



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA



Caracterización de las emisiones subaéreas de los volcanes Copahue y Callaqui determinando patrones característicos.

Memoria para optar al Título de Geólogo.

Gonzalo Agustín Acuña Romero

Profesor Guía: Dr. Jorge Andrés Quezada Flory

Profesores Comisión: Dr. Ramiro Ulises Bonilla Parra

Dr. Mauricio Esteban Espinoza Vargas

Concepción, 2024

*A mis amigos, mi familia, por aquellos que
me han acompañado y por aquellos que ya no están.*

RESUMEN

Los volcanes representan una amenaza para la población y la infraestructura, especialmente en Chile, que cuenta con 92 volcanes activos. El monitoreo volcánico es crucial, y desde la erupción del volcán Chaitén en 2008, se ha fortalecido con la creación de la Red Nacional de Vigilancia Volcánica (RNVV). El volcán Copahue es especialmente riesgoso, emitiendo tefra, lahares y flujos piroclásticos.

Este estudio se enfoca en evaluar la viabilidad del uso de inteligencia artificial en el monitoreo volcánico, así como en identificar patrones a partir de observaciones de imágenes proporcionadas por cámaras estacionarias en un periodo específico.

Se analizan los volcanes Callaqui y Copahue, con registros de 400 y 328 días respectivamente. La clasificación de las imágenes se realiza mediante un software de clasificación que asigna etiquetas como Freatomagmática, Freática, Incandescencia, Sin Fumarola, Nublado, Indeterminado y Sin Señal. Además, se incluyen clasificaciones adicionales según el tamaño de la fumarola y la intensidad de la incandescencia, considerando la tendencia diaria para ampliar la gama de datos y evitar pérdida de información crucial.

Las observaciones diarias se presentan en tablas con barras horizontales, representando el tiempo, el tipo de fumarola y la intensidad de la incandescencia. Este formato facilita una observación eficaz de los resultados.

Los hallazgos revelan un comportamiento errático en el volcán Copahue, con variaciones entre periodos freáticos y freatomagmáticos, y la presencia de incandescencias en momentos de baja luminosidad. En contraste, el volcán Callaqui muestra un comportamiento más uniforme, con una fumarola freática constante y una breve variación en la actividad durante un periodo de 3 días.

El sistema de clasificación y las tablas indican que el volcán Copahue exhibe incandescencias intensas durante liberaciones anormales de ceniza en forma de fumarolas freatomagmáticas, que ocurren en momentos específicos, pero con gran intensidad. Sin embargo, la clasificación puede verse afectada por factores climáticos, como la interferencia de nubes, y por la falta de imágenes en días no operativos o defectuosos de las cámaras.

INDICE

Página

RESUMEN

1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivo General.....	3
1.2.2 Objetivos Específicos.....	3
1.3 Ubicación y Contexto	3
2 MARCO GEOLÓGICO	6
2.1 Volcán Copahue.....	6
2.1.1. Petrografía general del volcán Copahue.....	6
2.2.1.1 Estratigrafía del volcán Copahue.....	6
2.1.2. Contexto estructural y morfología del volcán Copahue	7
2.1.3. Emisiones históricas	7
2.1.4. Situación de peligro actual y riesgo específico.....	8
2.2 Volcán Callaqui	9
2.2.1. Petrografía del volcán Callaqui.....	9
2.2.2. Contexto estructural del volcán Callaqui	11
2.2.3. Emisiones históricas y prehistóricas	11
2.2.4. Situación de peligro actual y riesgo específico.....	12
3 MARCO TEÓRICO.....	13
3.1 Peligros asociados a la presencia de volcanes.....	13
3.2 Tipos de emisiones fumarólicas	15
3.3 Incandescencias	15
4 METODOLOGÍA Y MATERIALES	16
4.1 Ubicación y características de las imágenes	16
4.2 Proceso de clasificación y anotaciones diarias.....	18
4.3 Descripción de las variables cualitativas a clasificar.....	18
5 RESULTADOS	27
5.1 Compilación de datos de observaciones y clasificaciones del volcán Copahue	27

5.2 Compilación de datos de observaciones y clasificaciones del volcán Callaqui.....	31
6 DISCUSIÓN.....	37
7 CONCLUSIÓN.....	40
8 RECOMENDACIONES	42
REFERENCIAS	43
ANEXOS.....	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla			Página
1.	1.	Leyenda asignada.....	25
1.	2.	Formato de representación de los resultados obtenidos.....	26
2.	1.	Registro de comportamiento de fumarola diario 2019.....	28
2.	2.	Registro de comportamiento de fumarola diario 2020.....	29
2.	3.	Registro de comportamiento de fumarola diario 2021.....	30
2.	4.	Registro de comportamiento de fumarola diario 2022.....	31
3.	1.	Registro de los meses de marzo y abril para el volcán Callaqui.....	33
3.	2.	Registro consecutivo de la anomalía.....	36
4.	1.	Registro extendido del periodo 22-09 a 04-11.....	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. 1. Ubicación volcán Copahue mostrando su cercanía en relación con la ciudad del mismo nombre.....	4
2. 1. Ubicación volcán Callaqui mostrando su disposición y cercanía a la Reserva Nacional Ralco.....	5
3. 1. Vista de cámara hacia el volcán Copahue apuntando hacia el Oeste.	16
4. 1. Interfaz utilizada para la clasificación cada de cada imagen tomada en intervalos de 4 a 5 minutos.....	17
5. 1. Columna freática típica del volcán Copahue mostrando la coloración blanquecina.....	19
5. 2. Columna típica freatomagmática del volcán Copahue.....	20
5. 3. Estado “Nublado” del volcán Copahue.....	21
5. 4. Incandescencia típica del volcán Copahue.....	22
5. 5. Situación común de “Sin Señal”.....	23
6. 1. Vista continua de las 3 variaciones de tamaño de fumarola consideradas para el volcán Copahue.....	24
6. 2. Vista continua de las 3 variaciones de la intensidad de la incandescencia para el volcán Copahue.....	24
7. 1. Columna freática típica del volcán Callaqui.....	32
7. 2. Incandescencia vista durante el leve periodo de actividad del volcán Callaqui.....	34
7. 3. Columna freática del volcán Callaqui durante el periodo de anomalía observada.....	35

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

En la época actual los volcanes representan un peligro poniendo en riesgo infraestructura, sometiendo a estrés a la población que vive próxima a ellos, así como generando pérdidas tanto humanas como en el desarrollo de estas. Se estima que 800 millones de personas viven a menos de 100 kilómetros de volcanes con potencial eruptivo a lo largo del planeta Tierra (Loughlin et al., 2015).

Los esfuerzos de monitoreo volcánico en Chile comenzaron en 1992 con la formación del observatorio Volcánico de los andes del Sur (OVDAS), a partir del cual se formaron varias ramas de vigilancia como lo son, la espectrometría de gases, sismómetros, satélites, etc. (SERNAGEOMIN, 2018).

El monitoreo volcánico en Chile es de vital importancia debido a la alta actividad volcánica del país (SERNAGEOMIN, 2023). Chile cuenta con 92 volcanes considerados geológicamente activos, y la Red Nacional de Vigilancia Volcánica (RNVV) establece la vigilancia en tiempo real de 45 de estos (SERNAGEOMIN). La RNVV permite a las autoridades contar con información oportuna para la gestión de una emergencia volcánica y tomar decisiones enfocadas en la seguridad de la población (SERNAGEOMIN).

Un ejemplo reciente de la importancia del monitoreo volcánico es la erupción del volcán Chaitén en 2008 siendo esta erupción, una de las más catastróficas del siglo XXI, llevó a la creación de la RNVV en 2009 (SERNAGEOMIN, 2023). Desde entonces, la RNVV ha experimentado un crecimiento notable en su capacidad de análisis y de operación.

El volcán Copahue se encuentra dentro de los volcanes que representa un peligro debido a la emisión de tefra, lahares, flujos piroclásticos, entre otros (Naranjo et al., 2000). Lo cual hace indispensable un monitoreo constante y eficiente ante cualquier eventualidad.

Bajo este contexto, el presente trabajo buscará la caracterización de la actividad volcánica superficial, esto mediante imágenes obtenidas por una cámara estacionaria con relativa frecuencia. Los volcanes en observación serán el volcán Callaqui y el volcán Copahue, ambos volcanes cercanos a poblados y que, debido a su actividad, pueden constituir un riesgo para la población expuesta al peligro emanado por estos edificios volcánicos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Analizar la viabilidad para integrar inteligencias artificiales en el monitoreo volcánico, mediante monitoreo fotográfico de las emisiones subaéreas.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Desarrollar un método de clasificación de emisiones subaéreas que permita distinguir tanto entre freatomagmáticas y freáticas como entre eventos de fumarola o nubes en un solo análisis integrado.
- Búsqueda de patrones en las emisiones subaéreas de volcanes en función de registros periódicos usando imágenes de cámara estacionaria.

1.3 Ubicación y Contexto

El volcán Copahue ubicado en la VIII región de Chile, BioBío y en la provincia de Neuquén en Argentina, se encuentra en la latitud $37^{\circ}51'S$ y longitud $71^{\circ}10'O$, cercano a la ciudad de Caviahue desde el lado chileno y de la ciudad de Copahue del lado argentino (SERNAGEOMIN, 2017). Este volcán presenta una actividad alternante el cual presenta emisiones de tipo freáticas y freatomagmáticas, sin emisión de lavas (SERNAGEOMIN, 2018).

