

ESTUDIO DEL IMPACTO DE EMISIONES DE CENIZAS VOLCÁNICAS PROVENIENTES DEL VOLCÁN COPAHUE

Paez, P. A.¹; Caselli A. T.², Cogliati M.G.³ y Monasterio A. M.⁴

1: Escuela de Producción, Tecnología y Medio Ambiente
Universidad Nacional de Río Negro
e-mail: ppaez@unrn.edu.ar

2: Laboratorio de Estudio y Seguimiento de Volcanes Activos (LESVA)
Instituto de Investigación en Paleobiología y Geología
Universidad Nacional de Río Negro
e-mail: atcaselli@unrn.edu.ar

3: Departamento de Geografía
FACIAS - FAHU
Universidad Nacional del Comahue
e-mail: marisa.cogliati@fahu.uncoma.edu.ar

4: Centro de Salud Cavihue
Ministerio de Salud Neuquén e-mail: doctoramonasterio@hotmail.com

Resumen. *Entre el 01 de octubre y el 02 de diciembre del 2016 se registraron fuertes eventos de explosión en el volcán Copahue (provincia de Neuquén) que fueron acompañados con emisión de cenizas y de gases. En el presente estudio se evaluó el impacto de las cenizas volcánicas, para un área cercana a los centros poblados, atendiendo a las preocupaciones acerca de los riesgos para la salud de los pobladores mediante la recolección de cenizas volcánicas utilizando muestreadores pasivos y emisiones obtenidas a partir de observaciones satelitales provenientes del sensor Ozone Monitoring Instrument instalado en el satélite AURA (Aura/OMI). Se trabajó con los datos meteorológicos provenientes de Global Data Assimilation System (GDAS). La evaluación de la dispersión de las cenizas volcánicas se realizó utilizando el modelo de transporte Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) y los resultados se compararon con imágenes del satélite LANDSAT 8, en los cuales se observó coincidencias en la distribución espacial de los contaminantes. La caracterización geoquímica de las cenizas volcánicas se realizó a través del ensayo de lixiviación (de un lote único) de modo de determinar la presencia de aniones, cationes y de principales metales en la muestra, que puedan afectar la salud humana.*

Palabras clave: volcán Copahue, HYSPLIT, cenizas volcánicas, lixiviación

1. INTRODUCCIÓN

Las erupciones volcánicas perturban las concentraciones de aerosoles y gases en la troposfera y estratosfera, generando así un potencial impacto sobre el clima global, tráfico aéreo, en el ambiente (suelo, agua), en la calidad del aire; así como en los animales y los seres humanos [1], [2].

Los modelos de dispersión permiten interpretar y predecir las concentraciones de contaminantes causadas por las emisiones y evaluar el impacto de las plumas bajo diferentes condiciones meteorológicas: factores relacionados con la temperatura, velocidad del viento, estabilidad atmosférica y topografía [3].

El modelo de dispersión utilizado en el presente trabajo, es el Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model (HYSPLIT) desarrollado por el Laboratorio de recursos del aire de la NOAA (Air Resources Laboratory, ARL); y el cual el Centro de estimación de cenizas volcánicas (VAAC) lo aplica con datos meteorológicos de modelos de predicción numéricos [4].

El objetivo del presente trabajo es evaluar la dispersión de la pluma de emisiones del volcán Copahue a partir del análisis de muestreo in situ, mediciones satelitales y el modelado de la pluma de contaminantes; además caracterizar físico – químicamente los principales contaminantes aportados por el volcán Copahue a partir de sus emisiones entre el 1/10 y 4/12 de 2016 para atender las preocupaciones acerca de los riesgos para la salud de los pobladores que viven en cercanía del volcán.

2 ÁREA DE ESTUDIO

El volcán Copahue se encuentra en la frontera entre Argentina y Chile, cercano al volcán Callaqui, situado a 25 km al oeste ($37^{\circ} 51' 5'' S$ $71^{\circ} 10' W$). Consiste en un estratovolcán de composición principalmente andesítico, que posee nueve cráteres alineados, concentrándose la actividad más reciente en el cráter más oriental, que presenta una actividad fumarólica permanente y un lago ácido en su interior [5]. En cercanías al volcán se ubican dos centros poblados: la localidad de Cavihúe y Copahue (ver Figura 1).

