemplo arenas del desierto, superficie muy frías o cubiertas

de hielo (Picchiani et al., 2011). Por otro lado, no se encontró ningún estudio sobre el límite inferior de detección de ceniza.

Según la Unión Europea y la Organización Internacional de Aeronáutica Civil, se consideran diferentes rangos según la concentración de ceniza volcánica: las zonas sobre $4000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ son consideradas inseguras para vuelos (formalmente llamadas "*no-fly zones*"); áreas con contaminación moderada entre 2000 y $4000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ son zonas de limitado acceso ("*limited time zone*"); áreas con baja contaminación $200\text{-}2000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ son consideradas zonas de bajo riesgo aéreo ("*enhanced procedures zones*"). Es por ello que es necesario conocer la concentración de ceniza volcánica para determinar las zonas seguras para vuelos.

Durante el período de erupción del Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle solamente en el aeropuerto Tepual (Puerto Montt) se cancelaron 379 vuelos (ver Tabla 10.1, mayor detalle en la Tabla 15 en los Anexos), además de numerosos vuelos en Argentina, Uruguay y Brasil, además de zonas más alejadas como Sudáfrica, Nueva Zelanda y Australia. Esto generó una gran pérdida en la economía del rubro, afectando directamente la conectividad de la zona y libre movilidad de los pasajeros. Si bien no se presentaron accidentes aéreos debido a la erupción, es justo cuestionarse si todos los vuelos cancelados son justificados. Para resolver este cuestionamiento es preciso calcular las concentraciones de ceniza volcánica para los días con mayor número de cancelaciones y comparar con los rangos establecidos por la Organización Internacional de Aeronáutica Civil.

Tabla 10.1 Resumen mensual de cancelación de vuelos del aeropuerto Tepual, Puerto Montt

Mes	Total Vuelos	Operados Normalmente	Cancelados
Junio 2011	751	706	45
Julio 2011	947	885	62
Agosto 2011	931	907	24
Septiembre 2011	943	939	4
Octubre 2011	1025	939	86
Noviembre 2011	1187	1119	68
Diciembre 2011	1231	1143	88
Enero 2012	1354	1353	1
Febrero 2012	1276	1276	0
Marzo 2012	1020	1019	1
Total	10665	10286	379

A pesar de todos los cuestionamientos que se puedan realizar al método BTM, este constituye una herramienta importante para la detección de ceniza. Además permite una cuantificación de las zonas afectadas por la caída de ceniza, siendo no necesariamente áreas pobladas, sino que también lugares de protección ambiental. Cabe destacar la rapidez de obtención de resultados, pues las imágenes satelitales MODIS son posibles de obtener con un desfase de una cuantas horas y la aplicación del método BTM solo tarda unos minutos.

10.3. Modelos de Viento

Los modelos de viento son el resultado de una integración de varios radiosondeos, siendo el más cercano a la zona de estudio el de Puerto Montt. Es importante tener en cuenta que este modelo integra y ajusta los valores para un modelo global y las variaciones locales no siempre se ven representadas en estos. Además, por

la ubicación en que se encuentra Chile, no es posible obtener datos de radiosondeos al Oeste, ya que se encuentra el océano Pacífico, por lo tanto no es posible una integración completa de los datos en esta zona. El relieve afecta el comportamiento de forma local en zonas de baja atmósfera, por lo que es preciso tenerlo en consideración para el estudio de penachos de altura inferiores a las cotas mayores de la cordillera en esta zona. Por lo tanto es necesario escoger un modelo que considere la topografía especialmente en los casos en donde la altura de la columna no supere las cotas superiores del relieve colindante. En particular, para este estudio se utilizó el modelo de Reanalysis, descartando el modelo GDAS implementado inicialmente debido a que presentaba imprecisiones a baja altura.

10.4. Predicción

El objetivo más importante del estudio de una erupción volcánica es la predicción del comportamiento a futuro del mismo volcán, de este modo es posible establecer un plan de acción en caso de emergencia.

La predicción de la dispersión de la ceniza es esencial para prevenir localidades afectadas y accidentes aéreos. Aplicando un modelo que integre bien los factores que alteran la dirección y velocidad del viento, es posible establecer una buena predicción de este comportamiento.

10.5. Trabajos Futuros

Considerando posibles líneas de investigación para continuar el estudio, se pensaron diversas metodologías, que serían útiles para complementar este trabajo, en donde las mediciones de SO₂ podrían advertir una posible activación de un volcán antes de que esto se manifieste. Las mediciones de concentración de ceniza podría definir de manera más precisa las zonas de riesgo para la aviación y evitar cancelaciones innecesarias, aminorando las pérdidas económicas.

10.5.1. SO₂

La concentración del gas SO₂ emitido por los volcanes es un buen indicador de la actividad volcánica. Además este gas impacta sobre la composición atmosférica generando lluvias ácidas y formación de aerosoles.

La percepción remota, como las imágenes satelitales MODIS, es una de las formas de estimar las emanaciones de este gas volcánico. El SO₂ posee una huella distintiva de absorción en UV (~10-400 nm) y en el IR (~750-100µm) (Thomas & Watson 2009).

10.5.1.1. Métodos Infrarrojos (IR)

10.5.1.1.1. 7.3 µm

El modelo radioactivo de transferencia desarrollado por Prata et al. (2003) fue creado originalmente para HIRS/2 (High Resolution Infrared Radiation Sounder) para luego ser adaptado para otros sensores (por ejemplo Watson et al 2004). El modelo se basa básicamente en la siguiente fórmula:

$$I - I_{\alpha} = (1 - \tau_s)(B_s - I_{\alpha}) \quad (10.1)$$

En donde I es la medición de radianza en $7.3 \mu\text{m}$, I_{α} es la radianza para una atmósfera libre de SO_2 , τ_s es la transmitancia de SO_2 , B_s es la radianza de Planck para una nube a temperatura T_s (Prata et al. 2003). Luego se calcula la diferencia de temperatura entre lo medido y la atmosfera libre de SO_2 :

$$\Delta T = \alpha + \beta(1 - \tau_s) \quad (10.2)$$

Donde α y β son parámetros atmosféricos estimados según Prata et al (2003).

Para este método se requiere el uso de otros dos canales 6.7 y $11.1 \mu\text{m}$, La radianza entre estas bandas es utilizada para calcular la zona sin SO_2 . Un limitante importante de este método es que en los canales 6.7 y $7.3 \mu\text{m}$ la absorción de vapor de agua, puede alterar la detección del dióxido de azufre.

10.5.1.1.2. $8.3 \mu\text{m}$

Este método fue creado originalmente para LOW-TRAN (*Low resolution atmospheric transmission*) por Realmuto et al (1994). En general la expresión utilizada es:

$$L_s = \{\varepsilon_g B(T_g) + (1 - \varepsilon_g)L_d\}t_a + L_u \quad (10.3)$$

Este método está limitado cuando existen algunas especies que causan interferencia como la ceniza volcánica y aerosoles sulfurosos.

Una adaptación de este método fue empleado en el trabajo de Jiménez Escalona, en el volcán de Fuego de Colima. Utilizó el programa MAP_SO2 desarrollado por Realmuto et al (1994) para determinar las concentraciones de SO₂. Los resultados precisan la correcta caracterización de:

- Superficie bajo el penacho.
- Características locales de la atmósfera.
- Geometría del penacho (altura y espesor).

También es necesario calibrar el programa designando una región libre de SO₂ utilizado como referencia, calculando la emisividad y temperatura de superficie. Se obtiene la temperatura aparente de la superficie de una atmósfera con presencia de este gas, asumiendo una emisividad de fondo idéntica a la zona sin SO₂. La diferencia de temperaturas obtenidas para ambos casos, se relaciona directamente con la concentración de SO₂.

Se debe tener en cuenta al momento de interpretar los datos, que existen otras especies radiativamente activas, como la ceniza volcánica u otros aerosoles, que pueden interferir con los resultados. Además la heterogeneidad de la atmósfera y vagas caracterizaciones de la geometría del penacho pueden causar sobre estimaciones del valor real (Jiménez Escalona et al sin publicar).

10.5.1.2. Métodos Ultra Violeta (UV)

Los sensores TOMS (*Total Ozone Mapping Spectrometer*) y OMI (*Ozone Monitoring Instrument*) son instrumentos capaces de cuantificar el SO₂, gracias a la diferencia de absorción del gas y el ozono en las longitudes de ondas entre 300 y 350 nm. Simplemente se emplea un modelo lineal asumiendo que la radiación solar es atenuada por la absorción de diferentes especies de acuerdo a la ley de Berr-Lambert:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[-\tau_a(\lambda)] \quad (10.4)$$

10.5.1.3. Microondas

Mediante el algoritmo MLS (*Microwave Limb Sounder*) se puede determinar varias especies presentes en la atmósfera, incluido el SO₂. Esta metodología consiste en un modelo directo y uno inverso.

10.5.2. Estimación de masa de ceniza

La masa de ceniza es calculada a través de una fórmula (11.5) aplicada a cada pixel de la imagen satelital. En donde p es el pixel, A_p corresponde al área del pixel, ρ es la densidad de la ceniza, Q_{ext} corresponde a la eficiencia de extinción, r_e radio efectivo y τ corresponde a la profundidad óptica de los aerosoles.

$$m_p = \frac{4}{3} \rho A_p \frac{r_e \tau}{Q_{ext}} \quad (10.5)$$

La masa total es estimada como la sumatoria de la masa de los pixeles (Wen & Rose, 1994).