Para llegar al Volcán Callaqui desde Concepción, se tienen dos rutas sugeridas. La primera es la Ruta 146, Q-61, que tiene una distancia de 245.372 km. La segunda es la Ruta 156, Q-61, con una distancia de 257.507 km.



Figura 1.1 Ubicación del volcán Copahue mostrando su cercanía en relación con la ciudad del mismo nombre. Imágenes de satélite proporcionadas por Esri, Maxar, Earthstar Geographics, y la Comunidad de Usuarios de SIG.

Por otro lado, el volcán Callaqui se encuentra en la VIII región de Chile, BioBío cercano a la ciudad de Quilaco en Santa Barbara en las coordenadas $37^{\circ}56'S - 71^{\circ}27'O$ (SERNAGEOMIN, 2017) se encuentra únicamente en Chile a diferencia del volcán Copahue. El volcán ha contado con registro de emisión de lavas de tipo andesítico basálticas y basálticas, contando con emisiones recientes en forma de fumarolas (SERNAGEOMIN, 2017).

Para llegar al Volcán Copahue desde Concepción, se tienen dos rutas sugeridas. La primera es la Ruta 146, Q-61, que tiene una distancia de 275.828 km. La segunda es la Ruta 156, Camino Ralco - Trapa Trapa, con una distancia de 287.963 km.

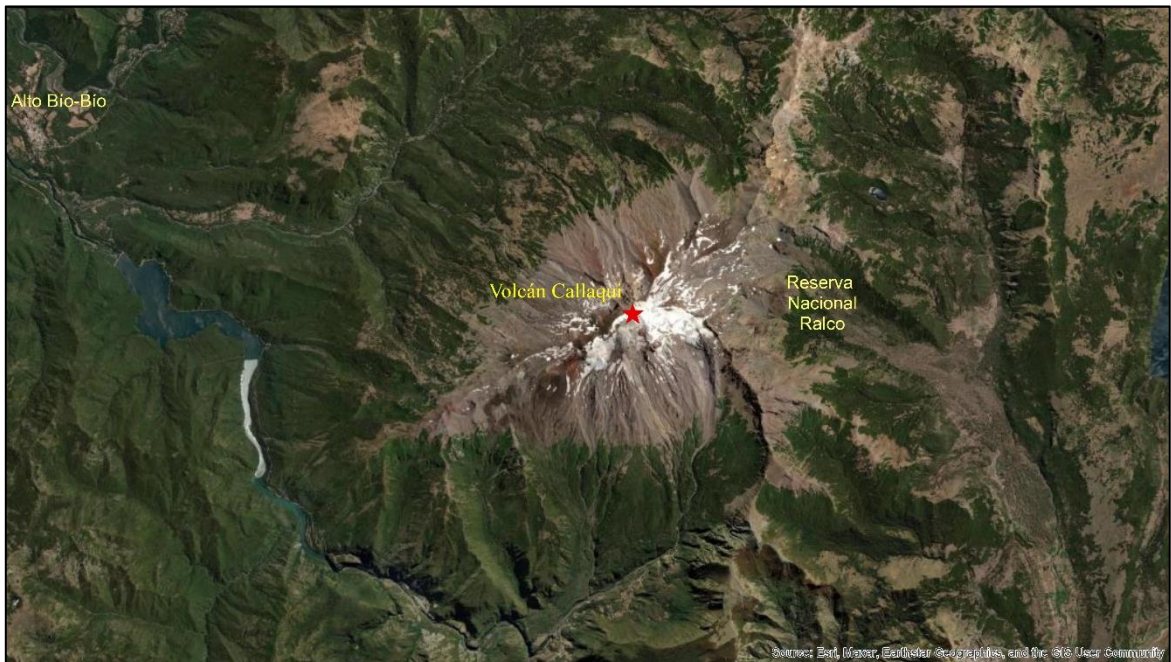


Figura 2.1 Ubicación del volcán Callaqui mostrando su disposición y cercanía a la Reserva Nacional Ralco. Imágenes de satélite proporcionadas por Esri, Maxar, Earthstar Geographics, y la Comunidad de Usuarios de SIG.

2 MARCO GEOLÓGICO

2.1 Volcán Copahue

El volcán Copahue es un estratovolcán de tipo escudo (Polanco et al., 2000), de composición principalmente andesítica, ubicado en la zona volcánica central sur del Pacífico (Naranjo & Polanco, 2004). El volcán comenzó a mostrar actividad desde el Plioceno, y sus depósitos actuales constan de emisiones cuaternarias de tipo andesítica a basáltica (Melnick et al., 2006). Posee múltiples cráteres en su superficie, así como fumarolas constantes a lo largo del tiempo (SERNAGEOMIN, 2017). En su interior, posee un lago ácido llamado El Agrio, además de una cobertura glaciaria permanente en superficie (SERNAGEOMIN, 2017).

2.1.1. Petrografía general del volcán Copahue

El basamento de este volcán está compuesto por la Formación Curamallín, que abarca desde el Eoceno al Mioceno Medio. La litología de esta formación consta de rocas volcanoclásticas y sedimentarias. Además, el volcán presenta rocas volcánicas de la Formación Trapa Trapa y Cola de Zorro, pertenecientes al Mioceno Bajo y Plioceno (Naranjo & Polanco, 2004).

2.2.1.1. Estratigrafía del volcán Copahue

La secuencia estratigráfica del volcán Copahue, definida por Melnick et al., 2006, está dividida en las etapas Preglaciaria 1, Singlaciaria 2 y Postglaciaria 3, las cuales constan de:

Etapa Preglaciaria 1: Consiste principalmente en una masa compuesta de lavas y en menor medida de flujos piroclásticos de textura vítrea, con un espesor constante de 1.000 metros. Sin variaciones relevantes en esta característica a lo largo de toda su extensión. Las rocas que componen esta sección son principalmente de composición basáltico-andesítica a andesítica (Melnick et al., 2006).

Etapa Singlaciaria 2: Formada durante emisiones de lava que generaron una menor potencia de depósitos en comparación a la etapa preglaciaria. Estos depósitos se concentraron principalmente en

el flanco sureste del volcán, acumulándose en la cumbre plana de una montaña de lava en esa sección del volcán (Melnick et al., 2006).

La morfología de esta etapa es de tipo domo, con una superficie de aproximadamente 5,5 km² con espesores promedio de 300 metros de depósito. Por otro lado, la composición de estos depósitos varía de andesítica a dacítica (Melnick et al., 2006).

Etapa Postglaciar 3: Principalmente caracterizada por actividad explosiva con poca emisión de lavas. Estas provinieron de cráteres secundarios, fisuras laterales, así como conos monogenéticos piroclásticos. Los depósitos piroclásticos cubren los depósitos morrénicos que podrían ser atribuibles a la última glaciación. De igual manera los depósitos se concentraron en las cumbres de cráteres en el norte y el oeste (Melnick et al., 2006).

Composicionalmente, estos depósitos se caracterizan por ser bloques de lava masivos de composiciones basáltico-andesíticas, a lo largo de toda su extensión (Melnick et al., 2006).

2.1.2. Contexto estructural y morfología del volcán Copahue

Este edificio volcánico se encuentra asociado a la falla Zona de Falla Liquiñe Ofqui (Melnick et al., 2006). Esta estructura se extiende a distancias mayores a los 950 kilómetros y ha sido descubierta durante el último siglo, manifestándose como uno de los lineamientos más representativos en Chile (Steffen, 1944). La cinemática de esta estructura es de predominante desplazamiento lateral dextral y de movimiento inverso dip-slip en la falla, con cizallamiento dúctil del Mioceno y parte del Plioceno, además de una zona de cizallamiento frágil dextral desde el Plioceno hasta el Cuaternario (Cembrano, 1992; Cembrano & Hervé, 1993; Lavenu and Cembrano, 1994; Cembrano et al., 1996a, b; Lavenu et al., 1997; Cembrano et al., 1997; Cembrano, 1998 en Lavenu & Cembrano, 1999). La configuración tectónica aportada por esta falla le da al volcán Copahue una morfoestructura alargada hacia el NE, siguiendo la tendencia de la falla (Melnick et al., 2006).

2.1.3. Emisiones históricas

Petrinovic et al., 2014 menciona sobre el registro histórico del volcán Copahue desglosado en:

El volcán Copahue ha tenido al menos seis ciclos eruptivos con registro histórico, los mismos corresponden a: 2012, 2001(?), 2000, 1992, 1961, 1937, 1867(?), 1759 (?) y 1750 (Pesce, 1989; Linares et al., 1999; Varekamp et al., 2001, 2006; Polanco, 2003; Melnick et al., 2006; Agosto et al., 2013). Únicamente tres de estas erupciones cuentan con descripciones geológicas, y corresponden a las de 1992 (Delpino & Bermúdez 1993), la de 2000 (Naranjo & Polanco 2004) y la de 2012 (Petrinovic et al. en prensa). Estos estudios han constituido la base para el desarrollo del mapa de riesgo de este volcán (Delpino & Bermúdez 1995) (Pág. 139).