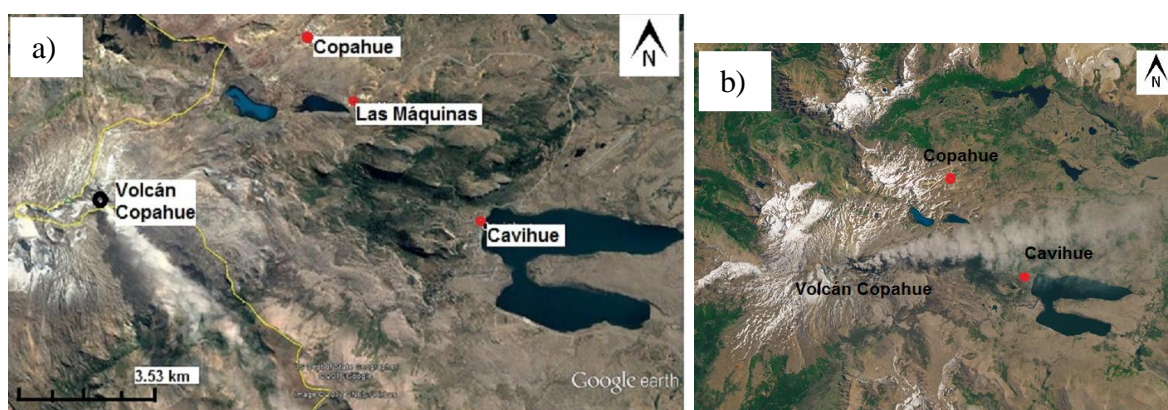


Figura 1 – a) Localización geográfica del volcán Copahue y principales áreas urbanas cercanas: Cavihúe y Copahue. b) Imagen del satélite LANDSAT 8 del día 03/12/2016.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Estudio de Emisiones

Entre el 01 de octubre de 2016 y el 04 de diciembre de 2016 se registraron fuertes eventos de explosión en el volcán Copahue (provincia de Neuquén) que fueron acompañados con emisión de cenizas y de gases. El Programa de vulcanismo Global (Global Volcanism Program, GVP) informó los movimientos del volcán para ese período de tiempo en función de imágenes satelitales (ver figura 1) e imágenes fotográficas realizadas in – situ,

cuya información se presenta en la tabla 1.

Para determinar los parámetros de emisión del volcán se analizaron los datos provenientes del sensor remoto Ozone Monitoring Instrument instalado en el satélite AURA (Aura/OMI) Collection 3 generado por la NASA (<http://avdc.gsfc.nasa.gov>). A partir de los cuales se obtuvieron los perfiles de concentración de SO₂ (unidades Dobson (DU)) para diferentes alturas de la atmósfera: capa límite planetaria (PBL), troposfera inferior (TRL), troposfera media (TRM) y estratosfera inferior (STL) [6]; y los datos de concentración de aerosol a través del algoritmo Índice de Aerosol (IA), (ver tabla 2 (los valores de concentración más elevados de la tabla 2 se resaltaron con negrita)).

A partir de la comparación efectuada de los valores de masa de SO₂ y del IA se concluye que las emisiones volcánicas de los meses de octubre y noviembre fueron principalmente de gases mientras que la emisión del período 30/11 al 04/12 presenta menor emisión de gases y mayor cantidad de cenizas volcánicas.

| Período | Duración | Altura de Pluma (km) | Tipo de emisión |
|---------------|----------|----------------------|---|
| 26/10 – 01/11 | 5 días | sin datos | Pluma de gas, vapor de agua con menor contenido de cenizas. |
| 04/11 – 05/11 | 1 días | 3,3 km - 3,9 km | Pluma de gas, vapor de agua con menor contenido de cenizas. |
| 07/11 – 08/11 | 1 día | 3,3 km - 3,9 km | Pluma de gas, vapor de agua y cenizas. |
| 16/11 – 18/11 | 2 días | 3,3 km - 3,6 km | Plumas difusas de vapor y cenizas |
| 21/11 – 22/11 | 1 día | 3,3 km - 3,6 km | Plumas difusas de vapor y cenizas |
| 30/11 – 04/12 | 4 días | 3,3 km - 4,2 km | Plumas difusas de vapor y cenizas |

Tabla 1 – Duración, altura de la pluma y tipo de emisión del volcán Copahue para el período Octubre – Diciembre de 2016 [7]

El volumen de emisión de cenizas se estimó en función de la ecuación empírica determinada por Mastin [8]:

$$H = 2.00 V^{0.241} \quad (1)$$

donde H se define como Altura de la columna (km) y V, flujo volumétrico (m³/s). Para el período 30/11 al 04/12 se estima una emisión de cenizas de 2,3 10⁸ kg/s.

En función de estos parámetros de emisión se simuló la dispersión de los contaminantes emitidos por el volcán bajo dos escenarios:

- 1) Emisión principal de SO₂
- 2) Emisión principal de Cenizas volcánicas.

| Fecha | Hora | CF ^a | SZA ^b | Columna Total de SO ₂ (DU) ^c | | | | IA ^d | M _{SO2} (Mg) ^e |
|--------------|--------------|-----------------|------------------|--|--------------|--------------|--------------|-----------------|------------------------------------|
| | | | | PBL | TRL | TRM | STL | | |
| 03/10 | 19:26 | 0.626 | 51.67 | -0.601 | -0.209 | -0.146 | -0.128 | 0.15 | |
| 04/10 | 18:31 | 0 | 42.68 | -2.301 | -0.523 | -0.32 | -0.281 | 0.66 | |
| 11/10 | 18:37 | 0.948 | 41.75 | 0.02 | 0.04 | 0.04 | 0.048 | -0.02 | |
| 27/10 | 18:37 | 0 | 37.83 | 4.148 | 1.573 | 0.846 | 0.716 | 1.56 | 65.05 |
| 04/11 | 19:26 | 0 | 44.99 | -0.14 | -0.206 | -0.102 | -0.077 | 0.79 | |
| 05/11 | 18:31 | 0 | 34.82 | 0.142 | -0.272 | -0.151 | -0.129 | 0.07 | |
| 12/11 | 19:32 | 0 | 34.43 | 0.593 | -0.104 | -0.059 | -0.052 | 0.93 | 5.3 |
| 20/11 | 19:26 | 0.474 | 42.04 | 1.15 | 0.2 | 0.138 | 0.121 | 0.53 | 14.37 |
| 01/12 | 18:31 | 0 | 31.58 | 0.64 | 0.376 | 0.206 | 0.177 | 1.45 | 12.5 |
| 07/12 | 18:31 | 0.111 | 28.88 | -2.727 | s/d | s/d | s/d | -1.02 | |
| 22/12 | 19:31 | 0 | 37.57 | 0.448 | -0.015 | 0 | 0.006 | 0.83 | |

