

Caracterización de cenizas volcánicas y su influencia en la calidad de las aguas superficiales de la región de Antofagasta de la Sierra, Catamarca, Argentina

Volcanic ash characterization and its influence in the surface water quality in the region of Antofagasta de la Sierra, Catamarca, Argentina

F. Ruggieri¹, J.L. Fernandez-Turiel¹, D. Gimeno², M.T. Garcia-Valles²,
J. Saavedra³ y G. del V. Córdoba⁴

1 Instituto de Ciencias de la Tierra J. Almera, CSIC, Solé i Sabaris s/n, 08028 Barcelona, España

2 Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona, Martí i Franquès s/n, 08028 Barcelona, España

3 IRNASA, CSIC, Cordel de Merinas 40-52, 37008 Salamanca, España

4 Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas, Universidad Nacional de Catamarca, Argentina

Resumen: La actividad volcánica representa un importante aporte natural de elementos químicos, algunos de ellos con un elevado potencial tóxico, a la superficie terrestre. La emisión de ceniza a la atmósfera puede alterar la calidad del agua debido al depósito de estas partículas en lagos, ríos y depósitos abiertos. En este trabajo se estudian las concentraciones de elementos mayoritarios y trazas en 21 muestras de cenizas volcánicas y 15 muestras de aguas superficiales recogidas en la región de Antofagasta de la Sierra, Argentina. Los parámetros químicos mayoritarios y trazas se determinaron mediante espectrometría de masas y de emisión óptica con fuentes de plasma acoplado por inducción (ICP-MS e ICP-OES). Las cenizas volcánicas están enriquecidas en elementos potencialmente tóxicos (principalmente As > Sb > U > Pb) de particular interés desde el punto de vista de la salud humana y ambiental. Los mismos elementos se encontraron enriquecidos en el agua superficial, indicando que probablemente la meteorización de estas rocas sea la fuente principal de dichos elementos.

Palabras clave: Ceniza volcánica, agua, elementos trazas, Antofagasta de la Sierra, Argentina.

Abstract: The volcanic activity is a natural contribution of chemical elements to the earth surface, some of them with an elevated potential toxicity. Close to a volcano, water-soluble components associated with particles of glass and crystals of the ash may lead to chemical changes in water bodies that could render the water unsuitable for drinking. In this context, a study was undertaken to investigate the concentration of major and trace elements in 21 samples of volcanic ashes collected in the volcanic region of Antofagasta de la Sierra, Argentina. Furthermore, we have analyzed the chemical composition of 15 samples of surface waters. Major elements were detected by inductively coupled plasma-optical emission spectrometry (ICP-OES). Trace element content was quantified by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The volcanic ashes were found to be enriched in some toxic trace elements (As > Sb > U > Pb) of particular interest from environmental and human health points of view. The same elements were found enriched in the surface water, indicating that probably the weathering of these rocks is the main source of these elements.

Key words: Volcanic ash, water, trace elements, Antofagasta de la Sierra, Argentina.

INTRODUCCIÓN

La actividad volcánica representa un importante aporte natural de elementos químicos, algunos de ellos con un elevado potencial tóxico, a la superficie terrestre. Dentro de los principales riesgos volcánicos destacan la emisión de ceniza y gases. El estudio de la actividad volcánica a nivel mundial muestra que la emisión de ceniza a la atmósfera puede alterar las condiciones bióticas y abióticas incluso en áreas que se localizan a distancias considerables de las zonas con actividad volcánica. Por su propia naturaleza y dispersión, este producto piroclástico de caída tiene incidencia directa sobre amplias extensiones, en especial en el caso de erupciones plinianas o subplinianas. La ceniza volcánica

puede dar lugar también a cambios físicos y químicos en la calidad del agua, debido al depósito de partículas en los sistemas abiertos del abastecimiento de agua (lagos, ríos y depósitos) quedando en suspensión y causando principalmente un exceso de turbidez y acidez. Incluso cantidades pequeñas de ceniza pueden generar dificultades en infraestructuras como redes de transporte de electricidad y de agua, incluyendo los sistemas de aguas residuales y de desagüe de tormenta (Johnston *et al.*, 2000).