A su vez el autor Petrinovic et al., 2014 complementa que:

Por otra parte, las erupciones previas a 1992 -como las de 1937 y 1961- son poco conocidas, tanto en base a reportes, como al registro geológico (limitado por la baja preservación que tienen los productos volcánicos de volumen reducido en el ambiente andino). Por ello, brindamos a continuación información referida al significativo hallazgo de un depósito de una corriente piroclástica ocurrida en las últimas décadas. (Pág. 139)

2.1.4. Situación de peligro actual y riesgo específico

Este volcán tiene asociados principalmente eventos de emisión de fumarolas freáticas a freatomagmáticas a lo largo de su historia registrada, así como la presencia del lago ácido que puede generar eventos freáticos explosivos (SERNAGEOMIN, 2017).

El Servicio Nacional de Geología y Minería Chilena clasifica este volcán en la categoría de tipo II además de ubicarla en el puesto número 18 en su ranking de riesgo específico.

2.2 Volcán Callaqui

Por el otro lado el volcán Callaqui al igual que el volcán Copahue es un estratovolcán el cual se encuentra ubicado en la Zona Volcánica Sur de los andes (ZVS) (Polanco & Naranjo, 2008). Este tiene una composición principalmente andesítica a basáltica y tiene asociadas a lo largo de su historia 5 erupciones en 260 años, siendo actualmente predominante la emisión de fumarolas de forma intermitente (Polanco et al., 2000).

2.2.1. Petrografía del volcán Callaqui

Moreno y Lahsen (1987) definen el Callaqui en base a cuatro unidades principales, enumeradas del 1 al 4 las cuales consisten en:

Unidad Callaqui 1: Secuencias de lavas andesíticas a basalto andesíticas con existencias de probables aglomerados laháricos, la secuencia yace en discordancia erosiva al basamento y subyace en el mismo tipo de discordancia a la unidad Callaqui 2 (Moreno & Lahsen, 1987).

Posee espesores variables entre los 5 a 40 metros de espesor con rocas afectadas por la erosión glaciaria debido a la existencia de valles en forma de “U” y de circos glaciares. La disposición y espesores de estas rocas permiten interpretar un origen eruptivo fisural desde el estero Ñireco hacia el noreste con longitud de 6 km de extensión (Moreno & Lahsen, 1987).

La petrografía de esta secuencia consta de basaltos de olivino y de andesitas basálticas de clinopiroxenos, en este caso augita además de olivino (Moreno & Lahsen, 1987).

Unidad Callaqui 2: Consiste en secuencias en brechas volcánicas con buena estratificación, las cuales se encuentran depositadas sobre la excavación producto de los valles glaciares en forma de “U” que afectaron a la unidad previa (Moreno & Lahsen, 1987).

Esta secuencia es la que presenta predominancia en la cumbre del volcán en cuestión, producto de la erosión de glaciares en las laderas (*slope glaciers*), se puede ver la secuencia de forma variante a lo largo del volcán Callaqui, estando ubicado en los flancos occidentales en el río BioBío, noroccidental en el río Pangué y al sur en el río Malla (Moreno & Lahsen, 1987).

Presenta bancos que varían entre 2 a 8 metros de espesor, así mismo, de forma intercalada presentan coladas basálticas a andesítico basáltica de 5 a 10 metros de espesor y niveles menores de ceniza y lapilli de tonalidad amarilla-ocre. La secuencia completa se extiende con una potencia de 300 metros (Moreno & Lahsen, 1987)

Respecto a la petrografía se compone de lavas basálticas de olivino y piroxeno, así como de andesitas basálticas de piroxeno y de olivino (Moreno & Lahsen, 1987).

Unidad Callaqui 3: Consistente en coladas de composición basáltica, andesítica y andesítica basálticas, las cuales de forma similar a lo sucedido en la unidad anterior se encuentran depositadas sobre la excavación de cauces fluviales y glaciares sobre la Unidad Callaqui 2 (Moreno & Lahsen, 1987).

Las emisiones que dieron origen a esta secuencia provinieron de diferentes cráteres que se veían orientados debido a 3 fisuras paralelas y adyacentes con direcciones de N50°-60°E. En lo que respecta a la distribución de las coladas estas van de sureste a noroeste y en menor medida al oriente, así como al occidente (Moreno & Lahsen, 1987).

Unidad Callaqui 4: Como parte de los depósitos más jóvenes consta de pequeños centros de emisión como cráteres, conos piroclásticos y los flujos de lavas asociados a estos, la unidad se encauzo en diferentes valles y excavo los restos de la unidad anterior. El sistema fisural es la zona donde se encuentra más focalizada la emisión (Moreno & Lahsen, 1987).

Petrográficamente el volcán consta de andesitas basálticas de olivino y augita, así como rocas de composición más ácida siendo estas andesitas vítreas de augita (Moreno & Lahsen, 1987).

2.2.2. Contexto estructural del volcán Callaqui

El volcán Callaqui se formó bajo condiciones de tipo extensional NE-SO debido a la Zona de falla Liquiñe-Ofqui la cual tuvo efecto sobre los volcanes de edad Pleistoceno superior-Holoceno (Stern et al., 2006 en Polanco & Naranjo, 2008). La morfología del volcán es compleja debido a su contexto fisural, dando una morfología tipo cono-fisura, la cual se extiende en dirección noreste-suroeste (N50°-60°E) (Moreno & Lahsen, 1987).

2.2.3. Emisiones históricas y prehistóricas

El registro histórico del volcán según Moreno y Lahsen (1987) consta de la siguiente lista, donde la simbología (?) representa “actividad no confirmada”:

1987: Actividad fumarólica con emanaciones sulfurosas

1980 en Octubre: Liberación de cenizas

1966-1978: Emisiones de luz rojizas desde la fumarola principal sumados a eventos de avalancha.

1974-1978: Fumarólica.

1000 (?) A. P.-1974: No hay registro.

2.500 (?) A. P.-1000 (?) A.P: Acciones efusivas con ciertos eventos explosivos (Unidad Callaqui 4)

9.500 (?) A. P.-2.500 (?) A, P: Acciones efusivas con ciertos eventos explosivos (Unidad Callaqui 3)

90.000 (?) A. P.-11.000 (?) A. P: Acciones efusivas con ciertos eventos explosivos (Unidad Callaqui 2)

200.000 (?) A. P.-90.000 (?) A. P: Acciones efusivas con ciertos eventos explosivos (Unidad Callaqui 1).

2.2.4. Situación de peligro actual y riesgo específico

La presencia de un casquete glaciar en su cima vuelve potencial la generación de flujos de tipo laháricos ante eventos eruptivos o explosivos, estos sucesos se ven potenciados por la presencia de valles que pueden verse afectados por esta clase de movimientos de material, entre ellos el río Malla, Ralco, Quillaicahue y el Pangue (SERNAGEOMIN, 2017).

El Servicio Nacional de Geología y Minería Chilena clasifica este volcán en la categoría de tipo II ubicándolo en su ranking de riesgo específico en la posición 20.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 Peligros asociados a la presencia de volcanes

Dentro de los diferentes eventos que pueden presentar este tipo de volcanes los cuales están definidos por Loughlin et al. (2015) se contemplan: La caída de tefra y ceniza volcánica, terremotos de origen volcánico y emisión de gases los cuales presentan las siguientes características:

Tefra y ceniza volcánica: Se cataloga como ceniza volcánica aquellos fragmentos menores a 2 mm y que está vinculada a eventos eruptivos. (Zimanowski et al., 2003) las cuales pueden ocasionar daños a la salud respiratoria existiendo reportes de ataques de asma, la cual aumenta en las personas con un sistema respiratorio vulnerable como asmáticos o personas mayores, así mismo se encuentra asociada a enfermedades crónicas como la silicosis (Horwell & Baxter, 2006). Además de daños a casas, plantas y animales que perjudica el desarrollo normal de actividades (Wilson et al., 2014).

Terremotos de origen volcánicos: Comúnmente de baja magnitud la cual puede ser menor o igual a 5M, estos se generan principalmente por el movimiento del magma y la presión que este genera, lo normal es que sean recurrentes antes de las erupciones volcánicas (Loughlin et al., 2015).

Lahares y remociones: Los lahares son flujos de lodo volcánico rápidos que consisten en una mezcla de restos volcánicos y agua. Estos pueden destruir puentes, carreteras, enterrar edificios y bloquear rutas de escape. Los lahares pueden tener un impacto directo en áreas a varias decenas de kilómetros de un volcán, y también pueden causar riesgos de inundaciones a distancias aún mayores. Estos eventos pueden ocurrir debido a lluvias intensas sobre ceniza y restos volcánicos no consolidados, o como resultado de la actividad volcánica que derrite glaciares en la cumbre o provoca erupciones en lagos de cráter. (Loughlin et al., 2015)

Emisión de gases: Los gases emitidos del volcán pueden ser nocivos al estar constituidos de dióxido de carbono, azufre, cloro y otros elementos peligrosos para la salud respiratoria de la población, sin embargo, la mayoría de las emisiones constan de principalmente de vapor de agua (Loughlin et al., 2015).