Tabla 2 – Resumen de parámetros de emisión del volcán provenientes del sensor remoto Aura/OMI Collection 3.

- CF: Fracción de nube derivada del satélite
- SZA: ángulo zenital solar derivado del satélite
- Columna total de SO₂ satélite optimizada para diferentes regiones de altitud: capa límite planetaria (PBL), troposfera inferior (TRL), troposfera media (TRM) y estratosfera inferior (STL). 1DU=2.69 10¹⁶ moléculas/cm² para gases ideales.
- IA: índice de aerosol. Los valores de IA mayores a 1 indican presencia de cenizas volcánicas [9].
- Masa de SO₂ (M_{SO2} (Mg)) según cálculos propios teniendo en cuenta la masa molar del gas SO₂ y el área de la sección transversal de la columna medida en la superficie para las mediciones satelitales del sensor OMI es de 13x24 km² [10].

3.2. Estudio de la dispersión de los contaminantes

Las estimaciones de emisiones provenientes del volcán se realizaron utilizando el modelo Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model (HYSPLIT) para evaluar su dispersión. El modelo HYSPLIT desarrollado por el Laboratorio de recursos del aire de la NOAA (Air Resources Laboratory, ARL) puede utilizarse para erupciones volcánicas de modo determinar el transporte, la dispersión y concentraciones de los contaminantes de la pluma volcánica [11]. Se estimó la dispersión de dos escenarios diferentes: con presencia de cenizas y con presencia de gases de SO₂ [12].

El tamaño de partícula se evaluó, teniendo en cuenta que la dispersión de las cenizas que emite el volcán está comprendida entre 500 µm y 5 µm y que la moda es de 125 µm [13]. Se trabajó con los datos meteorológicos provenientes del sistema global de asimilación de datos (Global Data Assimilation System (GDAS)), que recolecta datos observacionales meteorológicos de todo el planeta y los procesa incorporándolos a un sistema de modelación numérica del sistema, siendo actualmente utilizados en distintos campos de las ciencias de la tierra. El laboratorio ARL utiliza la salida del modelo de Centros Nacionales para la Predicción del Medio Ambiente del Servicio Meteorológico Nacional (National Weather Service's National Centers for Environmental Prediction (NCEP)) para el cálculo de la calidad del aire y dispersión atmosférica debido al transporte. Estos datos consistieron en campos

básicos de las componentes del viento, temperatura y humedad. El sistema GDAS se nutre datos provenientes de estaciones observacionales y el sitio en estudio se encuentra en cercanías de la estación Neuquén AERO, el cual incluye dicha información

La dispersión de un contaminante se calculó sumando la emisión inicial “soplo” (puff) o la dispersión de partículas. En el modelo de soplo, los soplos se expanden hasta que exceden el tamaño de la celda de la cuadrícula de meteorología (horizontal o vertical) y luego se dividen en varios soplos, cada uno con su parte de la masa contaminante. En el modelo de dispersión de partículas, un número fijo de partículas se ven afectados por el dominio del modelo que tiene en cuenta el campo generado por el viento medio y la dispersión ocasionada por un componente turbulento [14].

3.3. Muestreo de sedimentos y Análisis

En los meses comprendidos entre finales de octubre hasta principio de diciembre del 2016, se coordinó con el Centro de Salud de Cavihue, perteneciente al Ministerio de Salud de la Provincia de Neuquén implementar un muestreo de recolección de cenizas volcánicas en muestreadores pasivos. Los muestreos se realizaron en recipientes de plásticos de boca ancha y de diámetro de 28.5 cm. Las muestras recogidas de cenizas se almacenaron en bolsas plásticas con cierre hermético, se secaron y pesaron, para finalmente trasvasarse a recipientes plásticos herméticos rotulados. La cantidad de ceniza sedimentada en los diferentes muestreos se detalla en la tabla 3:

| Fecha de muestreo | Duración | M_{mta} (g) |
|-------------------|----------|---------------|
| 28/10 | 28 horas | 1.05 |
| 30/10 | 19 horas | 1.94 |
| 02/11 | 11 horas | 1.15 |
| 03/11 | 10 horas | 0.93 |
| 05/11 | 48 horas | 6.72 |
| 30/11 | 72 horas | 16.69 |

Tabla 3 – Datos de muestreos: fecha y duración de muestreo; masa del sedimento de cenizas volcánicas (M_{mta} (g)).

