

Impacto ambiental de la interacción agua-ceniza en la erupción del 2011 del volcán Grímsvötn (Islandia)

Environmental impact of volcanic ash-water interaction in the 2011 Grímsvötn eruption (Iceland)

J.M. Cabre¹, M. Aulinas², M. Rejas¹ y J.L. Fernandez-Turiel¹

¹ Instituto de Ciencias de la Tierra Jaume Almera, ICTJA-CSIC, Lluís Solé i Sabarís s/n, 08028, Barcelona. jlfernandez@ictja.csic.es

² Departament de Geoquímica, Petrologia i Prospecció Geològica, Universitat de Barcelona, Martí i Franquès, s/n, 08028, Barcelona. meritxellaulinas@ub.edu

Resumen: La erupción volcánica del Grímsvötn, entre el 21 y el 28 de mayo de 2011, fue la erupción de mayor magnitud del Sistema Volcánico Grímsvötn desde 1873. Las características geoquímicas del impacto ambiental de la interacción ceniza-agua se determinaron mediante dos métodos de lixiviación (ensayo tipo batch y ensayo en columna). Los principales resultados revelan que Na, K, Ca, Mg, Si, Cl, S y F presentan los mayores flujos geoquímicos causados por la interacción de la ceniza y el agua. Además, las concentraciones significativas de algunos de estos elementos (Ca, S y Mg) junto con P, Cl, Fe, considerados normalmente macro/micronutrientes, demuestran el potencial fertilizador de la ceniza emitida. Por otra parte la liberación de F pone de manifiesto los posibles problemas ambientales surgidos por la caída de cenizas tanto en sistemas terrestres como acuáticos. Es de destacar que la liberación química es máxima durante las primeras horas de contacto entre la tefra y el agua, dada por la rápida disolución de las sales solubles de la superficie de la ceniza. A medida que se avanza en el tiempo, estos constituyentes se agotan, la liberación disminuye y los elementos son liberados por la disolución incongruente del vidrio volcánico.

Palabras clave: ceniza volcánica, volcán Grímsvötn, flujo geoquímico, ensayos de lixiviación

Abstract: The Grímsvötn volcanic eruption, from 21 to 28 May, 2011, was the largest eruption of the Grímsvötn Volcanic System since 1873. The main geochemical features of the potential environmental impact of the volcanic ash-water interaction were determined using two different leaching methods as proxies (batch and vertical flow through column experiments). The main findings reveal that Na, K, Ca, Mg, Si, Cl, S and F show the largest geochemical fluxes caused by the interaction of water and ash. Additionally, the significant amounts of some of these elements (Ca, S and Mg) together with P, Cl, Fe, which are usually considered as macro/micronutrients, demonstrates the fertilising potential of the May 2011 emitted ash. On the other hand, release of F highlights the possible environmental problems arising from ash fallout on land or into fresh water systems. It is noteworthy that the chemical release is maximal during the first few hours of contact between tephra and water due to the dissolution of soluble salts from the ash surface. As time progresses, these constituents are exhausted, the release drops considerably and elements are freed instead by the incongruent dissolution of the volcanic glass.

Key words: volcanic ash, Grímsvötn volcano, geochemical flux, leaching experiments

INTRODUCCIÓN

Las erupciones volcánicas explosivas emiten directamente a la atmosfera material particulado (tefra) y gases. La interacción de la tefra con el ambiente suele provocar efectos físicos, químicos y biológicos tanto a escala local como global. Es bien sabido que las columnas eruptivas que alcanzan la troposfera y estratosfera pueden afectar el clima, incluyendo un aumento en gases con efecto invernadero, especies del azufre y halógenas, así como aerosoles, que pueden provocar la acidificación de la precipitación. Por otra parte, los volátiles liberados durante una erupción volcánica explosiva son normalmente adsorbidos en la superficie de las partículas de ceniza en forma de compuestos solubles. Una vez depositada la ceniza, los compuestos adsorbidos pueden ser liberados al

ambiente causando tanto efectos negativos (dañando la calidad del agua, vegetación, ganado y personas) como positivos (fertilizando terrenos y océanos). Un factor importante de estos compuestos es que se disuelven rápidamente en contacto con el agua.