3.2 Tipos de emisiones fumarólicas

Con respecto a los tipos de fumarolas presentes en estos volcanes se pueden dividir entre las freáticas y las freatomagmáticas:

Fumarola freática: Se consideran eventos donde el agua superficial entra en contacto con una zona geotérmicamente activa, lo cual genera una emisión de vapor a la atmósfera, siendo en términos generales eventos de poca intensidad con volúmenes menores a los $0,01 \text{ km}^3$ (Aizawa et al., 2022).

Fumarola freatomagmáticas: White (1996) considera las emisiones freatomagmáticas como la interacción de cuerpos magmáticos que entran en contacto con aguas subterráneas dando lugar a una actividad explosiva debido a una gran generación de vapor a presión.

3.3 Incandescencias

Otro fenómeno esperable en volcanes con actividad eruptiva con emisión de gases son las llamadas incandescencias, las cuales son generadas debido al reflejo de la lava en los gases expulsados por el volcán, esto emite una especie de luz de intensidad variable (Emmons, 1963).

4 METODOLOGÍA Y MATERIALES

4.1 Ubicación y características de las imágenes

Las imágenes fueron tomadas por una cámara estacionaria en la ciudad de Caviahue en el caso del volcán Copahue, la cámara apunta hacia el Oeste desde el lado argentino y dichas imágenes, así como la cámara fueron un aporte de la compañía ENEL. En el caso del volcán Callaqui el dispositivo fotográfico está ubicado en las proximidades de la laguna El Barco, mirando hacia el Este, dadas por la misma empresa. En la Figura 3.1 se pueden observar las vistas ofrecidas por la cámara al volcán Copahue, las imágenes para ambos casos están en una resolución 640 x 480 píxeles y durante todo el periodo de las fotografías analizadas estas no fueron movidas de ese sitio.

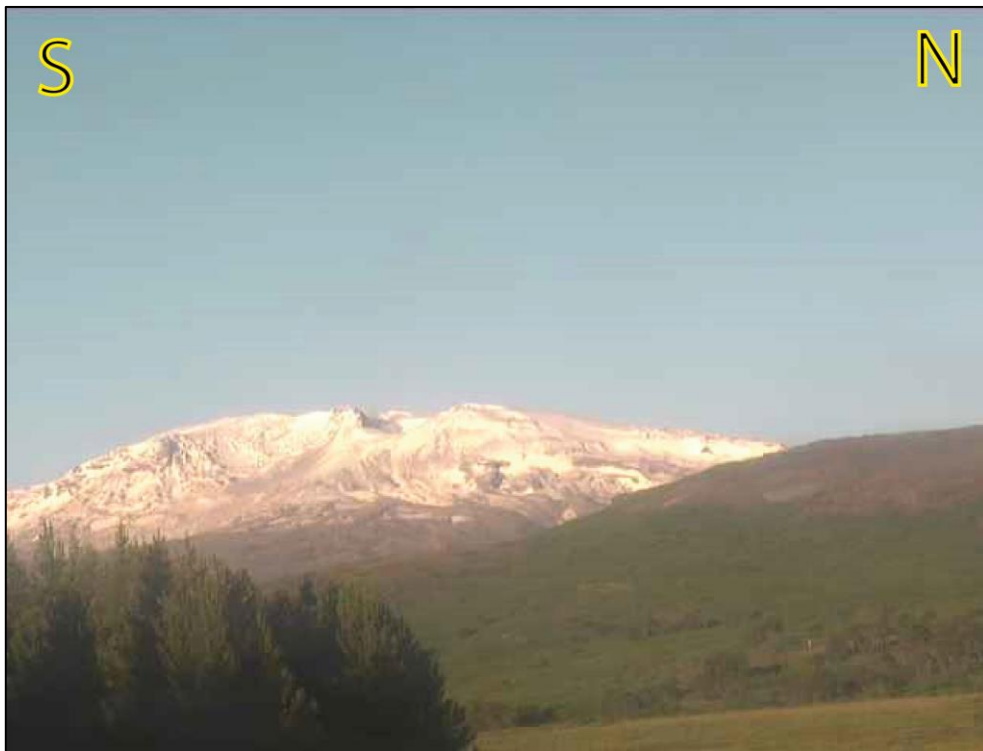


Figura 3.1 Vista de cámara hacia el volcán Copahue apuntando hacia el Oeste.

Las imágenes de ambos volcanes fueron tratadas en la cabina 4 ubicada en la Universidad de Concepción, lugar donde se facilitaron el hardware donde se almacenan las imágenes, así como de los computadores los cuales serán usados para el trabajo de clasificación de los diferentes estados de ambos volcanes. El software igualmente fue aportado por el equipo de trabajo, este consiste en un programa que agrupa las imágenes en función del día, las cuales luego son mostradas en pantalla y se dan las opciones de clasificación en base al criterio del clasificador, así mismo la fecha, hora y minutos aparecen representados en la sección derecha de la pantalla (ver Figura 4.1)

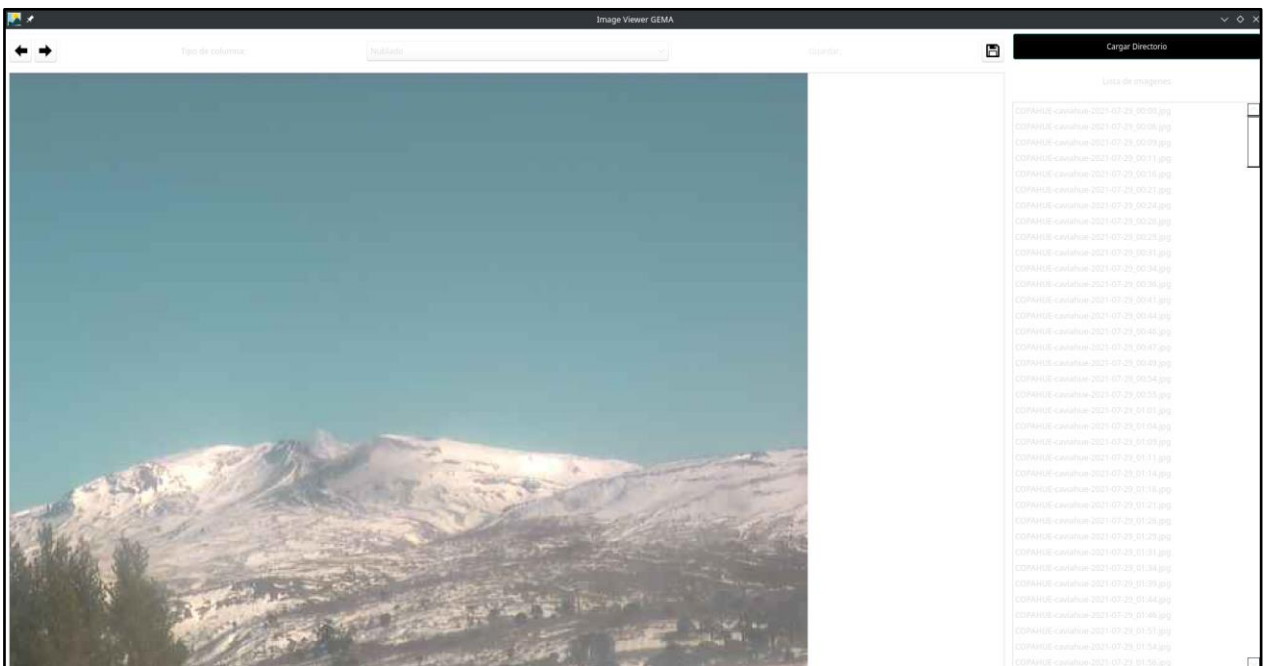


Figura 4.1 Interfaz utilizada para la clasificación cada de cada imagen tomada en intervalos de 4 a 5 minutos. En la sección superior, el clasificador selecciona la mejor alternativa para la imagen en ese momento. La sección derecha proporciona una orientación temporal del momento en el que se tomó la imagen.

4.2 Proceso de clasificación y anotaciones diarias

La clasificación buscará entregar imágenes etiquetadas por un operador humano para posteriormente ser aplicadas en procesos de inteligencia artificial, que requieran este tipo de base de datos. Estas se basarían en el aprendizaje mediante el sistema del *Deep Learning*¹, el cual contará con estos datos de alta calidad al ser etiquetados a mano, así como de disponer de un gran número de imágenes para su correcta implementación en este sistema.

El software o programa usado en la clasificación entrega 6 tipos de clasificación en función de lo que el operador estime. Estas son: freática, freatomagmática, nublado, incandescencia, sin señal e indeterminado. Los criterios de evaluación para cada serán descritos posteriormente. Las clasificaciones para cada imagen las que son guardadas en un archivo tipo Excel donde se registrarán el código de cada imagen, el cual consta de la cámara a la que pertenece la imagen, así como la fecha y hora de esta.

El procedimiento descrito se enriquece con la inclusión de anotaciones diarias que registran el comportamiento global del volcán a lo largo del día y cualquier evento anómalo significativo asociado al mismo. Estas anotaciones diarias son realizadas por el operador y abordan aspectos generales relevantes, como el tipo de fumarola presente (freática, freatomagmática, o una combinación de ambas), el tamaño de la fumarola y la intensidad de la incandescencia, cuando sea pertinente. Este enfoque permite una monitorización detallada y continua de la actividad volcánica para mejorar la comprensión y la capacidad de respuesta ante posibles riesgos.