Para evaluar la geoquímica de las cenizas se realizó el método de lixiviado sugerido por Ruggeri [15] y por International Volcanic Health Hazard Network (IVHHN) [16]. De los muestreos realizados se seleccionó el lote 30/11 para su posterior análisis debido a que es el que presenta mayor cantidad de muestras para realizar una caracterización físico – química completa. La solución de lixiviado utilizada fue agua deionizada porque permite un determinación rápida de sustancias potencialmente peligrosas [16] [17].

La proporción de masa de ceniza/volumen de agua deionizada fue de 1:20 masa/volumen (1g de ceniza por cada 20 mL de agua deionizada) [18] [19]. La mezcla de ceniza – lixiviado se agitó durante 90 minutos en un recipiente de HDPE sellado. La solución se dejó reposar 10 minutos y luego se filtró utilizando filtros de nylon de 0,45 μ m. La determinación de aniones

y cationes se realizó por Cromatografía Iónica utilizando la metodología analítica Standard Method 4110 Method B [19] e ISO 14911:1998 [21]. La cuantificación de trazas de metales pesados se determinó por espectrometría de emisión atómica por plasma inductivo (ICP-OES), bajo los lineamientos de la metodología analítica USEPA Method 200.7 [22].

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados de modelación

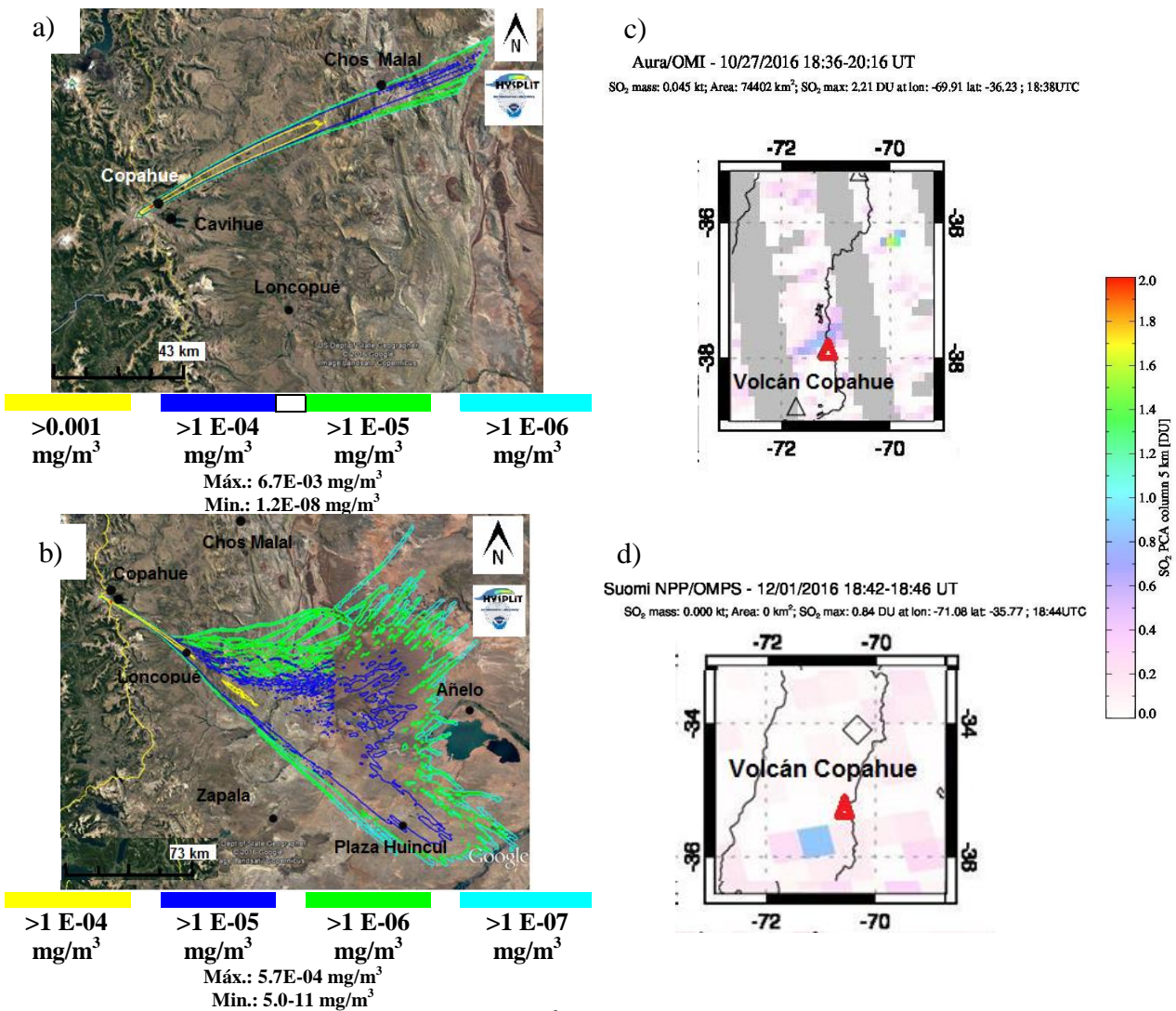


Figura 2 - Modelado de la dispersión de SO₂ (mg/m³) realizado por HYSPLIT a) emitido el 27/10/16 a las 18:37 hl (hora local); b) emitido el 01/02/16 a las 18:31 HL. Cantidad media de columna de SO₂ (DU) del sensor remoto OMI/AURA sobre el área del volcán Copahue (triángulo rojo) c) medida el 27/10/16 a las 18:36 HL d) medida el 01/12/2016 a las 18:42 HL