Para obtener los resultados de masa, es necesario conocer los perfiles atmosféricos (presión, temperatura y humedad), características de la superficie (temperatura y emisividad), geometría del penacho (altitud y espesor del penacho) y propiedades ópticas de la ceniza. Una vez obtenido estos datos se simula mediante el modelo TOA (*Top of Atmosphere*). (Corradini et al 2010).

11. CONCLUSIONES

La altura medida a lo largo de la erupción varió desde los 18 km al inicio, a un promedio entre 2-4 km en el resto del período.

La altura del penacho en columnas eruptivas débiles, como es el caso de estudio, es afectada principalmente por la acción del viento. Las velocidades menores permiten que la columna alcance mayores altitudes. No se encontró indicios de que la actividad interna del volcán influyera directamente sobre la altura.

La dirección de dispersión de ceniza también responde al viento, y se correlaciona bastante bien con la información de vientos obtenidos de base de datos.

La forma del penacho está estrechamente ligada a la actividad interna del volcán, en donde el grosor relativo, calculado como ancho/largo, es mayor a medida que la actividad sísmica disminuye. Se obtuvieron valores entre 0.2-1.3 en casos de baja actividad, es decir que se reportaron casos donde el ancho del penacho era mayor al largo; y 0.02-0.1 en casos de alta actividad, es decir que el penacho al menos mide de largo al menos 10 veces más que el ancho. En los casos en donde hay mayor actividad sísmica, la extensión de la ceniza es mucho mayor, superando los 2000 km durante los primeros días de la erupción.

Se estimó un flujo de masa de 10^8 [kg/s] al inicio de la erupción, decayendo rápidamente a valores de 10^3 [kg/s], el cual se mantuvo en torno a ese valor por casi la totalidad de la erupción.

Las imágenes satelitales MODIS constituyen un instrumento muy útil para la detección de ceniza, y son una herramienta muy valiosa para el estudio de erupciones tanto pasadas como presentes.

En este trabajo si bien no fue posible establecer un límite exacto de peligro para la aeronavegación, por la falta de información de concentración de ceniza, sin embargo, es posible establecer un rango aproximado de zonas más vulnerables.

12. BIBLIOGRAFÍA

Baxter, P.J. 1999. Impacts of eruption on human health. En: Sigurdsson, H., Houghton, B., Rymer, H., Stix, J., & McNutt, S. Encyclopedia of volcanoes. Pp.1035-1043.

Baxter, P.J., Bonadonna, C., Dupree, R., Hards, V.L., Kohn, S.C., Murphy, M.D., Nichols, A., Nicholson, R.A., Norton, G., Searl, A., Sparks, R.S.J., Vickers, B.P. 1999. Science 283: 1142-1144.

Bebbington, M., Cronin, S.J., Chapman, I., Turner, M.B. 2008. Quantifying volcanic ash fall hazard to electricity infrastructure. Journal of Volcanology and Geothermal Research 177: 1055-1062.

Bertin, D.; Amigo, A.; Delgado, R. 2012. Erupción del Cordón Caulle 2011-2012: Análisis de dispersión bajo columna eruptiva débil. XIII Congreso Geológico Chileno: T4-P22.

Bonadonna, C., & Phillips, J. C. 2003. Sedimentation from strong volcanic plumes. Journal of geophysical research 108 (B7).

Burden, R. E., Phillips, J. C., & Hincks, T. K. 2011. Estimating volcanic plume heights from depositional clast size. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 116 (B11).

Bursik, M. 2001. Effect of wind on the rise height of volcanic plumes. *Geophysical Research Letters* 28 (18): 3621-3624.

Campos, A, Moreno, H., Muñoz, J., Antinao, J. L., Clayton, K., Martin, M. 1993. Área Futrono-Lago Ranco, región de Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapas Geológicos No.8, escala 1:1000000. Santiago.

Casadevall, T. J. 1994. The 1989–1990 eruption of Redoubt Volcano, Alaska: impacts on aircraft operations. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 62(1), 301-316.

Carey, S., Bursik, M. 1999. Volcanic Plumes. En: Sigurdsson, H., Houghton, B., Rymer, H., Stix, J., & McNutt, S. *Encyclopedia of volcanoes*. Pp.1035-1043.

Charrier, R., Pinto, L., Rodríguez, M.P. 2007. Andean Tectonostratigraphy. En: Moreno, R. y Gibbons, W. *The Geology of Chile*. pp. 21-114.

Cioni, R., Marianelli, P., Santacroce, R., Sbrana, A. 1999. Plinian and Subplinian eruptions. En: Sigurdsson, H., Houghton, B., Rymer, H., Stix, J., & McNutt, S. *Encyclopedia of volcanoes*. Pp.1035-1043.

Committee on commerce, science, and transportation United States Senate. 2006. *Volcanic Hazards-Impacts on Aviation*.

Corradini, S., Merucci, L., Prata, A.J., Piscini, A. 2010. Volcanic ash and SO₂ in the 2008 Kasatochi eruption: Retrievals comparison from different IR satellite sensor. *Journal of Geophysical Research* 115.

Dacre, H.F., Grant, A.L.M., Hogan, R.J., Belcher, S.E., Thomson, D.J., Devenish, B.J., Marengo, F., Hort, M.C., Haywood, J.M., Ansmann, A., Mattis, I., Clarisse, L. 2011. Evaluating the structure and magnitude of the ash plume during the initial phase of the 2010 Eyjafjallajökull eruption using lidar observations and NAME simulations. *Journal of Geophysical Research* 116.

Degruyter, W., & Bonadonna, C. 2012. Improving on mass flow rate estimates of volcanic eruptions. *Geophysical Research Letters*, 39(16).

Devenish, B.J., Francis, P.N., Johnson, B.T., Sparks, R.S.J., Thomson, D.J. 2012. Sensitivity analysis of dispersion modeling of volcanic ash from Eyjafjallajökull in May 2010. *Journal of Geophysical Research* 117.

Francis, P., Oppenheimer, C. 1993. *Volcanoes*, 2^o ed. Oxford. 521p.

González Ferrán, O. 1995. *Volcanes de Chile*. Instituto Geográfico Militar. 640p.

Hervé, F. 1994. The Southern Andes between 39° and 44°S. Latitude: the geological signature of a transpressive tectonic regime related to a magmatic arc. En: REUTTER, K.-J., SCHEUBER, E. & WIGGER, P. (eds) *Tectonics of the Southern Central Andes*. Springer, Berlin, 243–248.

Hervé, F., Massonne, H.-J., Theye, T. & Calderon, M. 2004. Metamorphic P-T conditions of rhyolites in the Magallanes fold and thrust belt, Patagonian Andes. *Bolletino Geofisica Teoretica Applicada*, 45(2, Supplement):110–113.

Jiménez-Escalona, J., Delgado, H., Realmuto, V. 2011. Use of MODIS images to study eruptive clouds from Volcán de Fuego de Colima (México) and applications on volcano monitoring. *Geofísica internacional* 50 (2):199-210.

Jiménez-Escalona, J., Monsiváis-Huertero, A., Delgado-Granados, H. Sin Publicar. Uso de imágenes MODIS en el monitoreo de la actividad del volcán de Colima. (Períodos del 10 Mayo al 15 de Junio de 2005)

Lara P., L., Moreno, H., Naranjo, J.A., Matthews, S., Pérez de Arce, C. 2006. Magmatic evolution of the Puyehue-Cordón Caulle Volcanic Complex (40°S), Southern Andean Volcanic Zone: From shield to unusual rhyolitic fissure volcanism. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 157: 343-366.

Lara P., L., Lavenu, A., Cembrano, J., Rodríguez, C. 2006. Structural controls of volcanism in transversal chains: resheared faults and neotectonics in the Cordón Caulle-Puyehue area (40.5°S), Southern Andes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 158: 70-86.

Lara P., L., Moreno R., H. 2006. Geología del Complejo Volcánico Puyehue - Cordón Caulle. Escala 1:50.000. Serie Geología Básica n°99. Servicio Nacional de Geología y Minería.

López-Escobar, L., Cembrano, J., Moreno, H. 1995. Geochemistry and tectonics of the Chilean Southern Andes basaltic Quaternary volcanism (37-46°S). *Revista Geológica de Chile* Vol 22 (2): 219-234.

Marenco, F., Johnson, B., Turnbull, K., Newman, S., Haywood, J., Webster, H., Ricketts, H. 2011. Airborne lidar observations of the 2010 Eyjafjallajökull volcanic ash plume. *Journal of Geophysical Research* 116.

Martin, R.S., Watt, S.F.L., Pyle, D.M., Mather, T.A., Matthews, N.E., Georg, R.B., Day, J.A., Fairhead, T., Witt, M.L.I., Quayle, B.M. 2009. Environmental effects of ashfall in Argentina from the 2008 Chaitén volcanic eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 184: 462-472.

Matiella Novak, M. A., Watson, I. M., Delgado-Granados, H., Rose, W. I., Cárdenas-González, L., Realmuto, V. J. 2008. Volcanic emissions from Popocatepetl volcano, Mexico, quantified using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) infrared data: A case study of the December 2000-January 2001 emissions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 170: 76-85.