4.3 Descripción de las variables cualitativas a clasificar

Freática: Esta clasificación hace referencia a las fumarolas con emisión de gases principalmente de agua, por lo tanto, se caracteriza por emisiones de vapor mayormente a blanquecinas, a levemente

¹ El Deep Learning, o aprendizaje profundo, es un subconjunto del Machine Learning. Esencialmente, es una red neuronal con tres o más capas que intenta emular el comportamiento del cerebro humano. Estas redes neuronales permiten a los sistemas aprender de grandes cantidades de datos y realizar predicciones con gran precisión (IBM, 2023)

grisáceas por acción de la sombra de las nubes, así mismo su tamaño puede variar más el criterio primordial es el color (Ver figura 5.1 para referencia visual).



Figura 5.1 Columna freática típica del volcán Copahue. La imagen muestra la coloración blanquecina típica del alto contenido de vapor.

Freatomagmática: Al ser mayormente emisión de ceniza y material fino este mostrará colores grisáceos a negruzcos. Al igual que en el caso freático, el tamaño de esta será variante en función del evento, siendo, por tanto, el único factor determinante el color que manifieste en ese momento a la hora de la clasificación.



Figura 5.2

Columna típica freatomagmática del volcán Copahue. Se muestran colores grisáceos a tonalidades negruzcas por el contenido de ceniza y material fino.

Nublado: Está siendo uno de los objetivos principales viene asociado a la presencia de nubes que cubran la parte superior del cono, haciendo esto muy difícil la clasificación de la fumarola mediante observaciones meramente visuales (ver Figura 5.3). La presencia o ausencia de estas nubes, así como de su tamaño y coloración serán variantes en función de la estación, más el único criterio para recurrir a esta clasificación es la imposibilidad de generar una clasificación de fumarola o incandescencia debido a su presencia.



Figura 5.3 Estado “Nublado” del volcán Copahue. Las nubes recubren completamente el cráter imposibilitando clasificar la existencia o no existencia de actividad subáerea.

Incandescencia: Debido a su característica luminiscente únicamente es posible verla durante periodos oscuros sin presencia intensa de luz solar, estos casos son durante las noches o aproximándose la puesta de sol, cuando la luz externa es menos intensa y por tanto la luz de la incandescencia es más intensa. Los contextos anteriores darán la presencia de esta luminosidad en diferentes intensidades, así mismo la presencia de esta incandescencia siempre estará ubicada en la misma ubicación, es decir, en la zona superior del cono volcánico (ver Figura 5.4).



Figura 5.4 Incandescencia típica del volcán Copahue. Caracterizada por la existencia de luminosidad en el cráter, fácilmente determinable durante la noche o madrugada.

Indeterminado: Utilizado cuando es imposible determinar ninguna de las anteriores situaciones, esta mayormente confinado a instancias nocturnas donde ni las fumarolas, ni la presencia de nubes es posible de ratificar ni de desmentir, así como de la ausencia de la incandescencia que podría ser la más fácil de ver bajo estos contextos.

Sin señal: Se determinará “Sin señal” en 2 situaciones distintas, las cuales constarían de imágenes parcialmente generadas, donde se presentará interferencia dificultando o imposibilitando cualquiera de las clasificaciones anteriores. La imagen será similar a la Figura 5.5 la cual es la

imagen predeterminada por la cámara cuando no se pueden tomar las imágenes. Así mismo en ocasiones se mostrará un cartel en la imagen con la frase “Sin Señal” aportada por la misma imagen.



Figura 5.5 Situación común de “Sin Señal”. Mostrándose como un mensaje advirtiendo que la cámara no se encontraba operativa para el momento de tomar la fotografía en el momento correspondiente.

Las clasificaciones a lo largo del día serán ponderadas y consideradas para una visión general del día, las cuales consideraran 2 características adicionales, las cuales son:

Tamaño de la fumarola: Se considerará tres estados de la fumarola en relación con su tamaño a lo que se puede observar en la Figura 6.1, donde a será tomada como tamaño diminuto, b será tomada como mediano y c será interpretada como grande.



Figura 6.1 Vista continua de las 3 variaciones de tamaño consideradas para el volcán Copahue.

Intensidad de la incandescencia: Cuando sea visible se interpretarán 3 estados de incandescencia distintos determinados en base al criterio de la Figura 6.2 donde a será considerada una incandescencia mínima, b como una incandescencia media y c como una incandescencia intensa.

















Figura 6.2 Vista continua de las 3 variaciones de la intensidad de la incandescencia.

Para un mejor entendimiento de la información se tomará como tales eventos relevantes en el día, así como exóticos, dando pie a que si un evento es muy significativo en el día este recubra toda la observación durante el día. Por ejemplo: Un evento de incandescencia muy intensa de escasos minutos será suficiente para que el día en su totalidad sea remarcado por ese suceso siendo esa su clasificación. Situaciones como la anterior serán para evitar perdida de sucesos relevantes en la masa de datos recolectados.

Los días vistos serán dibujados en gráficos mensuales basándose en coloraciones para los diferentes reportes, la leyenda utilizada, así como las diferentes etiquetas están vistas en la Tabla 1.1 donde se subdivide el lenguaje usado en los gráficos. Por el otro lado los gráficos consistirán en tablas con 3 barras de colores que representarán el tipo de fumarola, tamaño de la fumarola y la intensidad de la incandescencia. Estos gráficos serán en su mayoría mensuales para evitar pérdidas de detalle, por tanto, situaciones donde la información sea escasa ya sea por falta de imágenes para un día en particular o no consideración de un cierto intervalo de tiempo se podrá recurrir a que la misma tabla grafique más de un mes en concreto.




Tabla 1.1 Leyenda asignada. Las estimaciones para el tamaño de la fumarola están basadas en parámetros cualitativos teniendo en consideración los aspectos dichos en las secciones 4.2 y 4.3 mismo caso para la intensidad de la incandescencia.

Tipos de Fumarola		Tamaño de Fumarola	Intensidad de la Incandescencia
	Freática	 Diminuta	 Mínima
	Freatomagmática	 Mediana	 Media
	Nublado	 Grande	 Intensa
	Sin Fumarola	 Divisoria cada 1 días  Divisoria cada 5 días	
	Sin Señal		
	Variante		

Las barras de colores fueron hechas mediante la herramienta Excel donde a cada celda se le asignó un color en función de la observación diaria, esto para los 3 criterios usados, las barras se dispondrán de forma paralela y horizontal para ayudar a la búsqueda de algún patrón o de comportamiento repetitivo, se dispondrán de líneas grises para separación de los días y de líneas

gruesas negras para los intervalos de 5 días. Estos colores y estados serán dibujados en la Tabla 1.2 (tabla ejemplo) las cuales serán mostradas con sus correspondientes observaciones graficadas en la sección anexos de este mismo texto.

Tabla 1.2 Formato de representación de los resultados obtenidos. La largo de un intervalo de tiempo definido en su título.

	Registro del 01-10 al 31-10
Tipo de Fumarola	
Tamaño de fumarola	
Intensidad de Incandescencia	

5 RESULTADOS

5.1 Compilación de datos de observaciones y clasificaciones del volcán Copahue

El análisis contemplo la clasificación de 63.517 imágenes con una separación de 5 minutos por imagen para el volcán Copahue cuales consideran de forma intermitente los años 2019, 2020, 2021 y 2022, gran parte del registro fotográfico es continuo más solo se consideraron los periodos de actividad ya sea aislada, como en el caso de eventos de emisión de fumarola de uno o un par de días, así como por otra parte continua en caso de eventos donde la fumarola mantuvo una presencia constante a lo largo de los meses ya sea esta importante o diminuta, tratando, en caso de que el clima lo permita, que el registro sea hasta que la fumarola cese en su actividad completamente.

1.- Desglose generalizado del 2019: El periodo de actividad registrada fue muy bajo y se concentró entre el 30 de septiembre y el 13 de noviembre del mismo año. En la Tabla 2.1 se resume el comportamiento diario en forma generalizada. El volcán mostró mayormente una actividad alternante entre freatomagmáticas y freáticas, principalmente caracterizadas por emisiones débiles. Es importante destacar que la interpretación de este periodo se ve dificultada por la existencia de nubes, un fenómeno común en esta estación del año, lo que puede afectar la visibilidad.

Tabla 2.1 Registro de comportamiento de fumarola diario 2019 en base a la tendencia mostrada a lo largo del ese día en concreto.

	2019
Freatomagmática	52
Freática	26
Freatomagmática/- Freática	2
Sin Fumarola	4

2.- Desglose generalizado del 2020: La sección consta desde el 3 de mayo hasta el 7 de diciembre, siendo un periodo más amplio en revisión donde se revisaron íntegramente todos los días sin interrupción, los cuales consideran desde el comienzo de la actividad con fumarola freática pequeña, hasta el fin de las emisiones en su totalidad. La Tabla 2.2 muestra la amplia cobertura para la actividad subárea del volcán Copahue.