La figura 2 muestra la dispersión del gas SO₂ emitido los días 27/10 18:37 hs y 01/12 18:31 horas. La dispersión del día 27/10 sigue una orientación NE extendiéndose hasta cercanías de la localidad de Chos Malal, la dispersión del gas SO₂ para el día 01/12 sigue una orientación SE desplazándose hasta las localidades de Añelo y Plaza Huincul. La mayor concentración para ésta última se extiende hasta la localidad de Plaza Huincul. Ambas dispersiones se pueden contrastar con la detección realizada por el sensor remoto OMI/Aura para el contaminante SO₂ (ver figura 2).

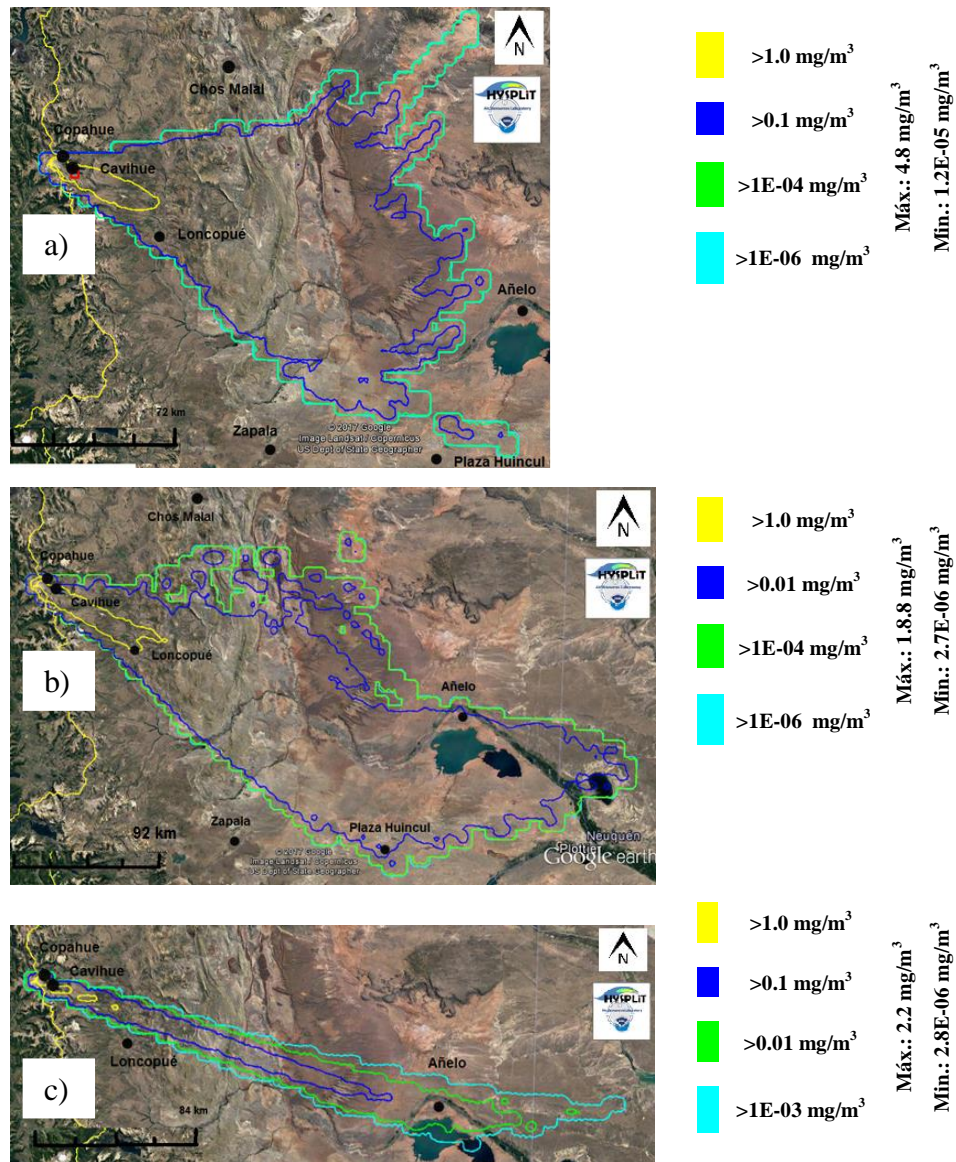


Figura 3 –Modelado de la dispersión de cenizas volcánicas (mg/m³) realizado por HYSPLIT a) en la capa de 0 a 3000 m emitidas el 01/12/16 a las 18:31 HL; b) en la capa entre 3000 a 6000 m emitidas el 01/12/16 a las 18:31HL; c) en la capa entre 6000 a 9000 m emitidas el 01/12/16 a las 18:31HL

Para evaluar la dispersión de las cenizas volcánicas, se seleccionó el día 01/12 18:31 horas, con registros de mayor emisión. La evaluación se realizó en 3 capas de 0 a 3000 m, de 3000 a 6000 m y de 6000 a 9000 m, ver figura 3.