El objetivo de este trabajo es evaluar las principales características geoquímicas del impacto ambiental producido por la interacción ceniza-agua, utilizando los resultados de distintos ensayos de lixiviación realizados con cenizas de la erupción del 2011 del volcán Grímsvötn (Islandia). Este estudio complementa los resultados obtenidos por Horwell et al. (2013), Olsson et al., (2013) y Sigmarsson et al. (2013), a través del análisis de un nuevo grupo de muestras de ceniza de la misma erupción y de la utilización de metodologías de lixiviados distintas a las utilizadas por estos autores.

EL VOLCÁN GRÍMSVÖTN

Este volcán islandés forma parte del sistema volcánico de Grímsvötn (GVS) que se alinea a lo largo de un sistema de fisuras con orientación NE-SW en el centro-sud de Islandia y que resulta estar en parte cubierto por el extenso glaciar Vatnajökull (Figura 1). Sin duda alguna el evento volcánico más conocido del GVS es la erupción fisural de Laki que en 1783-1784 dio lugar al mayor flujo de lava históricamente conocido, en el que se erupcionaron alrededor de 14,7 km³ de lava y 0,4 km³ de tefra (expresado como roca densa equivalente).

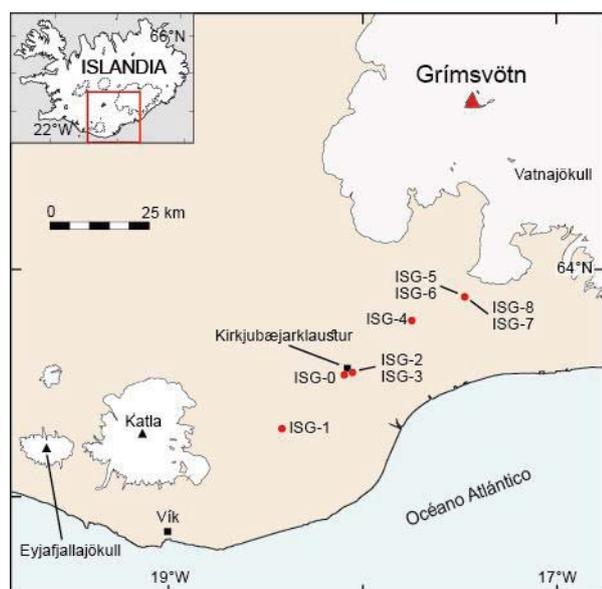


FIGURA 1. Localización de los volcanes activos del sud de Islandia, así como el muestreo realizado.

LA ERUPCIÓN DEL 2011

En la erupción del Grímsvötn del 21 de mayo del 2011 la columna eruptiva alcanzó una altitud máxima de 20-25 km. Al cabo de 24 horas la columna de ceniza llegaba a 100 km al sudoeste del volcán, afectando las localidades de Kirkjubærklaustur and Vík (Figura 1) y la columna eruptiva disminuyó progresivamente hasta una altura de 10 km. El día 23 de mayo la altura de la columna eruptiva era de 5 km y el día 28 de mayo los tremores volcánicos rápidamente disminuyeron y finalmente cesaron. Esta erupción del Grímsvötn fue la más intensa desde 1873, alcanzando un índice de explosividad volcánica (IEV) de magnitud 4, suponiendo un riesgo ambiental potencial por liberación de elementos en el agua, especialmente flúor, que puede perjudicar seriamente tanto a animales como humanos. Si bien esta erupción causó cierta inestabilidad a la aviación europea, la dimensión fue mucho menor en comparación con la erupción del 2010 del volcán Eyjafjallajökull.