McCormick, M.P., Thomason, L.W., Trepte, C.R. 1995. Atmospheric effects of the Mt. Pinatubo eruption. *Nature* 373: 399-404.

Melnick, D., Charlet, F., Echtler, H.P., De Batist, M. 2006. Inceptient axial collapse of the Main Cordillera and strain partitioning gradient between the Central and Patagonian Andes, Lago Laja, Chile. *Tectonics* 25.

Miller, T.P., Casadevall, T.J. 1999. Volcanic ash hazards to aviation. En: Sigurdsson, H., Houghton, B., Rymer, H., Stix, J., & McNutt, S. *Encyclopedia of volcanoes*. Pp.915-930.

Millington, S.C., Saunders, R.W., Francis, P.N., Webster, H.N. 2012. Simulated volcanic ash imagery: A method to compare NAME ash concentration forecasts with SEVIRI imagery for the Eyjafjallajökull eruption 2010. *Journal of Geophysical Research* 117.

Miserendino, M. L., Archangelsky, M., Brand, C., Beltrán, L. 2012. Environmental changes and macroinvertebrate responses in Patagonian streams (Argentina) to ashfall from the Chaitén Volcano (May 2008). *Science of Total Environment* 424: 202-212.

NASA Goddard Space Flight Center, Goddard Institute for Space Studies, New York. 1992. Climate Forcing by Stratospheric Aerosol. *Geophysical Research Letters*. 19 (15): 1607-1610.

Okazaki, I., Heki, K. 2012. Atmospheric temperature changes by volcanic eruptions: GPS radio occultation observations in 2010 Icelandic and 2011 Chilean cases. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 245-246: 123-127.

Petit-Breuilh, M.E. 2004. La historia eruptiva de los volcanes hispanoamericanos (siglos XVI al XX). Hueva. Extremo Cabildo Insular de Lanzarote. 431 p.

Picchiani, M., Chini, M., Corradini, S., Merucci, L., Sellitto, P., Del Frate, F., Stramondo, S. 2011. Volcanic ash detection and retrievals using MODIS data by means of Natural Networks. *Atmospheric Measurement Techniques* 4: 2567-2598.

Piscini, A., Corradini, S., Marchese, L., Merucci, L., Pergola, N., Tramutoli, V. 2011. Volcanic ash cloud from space: a comparison between the RST_{ASH} technique the water vapour corrected BTM procedure. *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 2 (3): 263-277.

Prata, A.J., Rose, W.I., Self, S., O'Brien, D.M. 2003. Global, long-term sulphur dioxide measurements from the TOVS data: a new tool for studying explosive volcanism and climate. *Geophysical Monographs* 139: 75-92.

Przedpelski, Z. J., & Casadevall, T. J. 1994. Impact of volcanic ash from 15 December 1989 Redoubt volcano eruption on GE CF6-80C2 turbofan engines. En: Volcanic Ash and Aviation Safety: Proceedings of the First International Symposium on Volcanic Ash and Aviation Safety, edited by TJ Casadevall, US Geol. Surv. Bull 2047: 129-135.

Realmuto, V.J., Abrams, M.J., Buongiorno, M.F., Pieri, D.C. 1994. The use of multispectral thermal infrared image data to estimate the sulfur dioxide flux from volcanoes: a case of study from Mount Etna, Sicily, July 29, 1986. *Journal of Geophysical Research* 99: 481-488.

Rodríguez, C. 1999. Geoquímica del Grupo Carrán-Los Venados, Andes del Sur (40.3_S). Universidad de Chile, thesis (unpublished). 133 pp. Santiago.

Rybin, A., Chibisova, M., Webley, P., Steensen, T., Izbekov, P., Neal, C., Realmuto, V. 2011. Satellite and ground observations of the June 2009 eruption of Sarychev Peak volcano, Matua Island, Central Kuriles. *Bulletin of Volcanology* 73(9): 1377-1392.

Sigurdsson, H., Houghton, B., Rymer, H., Stix, J., & McNutt, S. 1999. *Encyclopedia of volcanoes*. Academic Pres. 1417p.

Steffke, A. Fee, D., Garces, M., Harris, A. 2010 Eruption chronologies, plume heights and eruption styles at Tungurahua Volcano: Integrating remote sensing techniques and infrasound. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 193 (3-4): 143-160.

Stix, J., Gaonac'h, H. 1999. Gas, Plume and Thermal Monitoring. En: Sigurdsson, H., Houghton, B., Rymer, H., Stix, J., & McNutt, S. *Encyclopedia of volcanoes*. Pp.915-930.

Takacs, A., N. C. A. R. 2004. Evaluation of the oceanic cloud-top height diagnostic product: strategy of the verification methodology. In 11th Conference on Aviation, Range, and Aerospace.

Thomas, H.E., Watson, I.M., 2009. Observations of volcanic emissions from space: current and future perspectives. *Natural Hazards* 54 (2): 323-354.

Watson, I.M., Realmuto, V.J., Rose, W. I., Prata, A. J., Bluth, G. J. S., Gu, Y., Bader, C.E., Yu, T. 2004. Thermal infrared remote sensing of volcanic emissions using the moderate resolution imaging spectroradiometer. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 135: 75-89.

Wen, S., Rose, W.I. 1994. Retrieval of size and total masses of particles in volcanic clouds using AVHRR bands 4 and 5. *Journal of Geophysical Research* 99:5421-5431.

Wood, A. W. 1988. The fluid dynamics and thermodynamic of eruption columns. *Bulletin of Volcanology* 50: 169-193.

Wright, R., Carn, S., Flynn, L. 2005. A satellite chronology of the May-June 2003 eruption of Anatahan volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 146: 102-116.

13. ANEXOS

13.1. Tablas

Tabla 1 Fechas correspondientes a cada semana

Semana	Fecha de Inicio	Fecha de Terminó	Rango en Juliano
0	04-jun	05-jun	155-156
1	06-jun	12-jun	157-163
2	13-jun	19-jun	163-170
3	20-jun	26-jun	171-177
4	27-jun	03-jul	178-184
5	04-jul	10-jul	185-191
6	11-jul	17-jul	192-198
7	18-jul	24-jul	199-205
8	25-jul	31-jul	206-212
9	01-ago	07-ago	213-219
10	08-ago	14-ago	220-226
11	15-ago	21-ago	227-233
12	22-ago	28-ago	234-240
13	29-ago	04-sep	241-247
14	05-sep	11-sep	248-254
15	12-sep	18-sep	255-261
16	19-sep	25-sep	262-268
17	26-sep	02-oct	269-275
18	03-oct	09-oct	276-282
19	10-oct	16-oct	283-289
20	17-oct	23-oct	290-296
21	24-oct	30-oct	297-303
22	31-oct	06-nov	304-310
23	07-nov	13-nov	311-317
24	14-nov	20-nov	318-324
25	21-nov	27-nov	325-331
26	28-nov	04-dic	332-338
27	05-dic	11-dic	339-345
28	12-dic	18-dic	346-352
29	19-dic	25-dic	353-359
30	26-dic	01-ene	360-001
31	02-ene	08-ene	002-008
32	09-ene	15-ene	009-015
33	16-ene	22-ene	016-022
34	23-ene	29-ene	023-029
35	30-ene	05-feb	030-036
36	06-feb	12-feb	037-043
37	13-feb	19-feb	044-050
38	20-feb	26-feb	051-057
39	27-feb	04-mar	058-064
40	05-mar	11-mar	065-071
41	12-mar	18-mar	072-078
42	19-mar	25-mar	079-085
43	26-mar	01-abr	086-092

Tabla 2 Detalle de imágenes satelitales MODIS disponibles por semanas.