Se observa que el alcance de la dispersión de cenizas de 0 a 3000 m no supera las ciudades de Plaza Huincul y Añelo, la mayor concentración (1.0 mg/m^3) de cenizas se extiende hasta cercanías de la localidad de Loncopué. En la capa de 3000 a 6000 m evaluamos que la dispersión alcanza las cercanías de la ciudad de Neuquén y en la capa de 6000 a 9000 m se extiende hasta la localidad de Añelo (ver figura 3). No se pudo constatar la dispersión de las cenizas con imágenes satelitales provenientes del satélite LANDSAT 8 debido a la no disponibilidad de las mismas para la fecha de emisión.

4.2. Resultados de análisis físico – químico de cenizas volcánicas

Los resultados de la determinación de aniones y cationes por Cromatografía Iónica se detallan en la tabla 3. Los elementos de mayor concentración hallados fueron F, Cl, Br, N, S, Ca, Na, K y Mg presentando una concentración mayor a 1 mg/kg de ceniza [15]. La concentración de fluoruros en el lixiviado de cenizas presentó una concentración de 6.62 mg/L o de 129.1 mg/kg de cenizas. El contenido del anión fluoruro presente en el lixiviado fue relativamente bajo si se compara con otros volcanes (volcán Helens (300 mg/kg , Smith [23]), volcán Ruapehu ($350\text{-}850 \text{ mg/kg}$, Cronin [24]), volcán Soufriere de Guadalupe ($540\text{-}800\text{mg/kg}$, Le Guern [25])). Sin embargo, fue más alto en el caso de las cenizas provenientes del volcán Lonquimay en Chile ($75\text{-}100 \text{ mg/kg}$) donde los animales de pastoreo murieron de fluorosis después de una erupción en 1988-89 [26] y presentó valores cercanos a los hallados en el volcán Yasur ($178 - 281 \text{ mg/kg}$, Cronin y Sharp [18]).

El anión más abundante fue el sulfato con valores de 990.7 mg/kg de cenizas, la relación de concentración de aniones cloruros/sulfatos es 0.35 lo cual nos dio indicios que el contenido de las gases provenientes de la erupción fueron más ricos en azufre.

| | $C_L \text{ (mg/L)}$ | $C_c \text{ (mg/kg)}$ |
|-----------|----------------------|-----------------------|
| Fluoruros | 6.62 | 129.15 |
| Cloruros | 18.06 | 352.34 |
| Nitritos | 0.04 | 0.78 |
| Nitratos | 2.63 | 51.31 |
| Bromuros | 0.11 | 2.15 |
| Sulfatos | 50.78 | 990.69 |
| Sodio | 10.65 | 207.78 |
| Potasio | 1.69 | 32.97 |
| Calcio | 10.74 | 209.53 |
| Magnesio | 10.01 | 195.29 |

Tabla 3 – Concentración de lixiviado expresado en ($C_L \text{ (mg/L)}$) y ($C_c \text{ (mg/kg)}$) para los aniones Fluoruros, Cloruros, Nitritos, Nitratos, Bromuros, Sulfatos y los cationes Sodio, Potasio, Calcio y Magnesio determinados por la técnica IC.

Los metales más abundantes fueron Sodio (Na) (207.8 mg/kg), Calcio (Ca) (209.5 mg/kg) y Magnesio (Mg) (195.3 mg/kg). Si comparamos estos elementos mayoritarios con la erupción del volcán Chaitén en el 2008 vemos que se presentaron abundancia similares: para Na (79.4 mg/kg), Ca (189 mg/kg) y Mg (12,33 mg/kg) [15].

La tabla 4 presenta el análisis de trazas de metales pesados analizados por la técnica ICP-OES. Las especies más abundantes fueron el Níquel (Ni, 79.4 mg/kg), Zinc (Zn, 44.3 mg/kg) y el Cobre (Cu, 11.1 mg/kg).

| | C_L (µg/mL) | C_c (mg/kg) |
|-----------|------------------------------|------------------------------|
| Plata | 0.12 | 2.3 |
| Arsénico | 0.14 | 2.7 |
| Bario | 0.29 | 5.7 |
| Cadmio | 0.02 | 0.4 |
| Cobalto | 0.02 | 0.4 |
| Cromo | 0.09 | 1.8 |
| Cobre | 0.57 | 11.1 |
| Mercurio | 0.01 | 0.2 |
| Molibdeno | 0.05 | 1.0 |
| Níquel | 4.07 | 79.4 |
| Plomo | <0.01 | 0.2 |
| Selenio | 0.31 | 6.0 |
| Antimonio | <0.01 | 0.2 |
| Estaño | <0.01 | 0.2 |
| Titanio | 0.30 | 5.9 |
| Zinc | 2.27 | 44.3 |

Tabla 4 – Concentración de lixiviado expresado en (C_L (µg/mL)) y (C_c (mg/kg)) para los principales metales pesados determinados por la técnica ICP/OES.