METODOLOGIA

Un total de nueve muestras (Figura 1) de ceniza se recolectaron durante el 22 y el 25 de Mayo de 2011 en cinco puntos a diferentes distancias del foco emisor, y a lo largo de un transecto de 100 km siguiendo el eje de dispersión de la pluma eruptiva. De acuerdo con Olsson et al. (2013), la mayor parte de cenizas de la erupción del Grímsvötn fueron emitidas antes del 23 de mayo, de modo que el muestreo realizado el 22 de mayo a las 14:02 UTC (muestra G-0) probablemente no contenía cenizas volcánicas de las fases más intensas de la erupción. Las cenizas, una vez muestreadas se guardaron en bolsas de polietileno y fueron transportadas al laboratorio, donde se secaron a 40 °C durante 24 horas, y se conservaron en recipientes de polietileno hasta su análisis.

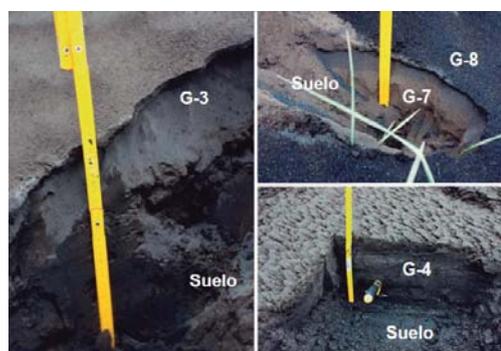


FIGURA 2. Muestreo de las cenizas de la erupción del 2011 del volcán Grímsvötn.

Los ensayos de lixiviación se realizaron siguiendo dos métodos independientes, con una serie de tests de lixiviación de tipo *batch* y un test de lixiviación en columna con el fin de evaluar el comportamiento temporal de los elementos potencialmente peligrosos y determinar el comportamiento a corto plazo de la lixiviación de cenizas volcánicas.

Para el ensayo tipo *batch* se mezclaron 1 gramo de muestra de ceniza y 10 ml de agua Milli-Q Plus ultrapura (18,2 MΩ/cm) en tubos de ensayo de 14 x 10 mm. El agua con la ceniza fue agitada a 20 rpm durante 4 horas y posteriormente filtrada a través de filtros de jeringa de difluoruro de polivinilideno (PVDF). Finalmente, se añadió a la solución 1 ml de HNO₃ y se enrasó a un volumen de 100 ml. El pH y la conductividad específica (CS) de los lixiviados se monitorearon mediante electrodos específicos inmediatamente después de la mezcla entre la ceniza y el agua desionizada y después de la agitación antes del filtrado. La determinación de los elementos mayoritarios y traza de los lixiviados se realizó por espectrometría de masas de alta resolución con plasma acoplado inductivamente (HR-ICP-MS) y se basaron en estudios previos (Fernandez-Turiel et al., 2000). El contenido en azufre en los lixiviados se expresa en forma de SO₄²⁻. Las concentraciones de flúor se

determinaron mediante un electrodo selectivo de iones (ISE).