Semana	Terra				Aqua				Total Malas	Total buenas	Total	Días con información	Días sin información
	Malas	Nocturnas	Diurnas	Total	Malas	Nocturnas	Diurnas	Total					
0	2	1	1	4	2	1	2	5	4	5	9	2	0
1	9	3	3	15	9	3	4	16	18	13	31	4	3
2	13	2	2	17	12	1	2	15	25	7	32	2	5
3	5	5	5	15	6	5	4	15	11	19	30	7	0
4	13	2	1	16	5	4	3	12	18	10	28	4	3
5	7	1	4	12	9	2	5	16	16	12	28	5	2
6	16	0	0	16	16	0	0	16	32	0	32	0	7
7	10	0	4	14	12	1	2	15	22	7	29	4	3
8	11	1	2	14	9	3	4	16	20	10	30	4	3
9	13	1	1	15	10	0	2	12	23	4	27	3	4
10	12	1	2	15	12	2	1	15	24	6	30	3	4
11	6	2	5	13	6	3	5	14	12	15	27	5	2
12	13	2	1	16	13	1	2	16	26	6	32	2	5
13	11	1	2	14	10	2	2	14	21	7	28	4	3
14	13	0	2	15	15	1	0	16	28	3	31	2	5
15	9	1	5	15	7	4	4	15	16	14	30	5	2
16	10	0	4	14	8	2	3	13	18	9	27	5	2
17	13	0	2	15	13	2	1	16	26	5	31	4	3
18	12	3	2	17	11	3	0	14	23	8	31	5	2
19	12	1	2	15	12	1	3	16	24	7	31	4	3
20	6	5	3	14	7	2	6	15	13	16	29	6	1
21	7	5	4	16	7	3	5	15	14	17	31	6	1
22	6	4	5	15	7	5	4	16	13	18	31	6	1
23	9	2	2	13	8	4	2	14	17	10	27	3	4
24	10	3	3	16	8	4	3	15	18	13	31	5	2
25	13	0	1	14	10	2	3	15	23	6	29	3	4
26	6	4	5	15	8	4	4	16	14	17	31	5	2
27	7	2	4	13	7	3	5	15	14	14	28	5	2
28	7	2	7	16	7	2	8	17	14	19	33	7	0
29	6	4	3	13	9	1	3	13	15	11	26	4	3
30	7	0	7	14	6	3	7	16	13	17	30	7	0
31	10	0	4	14	10	0	4	14	20	8	28	5	2
32	11	1	4	16	8	1	4	13	19	10	29	4	3
33	11	0	3	14	11	0	5	16	22	8	30	5	2
34	11	0	4	15	7	3	4	14	18	11	29	5	2
35	9	2	4	15	9	3	3	15	18	12	30	4	3
36	5	2	6	13	10	1	4	15	15	13	28	6	1
37	13	0	1	14	13	2	0	15	26	3	29	3	4
38	11	2	0	13	13	1	1	15	24	4	28	3	4
39	16	0	0	16	16	0	0	16	32	0	32	0	7
40	9	2	3	14	9	1	4	14	18	10	28	5	2
41	7	2	4	13	8	2	4	14	15	12	27	5	2

42	8	5	3	16	8	4	2	14	16	14	30	6	1
43	4	4	5	13	5	5	6	16	9	20	29	6	1
TOTAL	419	78	135	632	408	97	140	645	827	450	1277	188	115

Tabla 3 Detalle Junio 2011

Semana	Juliano	Fecha	Hora	Satélite	Sin Información	Georreferenciado	Dirección	Osorno	Puerto Montt	Valdivia	Temuco	Concepción	Bariloche	San Martin	
0	155	04-jun	18:50	Aqua		1	228	0	0	0	0	0	0	0	
	156	05-jun	4:15	Terra		1	229	0	0	0	0	0	0	1	0
			5:55	Aqua		1	226	0	0	0	0	0	0	1	0
			15:20	Terra		1	253	0	0	0	0	0	0	0	0
17:55			Aqua		1	249	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	157	06-jun	3:20	Terra		1	280	0	0	0	0	0	0	1	
			5:00	Aqua		1	285	0	0	0	0	0	0	0	1
			14:25	Terra		1	330	0	0	0	0	0	0	0	0
			18:40	Aqua		1	331	0	0	0	0	0	0	0	0
	158	07-jun				1									
	159	08-jun	3:10	Terra		1	257	0	0	0	0	0	0	0	0
			6:25	Aqua		1	280	0	0	0	0	0	0	0	0
			14:15	Terra		1	295	0	0	0	0	0	0	0	1
			18:25	Aqua		1	301	0	0	0	0	0	0	0	1
	160	09-jun				1									
	161	10-jun				1									
	162	11-jun	3:40	Terra		1	261	0	0	0	0	0	0	0	0
5:20			Aqua		1	271	0	0	0	0	0	0	0	0	
14:45			Terra		1	260	0	0	0	0	0	0	0	0	
18:55			Aqua		1	247	0	0	0	0	0	0	1	0	
163	12-jun	18:00	Aqua		1	305	0	0	0	0	0	0	1		
2	164	13-jun	3:25	Terra		1	282	0	0	0	0	0	0	0	
			5:05	Aqua		1	265	0	0	0	0	0	0	0	0
			14:30	Terra		1	259	0	0	0	0	0	0	0	0
			18:45	Aqua		1	250	0	0	0	0	0	0	0	0
	165	14-jun	4:10	Terra		1	240	0	0	0	0	0	0	0	0
			15:15	Terra		1	261	0	0	0	0	0	0	0	0
			19:25	Aqua		1	246	0	0	0	0	0	0	0	0
	166	15-jun				1									
	167	16-jun				1									
	168	17-jun				1									
169	18-jun				1										
170	19-jun				1										
3	171	20-jun	14:40	Terra		1	233	0	0	0	0	0	1	0	
			18:50	Aqua		1	258	0	0	0	0	0	0	0	1
	172	21-jun	4:15	Terra		1	339	0	0	0	0	0	0	0	0
			5:55	Aqua		1	327	0	0	0	0	0	0	0	0
	173	22-jun	3:20	Terra		1	56	0	0	1	0			0	0
			6:40	Aqua		1	52	0	0	1	0	0	0	0	0

		14:25	Terra	1	29	0	0	1	0	0	0	0
174	23-jun	4:25	Terra	1	273	0	0	0	0	0	0	0
175	24-jun	6:25	Aqua	1	299	0	0	0	0	0	0	1
		14:15	Terra	1	350	0	0	0	0	0	0	0
		18:25	Aqua	1	345	0	0	0	1	0	0	0
176	25-jun	3:50	Terra	1	339	0	0	0	1	0	0	0
		5:30	Aqua	1	346	0	0	0	1	0	0	0
		14:55	Terra	1	351	0	0	0	1	0	0	0
		19:10	Aqua	1	29	0	0	0	1	1	0	0
177	26-jun	4:35	Terra	1	336	0	0	0	1	0	0	0
		6:15	Aqua	1	338	0	0	0	1	0	0	0
		14:00	Terra	1	331	0	0	0	1	0	0	0
		18:15	Aqua	1	308	0	0	0	1	1	0	1
4	178	27-jun	5:20	Aqua	1	307	0	0	0	0	0	1
		18:55	Aqua	1	311	0	0	0	0	0	0	1
	179	28-jun	4:20	Terra	1	310	0	0	0	0	0	1
			6:00	Aqua	1	307	0	0	0	0	0	1
	180	29-jun			1							
181	30-jun			1								
TOTAL				10	48	0	0	3	9	2	4	12

Tabla 4 Detalle Julio 2011

Semana	Juliano	Fecha	Hora	Satélite	Sin Información	Georreferenciado	Dirección	Osorno	Puerto Montt	Valdivia	Temuco	Concepción	Bariloche	San Martin
4	182	01-jul			1									
	183	02-jul	5:35	Aqua	1	22	0	0	1	0	1	0	0	
			19:15	Aqua	1	50	0	0	1	0	0	0	0	
	184	03-jul	4:40	Terra	1	53	0	0	1	0	0	0	0	
			6:20	Aqua	1	34	0	0	1	0	0	0	0	
			14:10	Terra	1	30	0	0	1	0	0	0	0	
18:20			Aqua	1	35	0	0	1	0	0	0	0		
5	185	04-jul	5:25	Aqua	1	289	0	0	0	0	0	0	1	
			14:50	Terra	1	-	0	0	1	1	0	0	1	
			19:05	Aqua	1	-	0	0	1	0	0	0	0	
	186	05-jul	4:30	Terra	1	359	1	0	1	1	0	0	0	
			6:10	Aqua	1	350	0	0	1	0	0	0	0	
			13:55	Terra	1	343	1	0	1	1	0	0	0	
	187	06-jul	14:40	Terra	1	319	0	0	0	0	0	0	1	
			18:50	Aqua	1	307	0	0	0	0	0	0	1	
	188	07-jul	17:55	Aqua	1	310	0	0	0	0	0	0	1	
			19:35	Aqua	1	310	0	0	0	0	0	0	1	
189	08-jul	14:25	Terra	1	253	0	0	0	0	0	0	0		
		18:40	Aqua	1	252	0	0	0	0	0	0	0		

	224	12-ago			1														
	225	13-ago	14:00	Terra		1	257	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	226	14-ago	3:40	Terra		1	261	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5:20			Aqua		1	264	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14:45			Terra		1	287	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
18:55			Aqua		1	270	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	227	15-ago	15:25	Terra		1	245	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			18:00	Aqua		1	233	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
	228	16-ago			1														
	229	17-ago			1														
	230	18-ago	14:20	Terra		1	29	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
			18:30	Aqua		1	17	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
	231	19-ago	5:35	Aqua		1	49	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			15:05	Terra		1	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
			19:15	Aqua		1	10	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0		
	232	20-ago	3:00	Terra		1	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			6:20	Aqua		1	52	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0		
			14:10	Terra		1	-	1	0	1	0	0	0	0	0	0			
	233	21-ago	18:20	Aqua		1	80	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
			3:45	Terra		1	121	1	0	0	0	0	0	0	0	0			
			5:25	Aqua		1	91	1	0	0	0	0	0	0	0				
	233	21-ago	14:50	Terra		1	305	1	0	1	0	0	0	0	0				
19:05			Aqua		1	266	0	0	1	0	0	0	0	1					
2:50			Terra		1	280	0	0	0	0	0	0	0	0					
234	22-ago	2:50	Terra		1														
235	23-ago			1															
12	236	24-ago	4:15	Terra		1	323	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
			5:55	Aqua		1	323	0	0	0	0	0	0	0	0				
			15:20	Terra		1	4	0	0	0	0	0	0	0	0				
			17:55	Aqua		1	8	0	0	0	1	0	0	0	0				
			19:35	Aqua		1	18	0	0	0	1	0	0	0	0				
237	25-ago			1															
238	26-ago			1															
239	27-ago			1															
240	28-ago			1															
241	29-ago			1															
13	242	30-ago	5:20	Aqua		1	270	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
			14:45	Terra		1	300	0	0	0	0	0	0	0	1				
			18:55	Aqua		1	313	0	0	0	0	0	0	0	1				
	243	31-ago	18:00	Aqua		1	-	1	1	0	0	0	0	0	0				
TOTAL					16	35	6	1	7	4	0	1	6						