Tabla 2.2

Registro de comportamiento de fumarola diario 2020 en base a la tendencia mostrada a lo largo del ese día en concreto.

	2020
Freatomagmática	43
Freática	67
Freatomagmática/- Freática	25
Sin Fumarola	13

3.- Desglose generalizado del 2021: Este lapso considera desde 6 de junio con una leve columna freática hasta el 2 de Julio donde la columna se volvió enana e intermitente, esto la convierte en el periodo de revisión más corto. La Tabla 2.3 identifica que similar al caso anterior hubo una amplia cobertura en los días registrados para actividad tanto subárea como sin actividad.

Tabla 2.3 Registro de comportamiento de fumarola diario 2021 en base a la tendencia mostrada a lo largo del ese día en concreto.

	2021
Freatomagmática	55
Freática	5
Freatomagmática/- Freática	6
Sin Fumarola	14

4.- Desglose generalizado del 2022: Esta sección contempla desde el 3 de noviembre con leves fumarolas freáticas hasta el 29 de noviembre donde ya la fumarola no muestra ningún indicio de presencia observable. La Tabla 2.4 muestra escaso contenido debido a falta de información debido que en esa sección la cantidad de días fotografiados disminuyo dramáticamente.

Tabla 2.4 Registro de comportamiento de fumarola diario 2022 en base a la tendencia mostrada a lo largo del ese día en concreto.

	2022
Freatomagmática	2
Freática	6
Freatomagmática/- Freática	2
Sin Fumarola	6

Todo lo anterior nos deja con un saldo de días totales por año de 84 días para el 2019, 148 para el año 2020, unos 80 días para el 2021 y finalmente 16 días para el año 2022, dando en total 328 días de observación diaria. La distribución detallada a lo largo de los meses del año se encuentra en las tablas en la sección anexos de este mismo documento.

5.2 Compilación de datos de observaciones y clasificaciones del volcán Callaqui

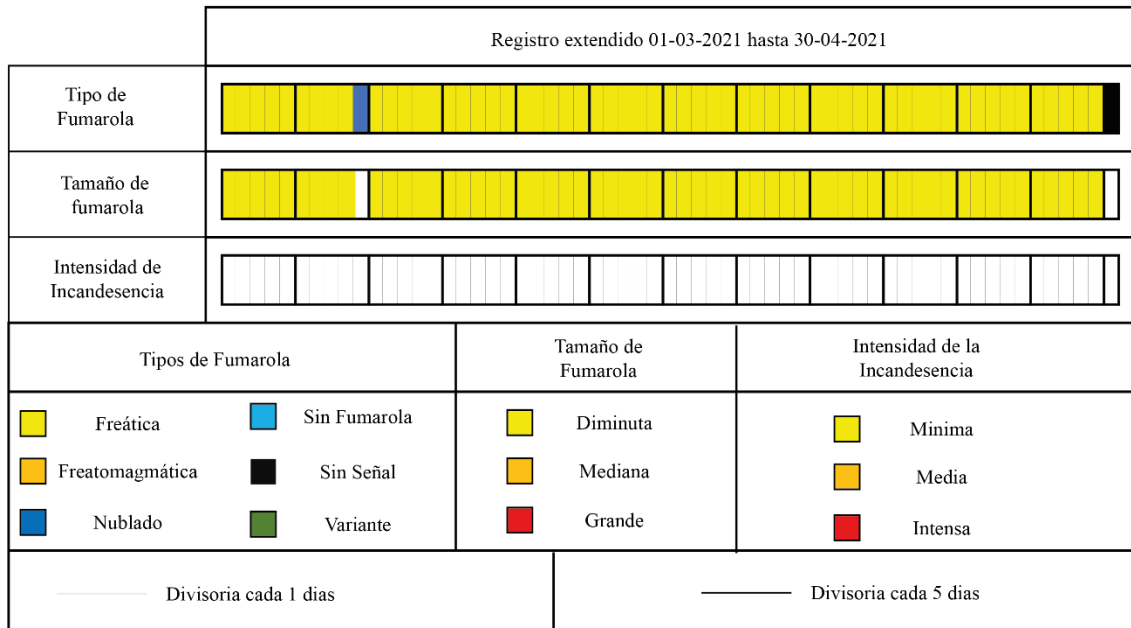
El volcán Callaqui comprendido una compilación de 500 días en los cuales se dio comienzo el 1 de enero del año 2021 y se hizo un corte en las observaciones el 13 de mayo del año 2022. Las observaciones recolectadas en el Callaqui presentan una tendencia ampliamente repetitiva, el volcán presenta una constante fumarola freática de un tamaño apenas apreciable durante todo el lapso de observación (Figura 7.1).



Figura 7.1 Columna freática típica del volcán Callaqui, característica por su diminuto tamaño cosa que hace incluso difícil una correcta clasificación del tipo de columna a la que corresponde.

En la Tabla 3.1 donde se toma una muestra de los 2 primeros meses del año 2021 (elegida de forma aleatoria) se puede dar constancia de un comportamiento invariante a lo largo del tiempo, visto interrumpido únicamente por periodos nublados donde es imposible realizar una correcta descripción y de periodos de nula señal o de cámara apaga, ya sea por posibles mantenciones o factores climáticos que dificultarían el correcto funcionamiento de la cámara.

Tabla 3.1 Registro de los meses de marzo y abril para el volcán Callaqui, el registro extendido muestra el comportamiento invariante del edificio volcánico.



El volcán presentó un periodo breve de 6 días donde el tamaño de la fumarola aumentó en una cantidad leve y presentando además una tenue incandescencia levemente observable (ver Figura 7.2), este suceso comenzó el 27 de enero y se disipó completamente el 1 de febrero, dando paso nuevamente a su comportamiento habitual a lo largo de las observaciones hechas.



Figura 7.2 Incandescencia vista durante el leve periodo de actividad del volcán Callaqui, distinguible por su ubicación en la cima del edificio volcánico con una luz puntual y constante visible durante la oscuridad

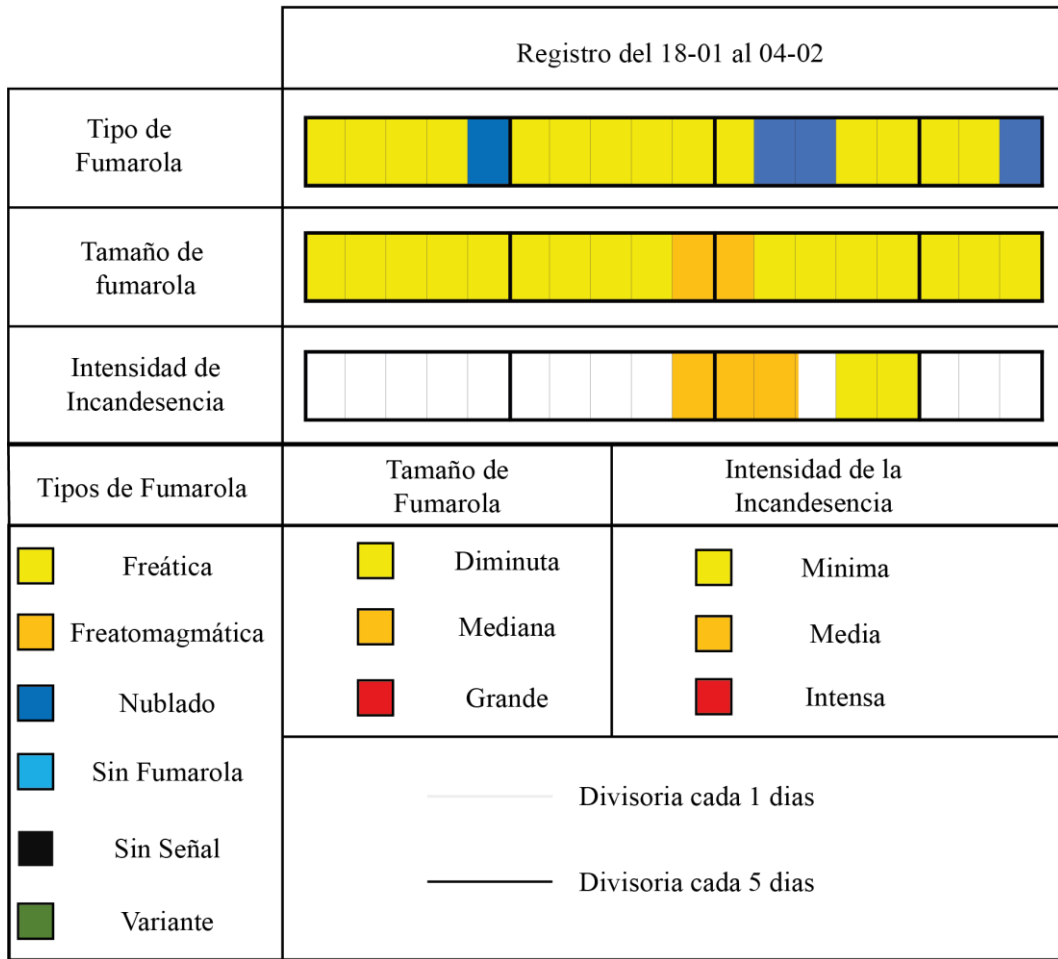
La columna freática mostro un comportamiento levemente anómalo a lo visto en toda observación a lo largo del tiempo (ver Figura 7.3), el comportamiento de la fumarola se mantuvo constante durante el periodo anómalo, disminuyendo rápidamente y volviendo a su estado recurrente como el visto durante toda la observación de este edificio volcánico, sin incandescencias visibles y con una columna freática minúscula.