Los gases expulsados durante la actividad volcánica contienen vapor de agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), dióxido de azufre (SO₂), sulfuro de hidrógeno (H₂S), ácido clorhídrico (HCl), ácido fluorhídrico (HF)

y elementos trazas potencialmente tóxicos (ETPT). Estos componentes son posteriormente eliminados de la atmósfera por procesos de reacción química y por adsorción sobre las superficie de las partículas finas de ceniza, las cuales pueden posteriormente ser depositadas en el suelo o suspendidas en las aguas superficiales. Los mecanismos de reacción son complejos, puesto que dependen de varias variables fisicoquímicas. Por lo general, se admite que los parámetros dominantes que determinan la capacidad de las partículas que componen la ceniza volcánica de reaccionar con un gas son sus características texturales, p.ej., el área superficial específica (Delmelle *et al.*, 2005), y la composición química (Heiken, 1985).

Las sustancias potencialmente peligrosas en una ceniza volcánica son los componentes adsorbidos en las partículas que pueden ser lixiviados por el agua, principalmente ácidos (sulfúrico y clorhídrico) y las sales de los halogenuros. Estos componentes hacen que la ceniza sea ligeramente corrosiva. Además, pueden producir cambios químicos en el suelo subyacente como resultado de la lixiviación de los aerosoles que cubren las partículas individuales y a más largo plazo también por la meteorización de las partículas más inestables (Cronin *et al.*, 1996). Los elementos más comunes y en concentraciones más elevadas que pueden ser lixiviados son Cl, SO₄, Na, Ca, K, Mg y F. Otros elementos encontrados en concentraciones más bajas incluyen el Mn, Zn, Ba, Se, Br, B, Al, Si, Cd, Pb, As, Cu y Fe. La mayoría de estos elementos están presentes de forma natural en el agua subterránea y superficial pero pueden llegar a ser peligrosos si superan los umbrales especificados para el agua de consumo humano (p.ej., Código Alimentario Argentino, CAA, 1994; Organización Mundial de la Salud, 2003).

Este trabajo pretende caracterizar geoquímicamente las cenizas volcánicas más representativas de la región de Antofagasta de la Sierra, en el noroeste de Argentina con el fin de comprender el riesgo ambiental y para la salud que supone el depósito de cenizas volcánicas, sobre todo por su interacción con las aguas superficiales de dicha región.

ÁREA DE ESTUDIO

En la cordillera andina existen tres zonas lineares de volcanismo activo: Zona Volcánica del Norte (ZVN: 5°N-2°S), Zona Volcánica del Sur (ZVS: 33°S-52°S) y la Zona Volcánica Central (ZVC: 16°S-28°S). El área de estudio se encuentra situada entre las coordenadas geográficas 25°30' y 27°00' de latitud sur y 67°00' y 68°00' de longitud oeste. Dicha área se localiza dentro de la Zona Volcánica Central (ZVC) de los Andes y constituye una de las regiones volcánicas activas más extensas del mundo. La subducción de la placa oceánica de Nazca debajo de la placa suramericana continental es responsable de la formación de magmas y de los procesos volcánicos de los Andes a lo largo del margen occidental de Suramérica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se han muestreado y localizado mediante GPS 21 muestras de cenizas volcánicas y 15 muestras de aguas superficiales en la región de Antofagasta de la Sierra, Noroeste de Argentina. Estas aguas se usan para abastecimiento a la población rural, tanto para consumo humano como para las actividades agropecuarias.