Tabla 6 Detalle Septiembre 2011

Semana	Juliano	Fecha	Hora	Satélite	Sin Información	Georreferenciado	Dirección	Osorno	Puerto Montt	Valdivia	Temuco	Concepción	Bariloche	San Martín
13	244	01-sep	3:25	Terra		1	190	0	0	0	0	0	0	0
			5:05	Aqua		1	189	0	0	0	0	0	0	0
	245	02-sep			1									
	246	03-sep	14:20	Terra	0	1	249	0	0	0	0	0	0	0

	247	04-sep			1												
	248	05-sep			1												
14	249	06-sep	5:25	Aqua		1	258	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			14:50	Terra		1	296	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
	250	07-sep			1												
	251	08-sep			1												
	252	09-sep			1												
	253	10-sep	14:25	Terra		1	278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	254	11-sep				1											
15	255	12-sep	14:15	Terra		1	307	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			18:25	Aqua		1	315	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
	256	13-sep	5:30	Aqua		1	292	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
			14:55	Terra		1	309	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			19:10	Aqua		1	288	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	257	14-sep	6:15	Aqua		1	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			14:00	Terra		1	-	0	1	0	0	0	0	0	1	1	
	258	15-sep				1											
	259	16-sep				1											
	260	17-sep	5:05	Aqua		1	300	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
			14:30	Terra		1	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18:45			Aqua		1	110	0	0	1	0	0	0	0	0	0		
261		18-sep	4:10	Terra		1	167	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			5:50	Aqua		1	166	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			15:15	Terra		1	47	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
262	19-sep	14:20	Terra		1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		18:30	Aqua		1	354	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		15:00	Terra		1	250	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
263	20-sep	19:15	Aqua		1	264	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		6:20	Aqua		1	274	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
264	21-sep	14:50	Terra		1	273	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
265	22-sep				1												
266	23-sep				1												
267	24-sep				1												
268	25-sep	5:55	Aqua		1	252	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		15:20	Terra		1	273	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		19:35	Aqua		1	266	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	269	26-sep	5:00	Aqua		1	299	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
270	27-sep				1												
271	28-sep				1												
272	29-sep				1												
273	30-sep	14:00	Terra		1	253	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
TOTAL					14	31		0	1	3	0	0	0	1	6		

Tabla 7 Detalle Octubre 2011

Semana	Juliano	Fecha	Hora	Satélite	Sin Información	Georreferenciado	Dirección	Osorno	Puerto Montt	Valdivia	Temuco	Concepción	Bariloche	San Martín
17	274	01-oct	5:20	Aqua		1	258	0	0	0	0	0	0	0
	275	02-oct	15:25	Terra		1	332	0	0	0	0	0	0	0
			19:00	Aqua		1	-	1	0	0	0	0	0	0

18	276	03-oct			1										
	277	04-oct	4:10	Terra		1	233	0	0	0	0	0	1	0	
	278	05-oct	14:20	Terra		1	239	0	0	0	0	0	0	0	
	279	06-oct				1									
	280	07-oct	6:20	Aqua		1	271	0	0	0	0	0	0	1	
	281	08-oct	3:45	Terra		1	77	1	0	0	0	0	0	0	0
			5:25	Aqua		1	68	1	0	0	0	0	0	0	0
			14:50	Terra		1	-	1	0	0	0	0	0	0	0
282	09-oct	2:50	Terra		1	235	0	0	0	0	0	0	1	0	
		6:10	Aqua		1	223	0	0	0	0	0	0	1	0	
19	283	10-oct	14:40	Terra		1	281	0	0	0	0	0	0	0	
			18:50	Aqua		1	273	0	0	0	0	0	0	0	0
	284	11-oct				1									
	285	12-oct				1									
	286	13-oct	5:45	Aqua		1	184	0	0	0	0	0	0	0	0
			15:10	Terra		1	-	0	0	0	0	0	0	1	0
			19:20	Aqua		1	247	0	0	0	0	0	0	0	0
	287	14-oct	3:10	Terra		1	291	0	0	0	0	0	0	1	
288	15-oct				1										
289	16-oct	18:15	Aqua		1	312	0	0	0	0	0	0	0		
20	290	17-oct	18:55	Aqua		1	265	0	0	0	0	0	1	0	
	291	18-oct	4:20	Terra		1	314	0	0	0	0	0	0	1	
			6:00	Aqua		1	311	0	0	0	0	0	0	1	
			15:25	Terra		1	283	0	0	0	0	0	0	0	
			18:00	Aqua		1	255	0	0	0	0	0	0	0	
			19:40	Aqua		1	257	0	0	0	0	0	0	1	0
	292	19-oct	3:25	Terra		1	247	0	0	0	0	0	0	0	
			18:45	Aqua		1	244	0	0	0	0	0	0	1	1
	293	20-oct				1									
	294	21-oct	14:20	Terra		1	293	0	0	0	0	0	0	0	1
			18:30	Aqua		1	279	0	0	0	0	0	0	0	1
295	22-oct	3:55	Terra		1	350	0	0	0	0	0	0	0	0	
		15:00	Terra		1	41	0	0	1	0	0	0	0	0	
		19:15	Aqua		1	48	1	0	1	0	0	0	0	0	
296	23-oct	3:00	Terra		1	182	0	0	0	0	0	0	0	0	
		4:40	Terra		1	187	0	0	0	0	0	0	0	0	
		6:20	Aqua		1	186	0	0	0	0	0	0	0	0	
21	297	24-oct	3:45	Terra		1	276	0	0	0	0	0	0	0	
			14:50	Terra		1	313	0	0	0	0	0	0	0	1
			19:05	Aqua		1	301	0	0	0	0	0	0	0	1
	298	25-oct	2:50	Terra		1	293	0	0	0	0	0	0	0	1
			6:10	Aqua		1	-	0	0	0	0	0	0	0	0
			15:35	Terra		1	-	1	1	1	0	0	0	0	0
			19:45	Aqua		1	87	1	1	1	0	0	0	0	0
	299	26-oct	3:35	Terra		1	149	0	1	0	0	0	0	0	0
5:15			Aqua		1	124	0	1	0	0	0	0	0	0	
14:40			Terra		1	170	1	1	0	0	0	0	1	0	
18:50			Aqua		1	155	0	1	0	0	0	0	1	0	
300	27-oct	4:15	Terra		1	181	0	0	0	0	0	0	0		
301	28-oct				1										
302	29-oct	15:10	Terra		1	107	0	0	0	1	0	0	0	0	
		19:20	Aqua		1	344	0	0	0	0	0	0	0	0	
303	30-oct	3:10	Terra		1	7	0	0	0	1	0	0	0	0	
		6:25	Aqua		1	15	0	0	0	1	0	0	0	0	
		18:25	Terra		1	58	0	0	1	0	0	0	0	0	
22	304	31-oct	3:50	Terra		1	144	1	0	0	0	0	0	0	

			5:30	Aqua		1	137	1	0	0	0	0	0	0
			14:55	Terra		1	185	0	1	0	0	0	0	0
			19:10	Aqua		1	193	0	0	0	0	0	1	0
TOTAL						7	55	10	7	5	3	0	10	10