Figura 7.3 Columna freática del volcán Callaqui durante el periodo de anomalía observada, la columna se distingue entre otros días debido a su densidad de vapor liberado y a la altura de la columna sin perder su integridad al ojo del espectador.

El comportamiento en este periodo anómalo se muestra en la Tabla 3.2, la situación excepcional se ve claramente en la presencia de incandescencia y en el aumento leve del tamaño de la fumarola, durante 2 días consecutivos, viéndose reduce nuevamente, pero con una incandescencia persistente de forma remanente un par de días después del término de la emisión freática anómala.

Tabla 3.2 Registro consecutivo de la anomalía, mostrando el comportamiento usual antes del periodo anómalo y después de este, la incandescencia comienza visible y con el paso de los días disminuye hasta desaparecer.

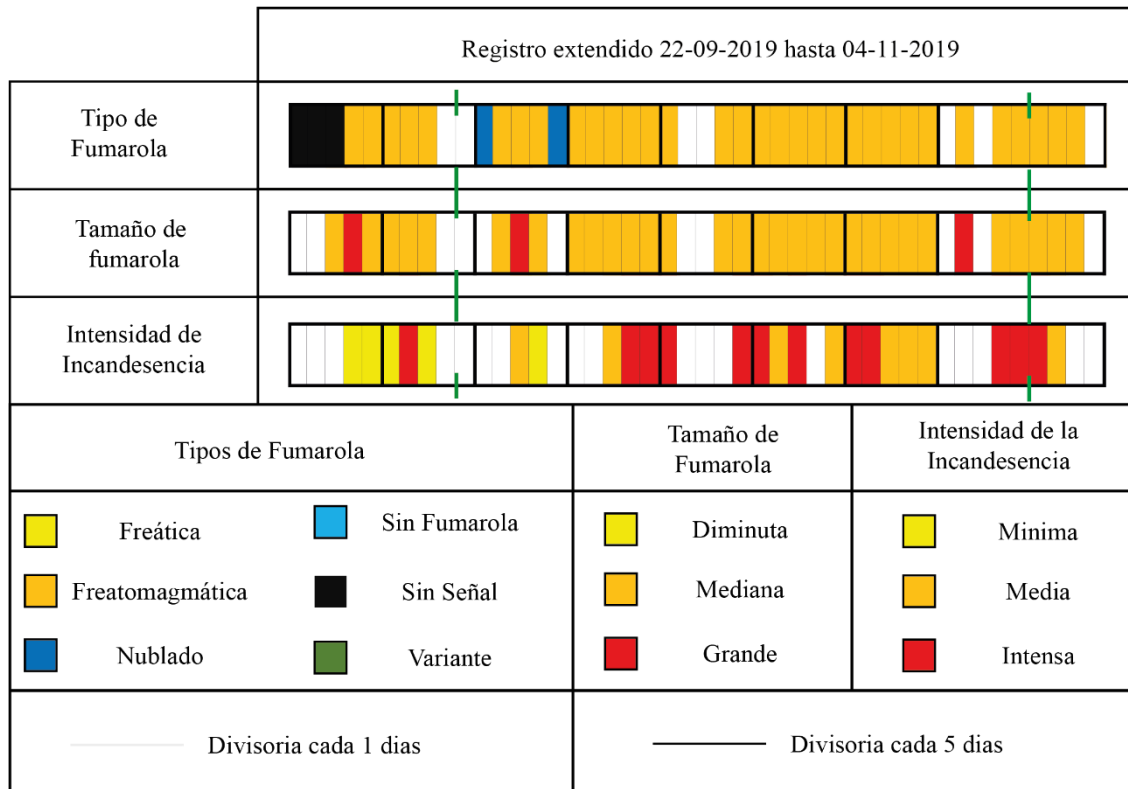


6 DISCUSIÓN

Las observaciones realizadas en el volcán Copahue muestran comportamientos alternantes de eventos freatomagmáticas seguido de eventos menos intensos de emisiones freáticas, cosa que concuerda con los registros del SERNAGEOMIN para erupciones más antiguas entre 2012-2013, así como aún más antiguas como 1992 y el año 2000.

El registro volcánico del Copahue durante el 2019 mostró una tendencia similar a la descrita por el SERNAGEOMIN en periodos contemporáneos. La Tabla 4.1 presenta el periodo más significativo del año 2019, donde se registraron periodos extensos de comportamiento freatomagmático con fumarolas de tamaño observable no despreciable. El comportamiento tiende a la emisión de cenizas y gases, según esta institución, se evidencia en los 3 días en los cuales el tamaño de la fumarola presentó una magnitud anómala, fuera de lo común. Adicionalmente, en el periodo mostrado, se observa una clara relación entre el inicio de eventos de gran emisión con constantes e intensas incandescencias, las cuales son primordialmente notorias en los periodos entre estas emisiones mayores de material fino.

Tabla 4.1 Registro extendido del periodo 22-09 a 04-11, las líneas discontinuas verdosas señalan el comienzo y termino del mes correspondiente.



Por otro lado, el volcán Callaqui posee un registro contemporáneo menos extenso y poco detallado, sin embargo, el SERNAGEOMIN describe la presencia constante de fumarola en la cima del edificio volcánico, teniendo además en cuenta que según esta misma institución su última erupción relevante fue en 1980.

La falta de registro eruptivo puede ser una muestra de la poca actividad importante o variante del volcán en los últimos años, cosa que se puede condecir con las observaciones donde el volcán presenta un bajo riesgo para la población circundante al menos en el corto plazo y en base al periodo observado cosa que se muestra por el ranking de riesgo que se le asigno, siendo este de 20 en

comparación al del Copahue que fue de 18, esto posiblemente atribuible a su comportamiento más “agresivo” en relación al tamaño de la fumarola, presencia de incandescencia y emisiones de ceniza.

7 CONCLUSIÓN

Si bien ambos volcanes están sometidos a proceso de formación similares y a encontrarse en el mismo lineamiento volcánico, con ambos presentando comportamiento fisural y por lo tanto sometidos a esfuerzos similares (Melnick et al, 2016), estos muestran comportamientos muy diferentes, vistos claramente tanto en la sección de resultados como en la sección de discusión.

El volcán Copahue muestra tendencias principalmente a emisiones freáticas a freatomagmáticas de mayor tamaño con presencia constante de incandescencia que es aún más fuerte en los periodos donde el volcán aumenta de sobremanera sus emisiones freatomagmáticas mostrándose como grandes y densas nubes grisáceas. Caso contrario al volcán Callaqui donde las emisiones se restringen a ser constantes a lo largo del tiempo, pero de un tamaño ínfimo y que al menos durante el periodo observable no se detuvieron.

El uso de cámaras para obtener análisis precisos y coherentes mostro un buen desempeño, no desviándose del registro y comportamiento contemporáneo de cada volcán, esto debido al buen ángulo en panorámica de todo el volcán y a los pocos periodos inactivos de estas para un registro continuo. Con respecto al sistema de clasificación tanto en factores más subjetivos como lo pueden ser el tamaño de la fumarola y la intensidad de esta mostraron ser un buen complemento a la hora de determinar algún patrón y/o anomalía en el volcán Copahue principalmente.

Producto de la calidad de las imágenes y aplicando correctamente metodologías para clasificación, estas pueden ser usadas en procesos de *Deep learning* las cuales precisamente requieren este tipo de imágenes, siendo una base sólida para procesos de clasificación automatizados y/o asistidos. Sin embargo, el uso de estas imágenes se ve muy sujeto a factores tanto estacionales debido a los periodos cambiantes de anochecer y de atardecer de en ciertos momentos del año lo cual puede reducir o aumentar el tiempo de visión efectiva de las emisiones subaéreas.

La metodología utilizada a la hora de clasificar no puede ser aplicada de manera universal para todos los volcanes, esto se concluye observando ambos volcanes, donde para impedir pérdida de información se debió recurrir a “disminuir” la escala de clasificación para el tamaño de la fumarola para impedir que el único evento levemente distinto sea lo más notorio posible por el método de representación de barras y colores usados.

8 RECOMENDACIONES

La metodología debe ser considerada en función de factores no siempre controlables del todo, uno de ellos siendo la calidad de la imagen, una mala calidad de la imagen puede llevar a errores en la interpretación, principalmente, de eventos como el tipo de fumarola, se debe tener una visión lo más clara posible de la morfología de la misma emisión para no confundirla con nubes, para esto es prescindible tener una clara vista de un origen coherente de la emisión. Otro factor a tener en cuenta es la iluminación, situación que puede generar confusión por parte del clasificador, esto teniendo en cuenta que debido a sucesos como la existencia de un gran volumen de nubes sobre el volcán estas harán sombra en la emisión, esto puede llevar a confundir ocurrencias como una emisión freática con una freatomagmática, llevando así a una mala clasificación, de igual manera en los periodos de atardecer y amanecer se puede ver el mismo fenómeno con el que igual se debe tener precaución.