Para el ensayo en columna, se rellenó un cilindro vertical con 10 gramos de una ceniza representativa del muestreo (G-3). Gracias a una bomba peristáltica (Minipuls 3, Gilson) colocada en el frente de la columna, se aseguró la circulación constante y estable de un flujo de agua desionizada desde el techo a la base de la columna, con una descarga de 0,12 ml/min y con una interacción ceniza-agua aproximada de 150 minutos. La presencia de un colector de fracciones (FC204, Gilson) a la salida de la columna direccionó la solución lixiviada a tubos de ensayo de polipropileno. En seis días se recogió un litro de solución percolada, dando lugar a 100 muestras en tubos; 37 de ellas fueron analizadas por HR-ICP-MS utilizando diluciones acidificadas (1% de HNO₃) 1:10 ml, v/v con agua desionizada Milli-Q Plus. Por otra parte, en 39 de estas muestras se analizó el pH y la CS inmediatamente después de llenar los tubos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mediante los ensayos de lixiviación de tipo *batch* se determinan algunas *proxies* para los procesos químicos que ocurren durante la interacción entre la ceniza y el agua y se establecen las tasas de lixiviación de los elementos implicados durante la interacción. Llegados a este punto es necesario considerar la prístinidad de las cenizas analizadas en este trabajo. Tal y como se ha mencionado anteriormente, a excepción de la muestra G-0 (Figura 1) el resto de cenizas deben ser clasificadas como frescas y no prístinas. En consecuencia, los resultados que se presentan en este trabajo no deben ser considerados como flujos absolutos, pero sí como huella de la erupción del 2011 del Grímsvötn y como indicadores del orden de magnitud de los flujos geoquímicos implicados.

Los resultados de los ensayos de lixiviación tipo *batch* muestran una solución lixiviada que inicialmente era ligeramente ácida a excepción de tres muestras que eran débilmente alcalinas, con pH entre 5,80 y 7,62. Después de cuatro horas de agitación el promedio de pH de los lixiviados aumentó alrededor de 1,90 unidades de pH presentando valores entre 7,33 y 9,26. Este incremento se explica por intercambio iónico, es decir, por la entrada en solución de los cationes y protones del vidrio volcánico y de los minerales. Por lo que se refiere a la CS, los valores iniciales varían entre 7 y 356 $\mu\text{S}/\text{cm}$, incrementando en la solución final (14-404 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Claramente, las muestras con los valores más bajos de pH y CS (G-5 y G-8, ver Figura 1) son aquellas que probablemente fueron más afectadas por el episodio de lluvia del día 25 de mayo de 2011.

Una referencia de la movilidad de los elementos durante la interacción ceniza-agua es la masa lixiviada relativa (MLR) definida como el porcentaje de la

concentración del elemento que puede ser movilizado por la interacción agua-ceniza, y se expresa como la fracción entre el elemento lixiviado obtenido a partir del ensayo tipo *batch* y la concentración total del elemento.

Teniendo en cuenta la MRL, los elementos se clasificaron arbitrariamente diferenciando entre elementos con movilidad moderada (MRL 0,5 a 1,0 %; Sn), elementos con movilidad baja (0,01 to 0,5 %, As, Bi, W, Pb, Sb, Tl, Li, Mo, Zn, Na, Cu, K, Cs, Ca, Sr, Ni, P, Be, Rb, Tb y Ta) y elementos con movilidad muy baja (MRL < 0,01 %, Ge, Tierras Raras o REE, Th, Y, Ba, Mg, Mn, Ga, Al, Hf, V, Cr, Co, Fe, Nb, Sc, U, Zr, Ti, Si y Ag). En general, los resultados muestran un grado de movilidad bastante bajo para todos los elementos y en especial para los elementos mayoritarios. Aún así esta movilidad puede considerarse significativa. A pesar que las concentraciones de Cl, S, B, F, Se, Br, Cd, I y Hg fueron determinadas en los ensayos de lixiviación, el MRL no se pudo calcular debido a que no se determinaron las concentraciones totales de éstos. Los resultados indican que las cenizas del Grímsvötn presentan contenidos significativos de macronutrientes (Ca, 8.908 x 10³ kg; S, 7.021 x 10³ kg; Mg, 991 x 10³ kg; P, 145 x 10³ kg) y micronutrientes (Cl, 1.094 x 10³ kg; Fe, 991 x 10³ kg) para procesos biológicos, que muestran un potencial fertilizador de esta ceniza tanto en ecosistemas terrestres como marinos. Por otra parte, los problemas ambientales potenciales vienen en gran parte dados por la liberación de flúor (5.194 x 10³ kg).