Tabla 8 Detalle Noviembre 2011

Semana	Juliano	Fecha	Hora	Satélite	Sin Información	Georeferenciado	Dirección	Osorno	Puerto Montt	Valdivia	Temuco	Concepción	Bariloche	San Martín	
22	305	01-nov	2:55	Terra		1	214	0	0	0	0	0	1	0	
	306	02-nov	14:45	Terra		1	261	0	0	0	0	0	0	0	
	307	03-nov	6:00	Aqua		1	262	0	0	0	0	0	0	0	0
			15:25	Terra		1	249	0	0	0	0	0	0	0	0
			19:40	Aqua		1	244	0	0	0	0	0	0	1	0
	308	04-nov	3:25	Terra		1	256	0	0	0	0	0	0	0	0
			5:05	Aqua		1	264	0	0	0	0	0	0	0	0
			6:45	Aqua		1	269	1	1	0	0	0	0	1	0
			14:30	Aqua		1	296	0	0	0	0	0	0	0	1
	309	05-nov	18:45	Terra		1	270	0	0	0	0	0	0	0	0
4:10			Terra		1	247	0	0	0	0	0	0	0	0	
5:50			Aqua		1	249	0	0	0	0	0	0	0	0	
15:15			Terra		1	253	0	0	0	0	0	0	0	0	
		19:25	Aqua		1	250	0	0	0	0	0	0	1	0	
310	06-nov				1										
311	07-nov				1										
312	08-nov				1										
313	09-nov				1										
314	10-nov				1										
23	315	11-nov	3:35	Terra		1	333	0	0	0	0	0	0	0	0
			5:15	Aqua		1	337	0	0	0	0	0	0	0	0
			14:40	Terra		1	319	0	0	0	1	0	0	0	1
			18:50	Aqua		1	255	0	0	0	0	0	0	0	1
	316	12-nov	5:55	Aqua		1	236	0	0	0	0	0	0	1	0
			15:20	Terra		1	244	0	0	0	0	0	0	1	0
			19:35	Aqua		1	242	0	0	0	0	0	0	0	0
317	13-nov	3:20	Terra		1	285	0	0	0	0	0	0	0	0	
		5:00	Aqua		1	283	0	0	0	0	0	0	0	1	
		6:40	Aqua		1	279	0	0	0	0	0	0	0	1	
24	318	14-nov	4:05	Terra		1	293	0	0	0	0	0	0	0	1
			5:45	Aqua		1	294	0	0	0	0	0	0	0	1
			15:10	Terra		1	18	0	0	0	1	0	0	0	0
			19:20	Aqua		1	224	0	0	0	0	0	0	1	0
	319	15-nov	6:25	Aqua		1	165	0	0	0	0	0	0	0	0
			14:15	Terra		1	-	1	1	0	0	0	0	0	0
			18:25	Aqua		1	133	1	0	0	0	0	0	0	0
	320	16-nov	14:55	Terra		1	143	0	1	0	0	0	0	0	0
			19:10	Aqua		1	90	1	1	0	0	0	0	0	0
	321	17-nov	2:55	Terra		1	120	0	0	0	0	0	0	0	0
4:35			Terra		1	126	0	0	0	0	0	0	0	0	
6:15			Aqua		1	133	0	0	0	0	0	0	0	0	

	322	18-nov			1									
	323	19-nov	6:00	Aqua		1	244	0	0	0	0	0	0	0
	324	20-nov			1									
	325	21-nov			1									
	326	22-nov			1									
	327	23-nov			1									
	328	24-nov			1									
25	329	25-nov	19:05	Aqua		1	303	0	0	0	0	0	0	1
	330	26-nov	6:10	Aqua		1	315	0	0	0	0	0	0	1
			13:55	Terra		1	226	0	0	0	0	0	1	1
			18:10	Aqua		1	203	0	0	0	0	0	1	0
			19:45	Aqua		1	226	0	0	0	0	0	1	0
331	27-nov	5:15	Aqua		1	240	0	0	0	0	0	0	0	
26	332	28-nov	15:20	Terra		1	251	0	0	0	0	0	0	0
			19:35	Aqua		1	265	0	0	0	0	0	0	0
	333	29-nov	3:20	Terra		1	279	0	0	0	0	0	0	0
			6:40	Aqua		1	298	0	0	0	0	0	0	1
			14:25	Terra		1	314	0	0	0	0	0	0	1
			18:40	Aqua		1	336	0	0	0	0	0	0	0
	334	30-nov	4:05	Terra		1	36	1	0	1	0	0	0	0
			5:45	Aqua		1	-	1	0	1	0	0	0	0
			15:10	Terra		1	351	0	0	0	0	0	0	0
19:20			Aqua		1	13	0	0	0	0	0	0	0	
TOTAL					11	53		6	4	2	2	0	10	12

Tabla 9 Detalle Diciembre 2011

Semana	Juliano	Fecha	Hora	Satélite	Sin Información	Georreferenciado	Dirección	Osorno	Puerto Montt	Valdivia	Temuco	Concepción	Bariloche	San Martin
26	335	01-dic	3:10	Terra		1	359	0	0	1	0	0	0	1
			6:25	Aqua		1	-	0	0	0	0	0	0	0
			14:15	Terra		1	188	1	1	1	0	0	1	0
			18:25	Aqua		1	197	0	0	0	0	0	1	0
	336	02-dic	3:50	Terra		1	228	0	0	0	0	0	1	0
			5:30	Aqua		1	226	0	0	0	0	0	1	0
			14:55	Terra		1	253	0	0	0	0	0	1	0
337	03-dic			1										
338	04-dic			1										
27	339	05-dic	4:20	Terra		1	342	0	0	0	0	0	0	1
			6:00	Aqua		1	3	0	0	0	0	0	0	0
			19:40	Aqua		1	300	0	0	0	0	0	0	1
	340	06-dic	3:25	Terra		1	5	0	0	0	0	0	0	0
			14:30	Terra		1	205	0	0	0	0	0	0	0
			18:45	Aqua		1	222	0	0	0	0	0	0	1
	341	07-dic	5:50	Aqua		1	341	0	0	0	0	0	0	0
			15:15	Terra		1	0	0	0	0	0	0	0	0
			19:25	Aqua		1	-	0	0	0	0	0	1	1
342	08-dic	6:35	Aqua		1	-	1	0	0	0	0	1	0	

			14:20	Terra		1	210	0	0	0	0	0	0	1	0
			18:30	Aqua		1	246	0	0	0	0	0	0	0	0
	343	09-dic	15:05	Terra		1	276	0	0	0	0	0	0	0	1
			19:15	Aqua		1	254	0	0	0	0	0	0	0	0
	344	10-dic				1									
	345	11-dic				1									
28	346	12-dic	2:50	Terra		1	299	0	0	0	0	0	0	0	1
			6:10	Aqua		1	6	0	0	0	0	0	0	0	0
			15:35	Terra		1	45	0	0	1	0	0	0	0	0
			18:10	Aqua		1	55	0	0	1	0	0	0	0	0
			19:45	Aqua		1	56	0	0	1	0	0	0	0	0
	347	13-dic	3:35	Terra		1	140	0	1	0	0	0	0	0	0
			5:15	Aqua		1	151	0	1	0	0	0	0	0	0
			14:40	Terra		1	214	1	1	0	0	0	0	1	0
	348	14-dic	15:20	Terra		1	175	0	1	0	0	0	0	0	0
			19:35	Aqua		1	179	0	1	0	0	0	0	1	0
	349	15-dic	14:25	Terra		1	136	0	1	0	0	0	0	0	0
			18:40	Aqua		1	-	1	1	0	0	0	0	1	0
	350	16-dic	15:10	Terra		1	218	0	0	0	0	0	0	1	0
			19:20	Aqua		1	112	1	1	0	0	0	0	0	0
351	17-dic	14:15	Terra		1	266	0	0	0	0	0	0	1	0	
		18:25	Aqua		1	270	0	0	0	0	0	0	0	0	
352	18-dic	14:55	Terra		1	322	0	0	0	0	0	0	0	1	
		19:10	Aqua		1	282	0	0	0	0	0	0	0	0	
29	353	19-dic	2:55	Terra		1	241	0	0	0	0	0	0	0	
			4:35	Terra		1	230	0	0	0	0	0	0	0	
			6:15	Aqua		1	235	0	0	0	0	0	0	0	
	354	20-dic				1									
	355	21-dic				1									
	356	22-dic				1									
	357	23-dic	4:10	Terra		1	329	0	0	0	0	0	0	0	0
			15:15	Terra		1	43	0	0	1	0	0	0	0	0
19:25			Aqua		1	67	1	0	1	0	0	0	0	0	
358		24-dic	3:15	Terra		1	95	1	0	0	0	0	0	0	0
			14:20	Terra		1	67	1	0	0	0	0	0	0	0
	18:30		Aqua		1	93	1	0	0	0	0	0	0	0	
359	25-dic	15:05	Terra		1	-	1	0	1	0	0	0	0	0	
		19:15	Aqua		1	-	0	0	1	0	0	0	1		
30	360	26-dic	14:10	Terra		1	315	1	1	0	0	0	0	1	
			18:20	Aqua		1	302	0	0	0	0	0	0	1	
	361	27-dic	5:25	Aqua		1	135	1	0	1	1	1	0	0	
			14:50	Terra		1	192	0	1	0	0	0	0	0	
			19:05	Aqua		1	193	0	1	0	0	0	0	0	
	362	28-dic	15:35	Terra		1	258	0	0	0	1	0	1	0	
			18:10	Aqua		1	247	0	0	0	1	0	1	0	
	363	29-dic	5:15	Aqua		1	326	0	0	0	0	0	0	1	
			14:40	Terra		1	331	0	0	0	0	0	0	1	
			18:50	Aqua		1	341	0	0	0	0	0	0	1	
	364	30-dic	5:55	Aqua		1	359	0	0	0	0	0	0	0	
15:20			Terra		1	352	0	0	0	0	0	0	0		
19:35			Aqua		1	2	0	0	0	0	0	0	0		
365	31-dic	14:25	Terra		1	202	0	0	0	0	0	1	0		
		18:40	Aqua		1	240	0	0	0	0	0	1	0		
TOTAL					7	66		12	12	10	3	1	18	14	