Las observaciones como el tamaño y la cantidad de incandescencia al ser medidas subjetivas y dependientes tanto del tamaño del volcán, así como del ángulo del observador (esto al no ser capaz de medir la fumarola sino de estimarla visualmente) al observar la emisión se deben tener en cuenta a la hora de querer aplicar categorías al tamaño o altura de la fumarola. Así mismo se debe realizar con las incandescencias las cuales también deben ser categorizadas en función del clasificador.

Debido a que para esta metodología se requieren imágenes se puede complementar o ampliar el rango de información clasificada mediante el uso de cámaras infrarrojas para poder medir variables como la temperatura que emite la fumarola, o la incandescencia durante la noche, así mismo el uso de estas cámaras permitiría una mejor clasificación y seguimiento de las fumarolas de noche y analizar su comportamiento. De igual manera el uso de cámaras espectroscópicas también abriría otra ventana al análisis elemental de la fumarola, lo cual daría aún más datos y podrían generarse clasificaciones en base a la variación elemental.

REFERENCIAS

- Aizawa, K., Muramatsu, D., Matsushima, T., Koyama, T., Uyeshima, M., & Nakao, S. (2022). *Phreatic volcanic eruption preceded by observable shallow groundwater flow at Iwo-Yama, Kirishima Volcanic Complex, Japan*. *Communications Earth & Environment*, 3(1), 187.
- Agusto, M., F. Tassi, A.T. Caselli, O. Vaselli, D. Rouwet, B. Capaccioni, S. Caliro, G. Chiodini & Darrah, T. (2013). *Gas geochemistry of the magmatic-hydrothermal fluid reservoir in the Copahue-Caviahue Volcanic Complex (Argentina)*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 257: 44-56.
- Cembrano, J., Hervé, F., & Lavenu, A. (1996). *The Liquiñe Ofqui fault zone: a long-lived intra-arc fault system in southern Chile*. *Tectonophysics*, 259(1-3), 55-66.
- Delpino, D., & Bermúdez, A. (1993). *La actividad del Volcán Copahue durante 1992*. Erupción con emisiones de azufre piroclástico, Provincia del Neuquén, Argentina: 12° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas IV: 292-30.
- Delpino, D., & Bermúdez, A. (1995). *Mapa de riesgo volcán Copahue*. Mapas de Riesgo geológico, Servicio Geológico Neuquino, N° 1986.
- Emmons, W. H. (1963). *Geología: Principios y procesos* (5ta ed.). McGraw-Hill.
- IBM (2023). *¿Qué es Deep Learning?*. Recuperado el 25 de octubre de 2023, de <https://www.ibm.com/es-es/topics/deep-learning>.
- Linares, E., Osters, H.A. & Mas, L.C. (1999). *Cronología K-Ar del Complejo Efusivo Copahue-Caviahue, Provincia del Neuquén*. *Rev. Asociación Geológica Argentina* 54: 240-247.
- Loughlin, S. C., Sparks, R. S. J., Brown, S. K., Jenkins, S. F., & Vye-Brown, C. (2015). *Global volcanic hazards and risk*. Cambridge University Press.
- Melnick, D., Folguera, A., & Ramos, V. A. (2006). *Structural control on arc volcanism: The Caviahue–Copahue complex, Central to Patagonian Andes transition (38 S)*. *Journal of south american Earth sciences*, 22(1-2), 66-88.
- Moreno Roa, H., & Lahsen Azar, A. (1987). *El volcán Callaqui: ejemplo de volcanismo fisural en los Andes del sur (chile; 38° l.s.)*. *Revista De La Asociación Geológica Argentina*, 42(1-2), 1-8. Recuperado de <https://revista.geologica.org.ar/raga/article/view/793>.
- Naranjo, J. A., Moreno, H., Polanco, E., & Young, S. (2000). *Mapa de Peligros de los volcanes del Alto Biobío*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Documentos de Trabajo, No. 15.
- Naranjo, J. A., & Polanco, E. (2004). *The 2000 AD eruption of Copahue volcano, southern Andes*. *Revista geológica de Chile*, 31(2), 279-292.
- Pesce, A. (1989). *Evolución volcano-tectónica del complejo efusivo Copahue-Caviahue y su modelo geotérmico preliminar*. *Asociación Geológica Argentina Revista* 44: 307- 327.
- Petrinovic, I. A., Páez, G., Balbis, C., Guzmán, S., Villarosa, G., & Carniel, R. (2014). *Depósito de corriente piroclástica reciente (1963-64 AD?-1976 AD?) del volcán Copahue (I): evidencias*

geológicas de campo y edad radiocarbónica. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 71(1), 139-142.

Polanco, E., Naranjo, J. A., Young, S., & Moreno, H. (2000). *Volcanismo Explosivo Holoceno en la cuenca del alto Bío-Bío, Andes del Sur (37° 45'–38° 30' S)*. En IX Congreso Geológico Chileno, Puerto Varas, Chile (Vol. 2, pp. 59-61).

Polanco, E. (2003). *Evolución del volcán Copahue (37° 45' S) Andes del Sur*. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de México, 103 pág.

Polanco, E., & Naranjo, J. A. (2008). *COLAPSO HOLOCENO EN EL VOLCÁN CALLAQUI (37°55' S), ANDES DEL SUR*.

Steffen, H. (1944). *Patagonia occidental, las cordilleras patagónicas y sus regiones circundantes*. Descripción del terreno basada en exploraciones propias, con un bosquejo de la historia de las expediciones practicadas en la región.

SERNAGEOMIN. (2017). *Volcán Copahue*. Recuperado el 13 de diciembre de 2023, de <https://rnvv.sernageomin.cl/volcan-copahue/>.

SERNAGEOMIN. (2018). *Chile: territorio volcánico*. Servicio Nacional de Geología y Minería: 139 p. Santiago.

SERNAGEOMIN. (2023). *Equipo RNVV*. Recuperado el 25 de octubre de 2023, de <https://rnvv.sernageomin.cl/red-nacional-vigilancia-volcanica/>.

SERNAGEOMIN. (2023). *Volcán Callaqui*. Recuperado el 25 de octubre de 2023, de <https://rnvv.sernageomin.cl/volcan-callaqui/>.

SERNAGEOMIN. (2023). *Volcán Copahue*. Recuperado el 25 de octubre de 2023, de <https://rnvv.sernageomin.cl/volcan-copahue/>.

Varekamp, J.C., Ouimette, A., Hermán, S., Bermúdez, A., & Delpino, D. (2001). *Hydrothermal element fluxes from Copahue, Argentina: A "beehive" volcano in turmoil*. *Geology* 29: 1059-1062.

Varekamp, J.C., J. Maarten de Moor, M. Merrill, A. Colvin, A. Goss, P. Vroon & Hilton, D. (2006). *Geochemistry and isotopic characteristics of the Caviahue-Copahue volcanic complex, Province of Neuquén, Argentina*. Geological Society of America. Special Paper 407.

Wilson, G., Wilson, T. M., Deligne, N. I. & Cole, J. W. (2014). *Volcanic hazard impacts to critical infrastructure: A review*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 286, 148-182.

Zimanowski, B., Wohletz, K., Dellino, P., & Büttner, R. (2003). *The volcanic ash problem*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 122(1-2), 1-5.




	Registro del 01-10 al 31-10
Tipo de Fumarola	
Tamaño de fumarola	
Intensidad de Incandescencia	




	Registro del 01-11 al 30-11
Tipo de Fumarola	
Tamaño de fumarola	
Intensidad de Incandescencia	

	Registro del 01-12 al 31-12
Tipo de Fumarola	
Tamaño de fumarola	
Intensidad de Incandescencia	

Tablas de registro del 2020

	Registro del 01-01 al 18-01
Tipo de Fumarola	
Tamaño de fumarola	
Intensidad de Incandescencia	

	Registro del 04-05 al 31-05
Tipo de Fumarola	
Tamaño de fumarola	
Intensidad de Incandescencia	

	Registro del 01-06 al 30-06
Tipo de Fumarola	
Tamaño de fumarola	
Intensidad de Incandescencia	

Registro del 05-08 al 31-08	
Tipo de Fumarola	
Tamaño de fumarola	
Intensidad de Incandescencia	

Registro del 01-09 al 30-09	
Tipo de Fumarola	
Tamaño de fumarola	
Intensidad de Incandescencia	

Registro del 01-10 al 31-10	
Tipo de Fumarola	
Tamaño de fumarola	
Intensidad de Incandescencia	

Registro del 01-11 al 30-11	
Tipo de Fumarola	
Tamaño de fumarola	
Intensidad de Incandescencia	



Tablas de registro del 2021

	Registro del 01-06 al 30-06
Tipo de Fumarola	
Tamaño de fumarola	
Intensidad de Incandescencia	

	Registro del 01-07 al 31-07
Tipo de Fumarola	
Tamaño de fumarola	
Intensidad de Incandescencia	

	Registro del 01-08 al 31-08
Tipo de Fumarola	
Tamaño de fumarola	
Intensidad de Incandescencia	

Tabla de registro del 2022

	Registro del 13-11 al 29-11
Tipo de Fumarola	
Tamaño de fumarola	
Intensidad de Incandescencia	