El ensayo de lixiviación en columna realizado para la muestra G-3 (Figura 1), permite modelar la evolución de la composición lixiviada en el tiempo. Los resultados obtenidos (Figura 3) muestran como el pH varía de 6,55 a 7,10, incrementando rápidamente al inicio del experimento. Una vez el pH alcanza su máximo (7,10), la tendencia general es de decrecimiento progresivo hasta el final del ensayo. Este incremento inicial fue observado también en el ensayo tipo *batch*, y se asocia al intercambio instantáneo de los iones alcalinos por H⁺. La concentración de los elementos en la solución percolada tiende a disminuir gradualmente en el tiempo. Las altas concentraciones iniciales de SO₄²⁻, Na, Ca, Mg, K y Sr confirman la presencia de componentes altamente solubles en la superficie de las partículas de ceniza, originadas en la interacción entre la tefra y los gases volcánicos en la columna eruptiva. Un gran número de elementos muestran un pico en concentración entre 50 y 60 ml de solución percolada (Si, Al, P, Ti, V, Fe, Ni, Cu, Zn, Zr y Ba). Esta anomalía puede deberse a la disolución incongruente del vidrio volcánico por procesos de intercambio catiónico. Hacia el final del experimento la concentración de los elementos se estabiliza, sugiriendo el agotamiento de la fracción lixiviable. En el caso de Na, Si y Cl, esta situación se alcanza en volúmenes de percolación bajos (~150 ml), indicando

una rápida liberación de estos elementos. En cambio la liberación de los elementos Ti, Mn y Zn resulta ser más prolongada en el tiempo (~600 ml).

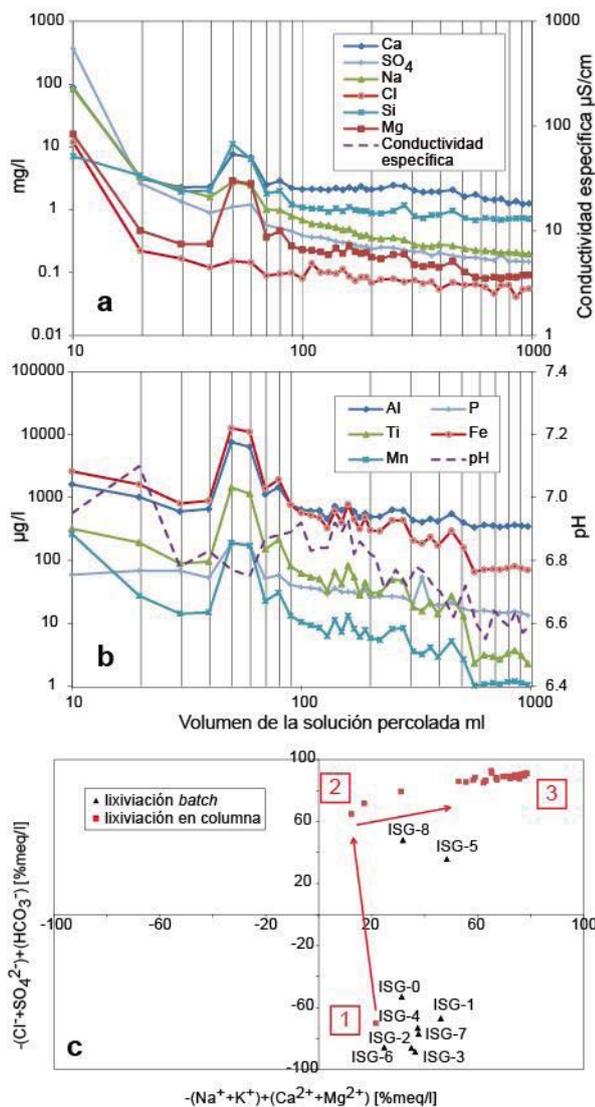


FIGURA 3. A y B) variaciones en las concentraciones de los elementos, pH y CS del lixiviado de ceniza de la muestra ISG-3. C) diagrama de Chadha de las composiciones químicas de los lixiviados obtenidos a partir de los ensayos tipo *batch* y en columna.