Tabla 10 Detalle Enero 2012

Semana	Juliano	Fecha	Hora	Satélite	Sin Información	Georreferenciado	Dirección	Osorno	Puerto Montt	Valdivia	Temuco	Concepción	Bariloche	San Martin	
30	1	01-ene	15:10	Terra		1	328	0	0	0	0	0	0	1	
			19:20	Aqua		1	338	0	0	0	0	0	0	0	1
31	2	02-ene	14:15	Terra		1	236	0	0	0	0	0	0	0	
			18:25	Aqua		1	278	0	0	0	0	0	0	1	0
	3	03-ene	14:55	Terra		1	269	0	0	0	0	0	0	0	0
			19:10	Aqua		1	301	0	0	0	0	0	0	0	1
	4	04-ene	14:00	Terra		1	-	0	0	1	1	0	0	0	
	5	05-ene	14:45	Terra		1	316	0	0	0	0	0	0	0	1
			18:55	Aqua		1	326	0	0	0	0	0	0	0	1
	6	06-ene	19:40	Aqua		1	-	1	1	0	0	0	0	1	0
7	07-ene				1										
8	08-ene				1										
9	09-ene				1										
10	10-ene				1										
32	11	11-ene	14:10	Terra		1	327	0	0	0	0	0	0	1	
			18:20	Aqua		1	341	0	0	0	0	0	0	0	0
	12	12-ene	3:45	Terra		1	20	0	0	0	1	0	0	0	0
			5:25	Aqua		1	9	0	0	0	0	0	0	0	0
			14:50	Terra		1	23	0	0	0	0	0	0	0	0
			19:05	Aqua		1	14	0	0	0	0	0	0	0	0
	13	13-ene	15:35	Terra		1	352	0	0	0	0	0	0	0	0
			18:10	Aqua		1	32	0	0	0	0	0	0	0	0
	14	14-ene	14:40	Terra		1	216	0	0	0	0	0	0	0	0
			18:50	Aqua		1	222	0	0	0	0	0	0	1	0
15	15-ene				1										
33	16	16-ene	14:25	Terra		1	198	0	0	0	0	0	1	0	
			18:40	Aqua		1	208	0	0	0	0	0	0	0	0
	17	17-ene	19:20	Aqua		1	297	0	0	0	0	0	0	0	
	18	18-ene	14:15	Terra		1	-	0	0	0	0	0	0	0	0
			18:25	Aqua		1	200	1	0	0	0	0	0	0	0
	19	19-ene	14:55	Terra		1	4	0	0	0	0	0	0	0	0
			19:10	Aqua		1	273	0	0	0	0	0	0	0	0
	20	20-ene				1									
21	21-ene				1										
22	22-ene	19:40	Aqua		1	202	0	0	0	0	0	0	0	0	
34	23	23-ene	5:05	Aqua		1	290	0	0	0	0	0	0	0	
	24	24-ene	15:15	Terra		1	357	0	0	0	0	0	0	0	

			19:25	Aqua		1	50	0	0	1	0	0	0	0	
25	25-ene		6:35	Aqua		1	-	1	0	0	0	0	0	0	
			14:20	Terra		1	195	0	0	0	0	0	0	0	
			18:30	Aqua		1	157	0	0	0	0	0	0	0	
			15:05	Terra		1	237	0	0	0	0	0	0	0	
26	26-ene		19:15	Aqua		1	237	0	0	0	0	0	1	0	
			6:20	Aqua		1	243	0	0	0	0	0	1	0	
27	27-ene		14:10	Terra		1	249	0	0	0	0	0	0	0	
			18:20	Aqua		1	252	0	0	0	0	0	0	0	
	28	28-ene				1									
	29	29-ene				1									
35		30	30-ene			1									
		31	31-ene			1									
TOTAL						11	39		3	1	2	2	0	6	6

Tabla 11 Detalle Febrero 2012

Semana	Juliano	Fecha	Hora	Satélite	Sin Información	Georreferenciado	Dirección	Osorno	Puerto Montt	Valdivia	Temuco	Concepción	Bariloche	San Martin	
35	32	01-feb			1										
	33	02-feb	4:05	Terra		1	6	0	0	0	0	0	0	0	0
			5:45	Aqua		1	10	0	0	0	0	0	0	0	0
			15:10	Terra		1	306	0	0	0	1	1	0	0	0
			19:20	Aqua		1	290	0	0	0	1	1	0	0	0
	34	03-feb	6:25	Aqua		1	260	0	0	0	0	0	0	0	0
			14:15	Terra		1	245	0	0	0	0	0	0	0	0
			18:25	Aqua		1	245	0	0	0	0	0	1	0	0
	35	04-feb	14:45	Terra		1	282	0	0	0	0	0	0	0	0
			19:10	Aqua		1	286	0	0	0	0	0	0	0	0
	36	05-feb	4:35	Terra		1	271	0	0	0	0	0	0	0	0
			6:15	Aqua		1	274	0	0	0	0	0	0	0	0
			14:00	Terra		1	278	0	0	0	0	0	0	0	0
	36	37	06-feb	3:40	Terra		1	293	0	0	0	0	0	0	1
14:45				Terra		1	294	0	0	0	0	0	0	1	
18:55				Aqua		1	249	0	0	0	0	0	0	0	

	38	07-feb			1									
	39	08-feb	14:30	Terra		1	333	0	0	0	0	0	0	
			18:45	Aqua		1	307	0	0	0	0	0	0	0
	40	09-feb	4:10	Terra		1	3	0	0	0	0	0	0	
			5:50	Aqua		1	79	0	0	0	0	0	0	
			15:15	Terra		1	-	1	0	1	0	0	0	0
			19:30	Aqua		1	-	0	0	0	0	0	0	0
	41	10-feb	14:20	Terra		1	280	0	0	0	0	0	0	
			18:35	Aqua		1	287	0	0	0	0	0	0	1
	42	11-feb	15:05	Terra		1	281	0	0	0	0	0	0	
	43	12-feb	14:10	Terra		1	292	0	0	0	0	0	0	
37	44	13-feb	14:50	Terra		1	246	0	0	0	0	0	0	
	45	14-feb	6:10	Aqua		1	254	0	0	0	0	0	0	
	46	15-feb	5:15	Aqua		1	224	0	0	0	0	0	1	
	47	16-feb				1								
	48	17-feb				1								
	49	18-feb				1								
	50	19-feb				1								
38	51	20-feb				1								
	52	21-feb	2:55	Terra		1	294	0	0	0	0	0	0	
			6:15	Aqua		1	306	0	0	0	0	0	0	
	53	22-feb	18:55	Aqua		1	78	0	0	0	0	0	0	
	54	23-feb	4:20	Terra		1	-	0	0	0	0	0	0	
	55	24-feb				1								
	56	25-feb				1								
57	26-feb				1									
39	58	27-feb				1								
	59	28-feb				1								
	60	29-feb				1								
	TOTAL				13	32	1	0	1	2	2	2	5	

Tabla 12 Detalle Marzo 2012

Semana	Juliano	Fecha	Hora	Satélite	Sin Información	Georreferenciado	Dirección	Osorno	Puerto Montt	Valdivia	Temuco	Concepción	Bariloche	San Martin	
39	61	01-mar			1										
	62	02-mar			1										
	63	03-mar			1										
	64	04-mar			1										
40	65	05-mar	15:10	Terra		1	261	0	0	0	0	0	0	0	
	66	06-mar	14:15	Terra		1	253	0	0	0	0	0	0	0	
			18:25	Aqua		1	250	0	0	0	0	0	0	0	
	67	07-mar	3:50	Terra		1	316	0	0	0	0	0	0	0	0
			5:30	Aqua		1	316	0	0	0	0	0	0	0	
			14:55	Terra		1	356	0	0	0	0	0	0	0	0
			19:10	Aqua		1	61	0	0	0	0	0	0	0	0
	68	08-mar	18:15	Aqua		1	180	0	1	0	0	0	0	0	
	69	09-mar			1										
	70	10-mar	4:20	Terra		1	336	0	0	0	0	0	0	0	0
19:40			Aqua		1	180	0	0	0	0	0	0	0	0	
71	11-mar			1											
41	72	12-mar	4:10	Terra		1	248	0	0	0	0	0	0	0	
	73	13-mar	6:35	Aqua		1	-	0	0	0	0	0	0	0	
			14:20	Terra		1	333	0	0	0	0	0	0	0	
			18:35	Aqua		1	343	0	0	0	0	0	0	0	
	74	14-mar	4:00	Terra		1	-	0	0	0	0	0	0	0	0
			5:40	Aqua		1	-	0	0	0	0	0	0	0	0
			15:05	Terra		1	-	0	0	0	0	0	0	0	0
			19:15	Aqua		1	345	0	0	0	0	0	0	0	0
	75	15-mar	14:10	Terra		1	-	0	0	0	0	0	0	0	0
			18:20	Aqua		1	-	0	0	0	0	0	0	0	0
76	16-mar	14:20	Terra		1	245	0	0	0	0	0	0	0		