Con el objeto de alcanzar a una mejor interpretación de los resultados se compararon los resultados del lixiviado con las concentraciones máximas permitidas para el agua potable según Código Alimentario Argentino (CAA) para algunos de los contaminantes (ver tabla 5). Si bien los resultados para varios de los contaminantes son mayores a los parámetros de calidad de agua nacional cabe recordar el estudio realizado es sobre un lixiviado de cenizas en el cual se busca evaluar y solubilizar en agua la presencia de contaminantes presentes en la muestra. El estudio debiera ampliarse sobre muestras de aguas obtenidas a la salida del sistema de potabilización de agua para consumo humano.

Para muchos autores las emisiones constituyen un peligro en diferentes sectores de la población que van desde fallos en el suministro de energía hasta el agravamiento de enfermedades pulmonares, trastornos gastrointestinales por la ingestión de agua y alimentos contaminados con flúor y posiblemente con metales pesados (arsénico, mercurio, etc).

| | C_L (mg/L) | CMP (mg/L) |
|-----------|-----------------------------|-------------------|
| Fluoruros | 6.62 | 0,6 -1.7 |
| Cloruros | 18.06 | 350 |
| Nitritos | 0.04 | 0.1 |
| Nitratos | 2.63 | 45 |
| Sulfatos | 50.78 | 400 |
| Plata | 0.12 | 0.05 |
| Arsénico | 0.14 | 0.01 |
| Cadmio | 0.02 | 0.005 |
| Cromo | 0.09 | 0.05 |
| Cobre | 0.57 | 1 |
| Mercurio | 0.01 | 0.001 |
| Níquel | 4.07 | 0.02 |
| Plomo | <0.01 | 0.05 |
| Selenio | 0.31 | 0.01 |
| Antimonio | <0.01 | 0.02 |
| Zinc | 2.27 | 5 |

Tabla 5 – Comparativo de Concentración de contaminantes presentes en el lixiviado expresado en (C_L (mg/L)) y Concentración Máxima Permitida (CMP (mg/L)) para el agua potable establecido por el CAA.

5. CONCLUSIÓN

La investigación realizada en este trabajo combinó mediciones de sedimentos de cenizas a nivel suelo, con modelos de simulación de la dispersión y mediciones satelitales; con el objeto de comprobar episodios de contaminación atmosférica. El uso de modelos permitió modelar de modo satisfactorio la dispersión cenizas volcánicas y SO₂ de los contaminantes emitidos por el volcán Copahue, y determinar el alcance y el transporte a diferentes localidades. Para evaluar de forma eficiente los modelos de dispersión es necesario realizar mayor número de mediciones complementarias (monitoreo) y así realizar una validación del modelado. Las mediciones satelitales detectan fácilmente los gases y aerosoles presentes en la pluma volcánica pero se dificulta su aplicación a medida que la pluma se dispersa.

El muestreo de cenizas permitió determinar el grado de deposición a nivel superficial de las emisiones volcánicas, sino que además se logró realizar una caracterización físico-química de las cenizas y evaluar la presencia de diversos contaminantes y establecer si existe riesgo a la salud ambiental y humana. Si bien las cantidades de muestras analizadas son bajas permite tener una primera aproximación del estado de situación. Se sugiere ampliar el estudio de modo determinar la biocumulación y/o presencia de contaminantes como el anión fluoruro y ciertos metales pesados en alimentos, plantas, animales y agua de lluvia; de este modo evaluar efectos crónicos del medio ambiente sobre los animales, vegetales y seres humanos.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Kerminen M., Niemi J., Timonen H., Aurela M., Frey A., Carbone S., Saarikoski S., Teinila K., Hakkarainen J., Tamminen J., Vira J., Prank M., Sofiev M., Hillamo R. “Atmospheric Chemistry and Physics Characterization of a volcanic ash episode in southern Finland caused by the Grimsvotn eruption in Iceland in May 2011”, *Atmospheric Chemistry and Physics*. Vol. **11**, pp. 12227–12239, (2011).
- [2] Stuefer M., Freitas S., Grell G., Webley P., Peckham S., McKeen S., Egan S. “Inclusion of ash and SO₂ emissions from volcanic eruptions in WRF-CHEM: development and some applications”, *Geoscientific Model Development*. Vol. **6**, pp. 457–468, (2013).
- [3] Reed W. IC/9478. “Significant Dust Dispersion Models for Mining Operations”, Department of Health and Human Services (DHHS) Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Publication. Informe. Pittsburgh, EUA, 29 pp, (2005).
- [4] Hurst, T., and Davis, C. “Forecasting volcanic ash deposition using HYSPLIT”, *Journal of Applied Volcanology*. Vol. **6** (5), pp. 1 – 8 (2017).
- [5] SERNAGEOMIN CHILE. (2016). Red de Vigilancia Volcánica, Volcán Copahue. Recuperado el 07 de 04 de 2016, de www.sernageomin.cl/volcan.php?pagina=4&iId=54
- [6] Ialongo I., Hakkarainen J., Kivi R., Anttila P., Krotkov N., Yang K., Li C., Tukiainen S., Hassinen S., Tamminen J. “Comparison of operational satellite SO₂ products with ground-based observations in northern Finland during the Icelandic Holuhraun fissure eruption”, *Atmospheric Measurement Techniques*. Vol. **8**, pp. 2279–2289, (2015).
- [7] Sennert, S. “Weekly Volcanic Activity Report, 01 October 2016-3 January 2017. Report on Copahue (Chile-Argentina)”, *Smithsonian Institution and US Geological Survey*. Global Volcanism Program, 2016.
- [8] Mastin L.G., Guffanti M., Servranckx R., Webley P., Barsotti S., Dean K., Durant A., Ewert J.W., Neri A., Rose W.I., Schneider D., Siebert L., Stunder B., Swanson G., Tupper A., Volentik A., Waythomas C.F. “A multidisciplinary effort to assign realistic source parameters to models of volcanic ash-cloud transport and dispersion during eruptions”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol. **186** (1–2), pp. 10–21, (2009).
- [9] Krotkov N., Habib S., da Silva A., Hughes E., Yang K., Brentzel K., Seftor C., Schneider D., Guffanti M., Hoffman R., Myers T., Tamminen J., Hassinen S. "Real Time Volcanic Cloud Products and Predictions for Aviation Alerts", *6th American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Atmospheric and Space Environments Conference*. Atlanta, 2014.
- [10] Alfaro –Contreras R., Zhang J., Campbell J., Reid J. “Investigating the frequency and interannual variability in global above-cloud aerosol characteristics with CALIOP and OMI”, *Atmospheric Chemistry and Physics*. Vol. **16**, pp. 47–69, (2016).
- [11] Draxler R., Rolph G. HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website, available at: <http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>, *NOAA Air Resources Laboratory*. Silver Spring, MD, USA, 2003.
- [12] Gray T., Bennartz R. “Automatic volcanic ash detection from MODIS observations using a back-propagation neural network”, *Atmospheric Measurement Techniques*. Vol. **8**, pp. 5089–