La representación de los resultados del ensayo en el diagrama Chadha (Figura 3) para la identificación de los procesos hidrogeoquímicos, evidencia como las muestras se concentran en tres grupos en función de la evolución de la composición del lixiviado. El primer grupo está formado por una única solución correspondiente al inicio del experimento. El segundo grupo muestra un claro decrecimiento del contenido en aniones (Cl⁻ y SO₄²⁻) en la solución, mientras, el tercer grupo se caracteriza por una notable reducción de los contenidos en Na, K, Ca y Mg. Los resultados de los ensayos de tipo *batch* se representan cerca del valor inicial (grupo uno) del ensayo en columna, a excepción de dos muestras (G-5 y G-8) que muestran un comportamiento anómalo que se asocia a su exposición

a la lluvia. El hecho que las masas de los elementos liberadas en el ensayo en columna sean menores que en el experimento tipo *batch* se explica por las distintas condiciones fisicoquímicas durante los experimentos. Así, para los elementos mayoritarios, Si es el que muestra unos valores más parecidos (860×10^3 kg en el *batch* vs. 817×10^3 kg en el ensayo en columna). En cambio S y Cl son los que muestran mayor diferencia (7.021×10^3 vs. 973×10^3 kg en S y 1.094×10^3 vs. 140×10^3 kg en Cl, en los ensayos *batch* y columna, respectivamente).

CONCLUSIONES

El estudio de la ceniza generada durante la erupción del 2011 del volcán islandés Grímsvötn ha permitido demostrar la complementariedad de los ensayos de lixiviación tipo *batch* y en columna, para la evaluación de las consecuencias ambientales de la emisión de ceniza en la atmosfera y su posterior depósito en superficies tanto terrestres como acuosas. Además, contribuye en la consolidación de una metodología para el estudio ambiental de las cenizas volcánicas, y al mismo tiempo proporciona nuevas herramientas para la distinción entre muestras prístinas de las que no pueden ser consideradas como tales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al laboratorio labGEOTOP (infraestructura cofinanciada por ERDF-EU Ref. SIC08-4E-001) del ICTJA-CSIC por la asistencia en la parte analítica. Este trabajo ha sido financiado por el proyecto QUECA (MINECO, CGL2011-23307).

REFERENCIAS

- Fernandez-Turiel J.L., Llorens J.F., Lopez-Vera F., Gomez-Artola C., Morell I., Gimeno D. (2000): Strategy for water analysis using ICP-MS Fresenius *Journal of Analytical Chemistry*, 368: 601-606.
- Horwell, C.J., Baxter, P.J., Illman, S.E., Calkins, J.A., Damby, D.E., Delmelle, P., Donaldson, K., Dunster, C., Fubini, B., Kelly, F.J., Le Blond, J.S., Livi, K.J.T., Murphy, F., Natrass, C., Sweeney, S., Tetley, T.D., Thordarson, T., Tomatis, M. (2013): Physicochemical and toxicological profiling of ash from the 2010 and 2011 eruptions of Eyjafjallajökull and Grímsvötn volcanoes, Iceland using a rapid respiratory hazard assessment protocol. *Environmental Research*, 127: 63-73.
- Olsson J., Stipp S.L.S., Dalby K.N., Gíslason S.R. (2013): Rapid release of metal salts and nutrients from the 2011 Grímsvötn, Iceland volcanic ash. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 123:134-149.
- Sigmarrsson O., Haddadi B., Carn S., Moune S., Gudnason J., Yang K., Clarisse L. (2013): The sulfur budget of the 2011 Grímsvötn eruption, Iceland. *Geophysical Research Letters*, 40: 6095-6100.