		19:05	Aqua		1	-	0	0	0	0	0	0	0
	77	17-mar			1								
	78	18-mar			1								
42	79	19-mar			1								
	80	20-mar	14:25	Terra	1	341	0	0	0	0	0	0	0
			18:40	Aqua	1	-	0	0	0	0	0	0	0
	81	21-mar	4:05	Terra	1	-	0	0	0	0	0	0	0
			5:45	Aqua	1	-	0	0	0	0	0	0	0
	82	22-mar	3:10	Terra	1	-	0	0	0	0	0	0	0
			18:35	Aqua	1	-	0	0	0	0	0	0	0
	83	23-mar	5:30	Aqua	1	-	0	0	0	0	0	0	0
			14:55	Terra	1	-	0	0	0	0	0	0	0
	84	24-mar	2:55	Terra	1	-	0	0	0	0	0	0	0
			4:35	Terra	1	-	0	0	0	0	0	0	0
			6:15	Aqua	1	-	0	0	0	0	0	0	0
	85	25-mar	3:40	Terra	1	-	0	0	0	0	0	0	0
			5:20	Aqua	1	-	0	0	0	0	0	0	0
14:45			Aqua	1	-	0	0	0	0	0	0	0	
43	86	26-mar	4:20	Terra	1	-	0	0	0	0	0	0	0
			6:05	Aqua	1	-	0	0	0	0	0	0	0
			15:25	Terra	1	-	0	0	0	0	0	0	0
			19:40	Aqua	1	60	1	0	0	0	0	0	0
	87	27-mar	3:25	Terra	1	-	0	0	0	0	0	0	0
			5:10	Aqua	1	-	0	0	0	0	0	0	0
			6:45	Aqua	1	-	0	0	0	0	0	0	0
			14:30	Terra	1	-	0	0	0	0	0	0	0
			18:45	Aqua	1	-	0	0	0	0	0	0	0
	88	28-mar	4:10	Terra	1	-	0	0	0	0	0	0	0
			5:50	Aqua	1	-	0	0	0	0	0	0	0
			19:30	Aqua	1	-	0	0	0	0	0	0	0
	89	29-mar	3:15	Terra	1	-	0	0	0	0	0	0	0
			6:35	Aqua	1	-	0	0	0	0	0	0	0

		14:20	Terra		1	-	0	0	0	0	0	0	0
		18:35	Aqua		1	-	0	0	0	0	0	0	0
90	30-mar	15:05	Terra		1	-	0	0	0	0	0	0	0
		19:15	Aqua		1	-	0	0	0	0	0	0	0
91	31-mar			1									
92	01-abr	14:50	Terra		1	-	0	0	0	0	0	0	0
		19:05	Aqua		1	24	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL					10	56	1	1	0	0	0	0	0

Tabla 13 Estimación de alturas con el método de la sombra. PRV.

Día	Hora local	Altura (msnm)	Error (m)
14-jun	11:15	12450	605
20-jun	10:40	4145	30
22-jun	10:25	5585	155
24-jun	10:15	2270	20
25-jun	15:10	2770	25
26-jun	14:15	3680	115
27-jun	14:55	3200	40
02-jul	15:15	1980	20
03-jul	10:10	1875	45
04-jul	15:05	2180	5
06-jul	14:50	2765	160
08-jul	10:25	2650	35
18-jul	15:15	2430	10
19-jul	14:20	2340	5
31-jul	14:15	2150	25
03-ago	15:15	2290	65
14-ago	14:55	2515	15
30-ago	14:55	2415	30
14-sep	10:00	2720	50
23-sep	09:55	3130	90
11-nov	10:40	3650	150
16-dic	15:10	2540	260
29-mar-12	16:00	1600	50

Tabla 14 Estimación de alturas mediante CTOP. Junio 2011- Marzo 2012.

Mes	Día	Hora	Temperatura Brillo [K]	Altura estimada [m]
Junio 2011	4	18:50	202	SIN DATOS
	5	15:20	212	18.500
	6	14:25	208	10.371
	8	18:25	239	6.492
	11	18:55	244	5.475
	12	18:00	237	7.110

	13	14:30	228	9.030
	14	15:15	234	7.110
	20	18:50	262	3.581
			270	2.826
	21	4:15	261	4.829
	22	14:25	250	6.103
	23	4:25	264	3.416
	24	14:15	257	3.821
	25	14:55	258	4.610
	26	18:15	262	4.526
	27	5:20	265	3.811
	28	6:00	264	3.830
Julio 2011	30	19:40	259	3.168
Agosto 2011	19	19:15	261	3.609
	20	18:20	265	3.475
Septiembre 2011	6	14:50	262	3.850
	10	14:35	262	3.090
	12	14:15	265	4.013
	13	19:10	261	4.918
	17	14:30	268	3.293
	18	4:10	269	3.118
	20	15:00	271	3.392
Octubre 2011	13	19:20	249	5.659
	18	15:25	267	3.603
	22	15:00	262	4.027
	26	19:45	263	4.585
	29	19:20	265	4.364
	30	18:25	260	4.975
Noviembre 2011	4	14:30	266	3.088
	5	15:15	267	3.069
	11	14:40	272	3.726
	14	19:20	262	5.239
	16	14:55	268	SIN DATOS
	29	14:25	270	3.000
	30	15:10	273	3.650
Diciembre 2011	1	14:15	269	4.948
	6	18:45	271	4.425
	7	19:25	269	4.233
	12	15:35	269	4.308
	23	15:15	266	3.247
	29	14:40	277	3.011
Enero 2012	2	14:15	273	4.100
	13	18:10	269	5.613
	19	19:10	263	5.089
	25	14:20	272	4.100
Febrero 2012	2	15:10	271	3.579
	6	14:45	276	3.410
	10	14:20	278	3.160
Marzo 2012	5	15:10	265	3.000
	6	14:15	272	2.262
	7	14:55	280	1.409
	8	18:15	286	1.902
	10	19:40	286	1.492
	12	4:10	270	SIN DATOS
	13	18:35	277	3.044
	14	15:05	290	1.877
	15	18:20	284	SIN DATOS

	16	14:20	287	SIN DATOS
	20	14:25	280	1.560

Tabla 15 Resumen días con vuelos cancelados, Aeropuerto Tepual, Puerto Montt

Día	Total Vuelos	Cancelados	Porcentaje
05 Junio	30	2	6,7
13 junio	28	3	10,7
17 Junio	32	17	53,1
20 Junio	28	2	7,1
21 Junio	28	3	10,7
22 Junio	28	6	21,4
23 Junio	30	2	6,7
25 Junio	20	3	15,0
26 Junio	25	3	12,0
27 Junio	29	3	10,3
28 Junio	30	2	6,7
04 Julio	28	2	7,1
05 Julio	28	3	10,7
07 Julio	31	1	3,2
08 Julio	33	1	3,0
12 Julio	32	1	3,1
17 Julio	33	7	21,2
18 Julio	30	27	90,0
24 Julio	32	1	3,1
25 Julio	34	4	11,8
26 Julio	38	2	5,3
29 Julio	33	10	30,3
30 Julio	29	1	3,4
31 julio	33	2	6,1
08 Agosto	32	1	3,1
09 Agosto	32	2	6,3
21 Agosto	30	4	13,3
31 Agosto	32	17	53,1
18 Septiembre	27	1	3,7
19 Septiembre	34	1	2,9
27 Septiembre	36	2	5,6
03 Octubre	33	15	45,5
04 Octubre	34	1	2,9
08 Octubre	23	4	17,4
09 Octubre	33	2	6,1
23 Octubre	35	11	31,4
25 Octubre	37	6	16,2
26 Octubre	36	24	66,7
27 Octubre	45	8	17,8
31 Octubre	31	15	48,4
05 Noviembre	26	2	7,7
15 Noviembre	39	15	38,5
16 Noviembre	42	41	97,6

17 Noviembre	45	10	22,2
02 Diciembre	43	1	2,3
05 Diciembre	44	1	2,3
07 Diciembre	43	1	2,3
13 Diciembre	40	27	67,5
14 Diciembre	42	8	19,0
15 Diciembre	39	36	92,3
16 Diciembre	44	6	13,6
24 Diciembre	31	1	3,2
25 Diciembre	37	5	13,5
15 Enero	42	1	2,4
28 Marzo	34	1	2,9

13.2. Análisis de MODIS

- 1) En la página <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html> seleccionar Terra MODIS o Aqua MODIS, Terra/Aqua Level 1 Products, Level 1A.
- 2) Seleccionar el rango temporal requerido.
- 3) Seleccionar el rango de Latitud/Longitud según lo que se pretenda observar.
- 4) Una vez iniciada la búsqueda se puede obtener una imagen previa de la imagen MODIS y se descargan las imágenes seleccionadas.
- 5) Para visualizar la imagen, se abre el archivo en el programa ENVI, aquí se podrán visualizar tanto como en escala de grises como combinaciones RGB de las 36 bandas espectrales.
- 6) Para georeferenciar imágenes, ir al menú “Map” y seleccionar “Georeference MODIS”. Escoger los parámetros requeridos en el menú.

7) Para visualizar en colores reales, escoger la combinación de bandas 3-2-1 en RGB.
Para visualizar ceniza según lo propuesto por Watson et al, 2004, combinar las bandas 28-31-32.

8) Para el método BTM, ir al menú “Basic Tools”, “Band Math”, y agregar la ecuación de Planck:

$$1.43e-02*(1/11e-6)*1/\log(1.18e-22/(((11e-6)^5)*b1)+1)-1.43e-02*(1/12e-6)*1/\log(1.18e-22/(((12e-6)^5)*b2)+1)$$

Donde B1 es la banda 31 y B2 la banda 32. Visualizar en escala de grises.

9) Para el método CTOP, ir al menú “Basic Tools”, “Band Math”, y agregar la ecuación de Planck:

$$1.43e-02*(1/11e-6)*1/\log(1.18e-22/(((11e-6)^5)*b1)+1)$$

Donde B1 es la banda 31. Visualizar en escala de grises. Los valores corresponden a la temperatura [K] de la superficie captada por el satélite. Es posible definir valores de contorno para interpretar mejor los datos.