5097, (2015).

[13] Caselli A. Liccioli C. Tassi F. *Risk Assessment and Mitigation at Copahue Volcano*, Active Volcanoes of the World. Springer Berlin Heidelberg, (2016).

[14] Casasola F. “Implementación de herramientas de Teledetección e Inteligencia Artificial para la optimización de los recursos del Ejército Argentino en situaciones de emergencias volcánicas”, *Universidad Nacional de Córdoba*. Tesis de Maestría, (2016).

[15] Ruggieri F, Fernandez-Turiel J-L, Saavedra J, Gimeno D, Polanco E, Antonio Naranjo J. “Environmental geochemistry of recent volcanic ashes from the Southern Andes”, *Environmental Chemistry*. Vol. **8**, pp. 236-47, (2011).

[16] The International Volcanic Health Hazard Network. “Protocol for analysis of bulk ash samples for health hazard assessment”,

(http://www.ivhhn.org/images/pdf/ash_analysis_protocol_2010.pdf), 2010.

[17] Witham C. S., Oppenheimer C , Horwell C.J. “Volcanic ash-leachates: a review and recommendations for sampling methods”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol. **862** (141), pp. 299-326, (2005).

[18] Cronin S., Sharp D. S. Environmental impacts on health from continuous volcanic activity at Yasur (Tanna) and Ambrym, Vanuatu, *International Journal of Environmental Health Research*. Vol. **12** (2), pp.109-23, (2002).

[19] Cronin S. J., Neall V.E., Lecointre J.A., Hedley M.J., Loganathan P. “Environmental hazards of fluoride in volcanic ash: a case study from Ruapehu volcano, New Zealand”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol. **121**, pp. 271 -291, (2003).

[20] Standard Method 4110 Method B. “Determination of Anions by Ion Chromatography”, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Ed. American Water Works Association. (2012)

[21] ISO 14911:1998: “Determination of dissolved Li^+ , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mn^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Sr^{2+} and Ba^{2+} using ion chromatography -- Method for water and waste water”, *International Organization for Standardization (ISO)*.Ed. ISO, (1998).

[22] USEPA Method 200.7: “Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma – Optic Emission Spectrometry”, *Unites States Environmental Protection Agency*. (1994).

[23]. Smith D. Zielinski R.A, Taylor H., Sawyer M. “Leaching characteristics of ash from the May 18, 1980, eruption of Mount St. Helens volcano, Washington”, *Bulletin of Volcanology*. Vol. **46**, pp. 103–24, (1983).

[24] Cronin S., Manoharan V., Hedley M., Loganathan P. “Fluoride: A review of its fate, bioavailability and risks of fluorosis in grazed-pasture systems in New Zealand”, *New Zealand Journal of Agricultural Research*. Vol. **43**, pp. 295–321, (2000).

[25] Le Guern F., Bernard A., Chevrier R. “Soufrière of Guadeloupe 1976–1977 eruption – mass and energy transfer and volcanic health hazards”, *Bulletin of Volcanology*. Vol. **43**, pp. 577–93, (1980).

[26] Arya O., Wittwer F., Villa A., Ducon C. “Bovine fluorosis following volcanic activity in the Southern Andes”, *Veterinary Record*. Vol. **26**, pp. 641–2, (1990).