Elementos	Mediana	Valor máximo	Valor mínimo	Promedio corteza terrestre	FE
SiO ₂ ^a	71,3	82,8	24,2	57,4	1,24
TiO ₂ ^a	0,29	0,51	0,09	0,88	0,33
Al ₂ O ₃ ^a	11,9	15,0	1,94	15,9	0,75
Fe ₂ O ₃ ^a	2,06	5,84	0,66	10,1	0,20
MgO ^a	0,81	3,31	0,12	5,3	0,15
CaO ^a	1,43	30,9	0,57	7,41	0,19
Na ₂ O ^a	2,21	4,50	0,57	3,1	0,71
K ₂ O ^a	2,97	4,88	0,45	1,08	2,75
P ₂ O ₅ ^a	0,08	0,45	0,01	0,2	0,38
LOI ^a	4,98	29,28	2,00		
Cs ^b	18,6	228	2,71	1	18,6
As ^b	7,24	29,4	1,35	1	7,24
Bi ^b	0,38	1,29	0,06	0,06	6,27
Sb ^b	1,25	9,11	0,31	0,2	6,26
U ^b	4,27	24,4	1,89	0,91	4,69
Rb ^b	143	495	22,0	32	4,46
Th ^b	13,2	32,2	2,19	3,5	3,76
Li ^b	42,2	521	12,5	13	3,25
Pb ^b	21,7	44,6	4,37	8	2,71
W ^b	2,67	5,00	1,73	1	2,67
Tl ^b	0,82	2,11	0,18	0,36	2,28
Mo ^b	1,86	5,08	0,22	1	1,86
Au ^b	0,01	<0,01	<0,01	0,003	1,67
Be ^b	2,43	6,92	0,42	1,5	1,62
Cd ^b	0,13	10,9	0,10	0,098	1,35
Nb ^b	12,5	35,2	2,66	11	1,14
Ba ^b	269	820	31,4	250	1,07
Se ^b	0,05	<0,01	<0,01	0,05	1,00
Sn ^b	2,38	6,91	0,97	2,5	0,95
Ga ^b	16,9	21,4	2,62	18	0,94
Ge ^b	1,32	2,07	0,38	1,6	0,83
Hf ^b	2,32	4,82	0,44	3	0,77
Zn ^b	60,3	124,5	37,2	80	0,75
Sr ^b	158	1174	24,5	260	0,61
Ta ^b	0,59	2,14	0,12	1	0,59
Y ^b	11,7	21,8	2,78	20	0,59
Zr ^b	53,7	117	13,9	100	0,54
Co ^b	11,3	69,2	0,57	29	0,39
Mn ^b	547	1911	192	1400	0,39
Sc ^b	5,16	13,7	2,91	30	0,17
Cu ^b	10,9	27,5	2,68	75	0,15
Cr ^b	18,2	42,9	2,96	185	0,10
Ni ^b	9,74	35,2	1,18	105	0,09
V ^b	37,4	111	3,70	2300	0,02
Ag ^b	<0,01	<0,01	<0,01		
Pt ^b	<0,01	<0,01	<0,01		
Te ^b	0,19	2,03	0,05		

^a : concentración en %; ^b : concentración en µg g⁻¹.

TABLA I. Comparación de los principales valores estadísticos de las concentraciones de los elementos mayoritarios, minoritarios y trazas de 21 muestras de cenizas volcánicas en el área de estudio con la media mundial de composición de la corteza terrestre (Taylor y McLennan, 1985) y los factores de enriquecimiento (FE).

Las cenizas se analizaron químicamente (con particular referencia para los ETPT), se determinó su composición mineralógica y sus características texturales y (en su caso) la composición mineralógica. En el terreno se determinaron temperatura, pH y conductividad específica (CE) de las aguas. Los parámetros químicos mayoritarios y trazas se determinaron mediante espectrometría de masas y de emisión óptica con fuentes de plasma acoplado por inducción (ICP-MS e ICP-OES).

RESULTADOS

En la Tabla I se confrontan los principales valores estadísticos de las concentraciones de los elementos mayoritarios y trazas de las muestras estudiadas con la composición media de la corteza terrestre según Taylor y McLennan (1985). Se indican también los factores de enriquecimiento (FE) como el ratio entre los valores observados en esta región y los valores medios de la corteza terrestre. El objeto de esta comparación es mostrar como pueden incidir las cenizas riolíticas calcoalcalinas propias de una región andina típica en la singularidad geoquímica de las aguas superficiales regionales. Los análisis químicos de las cenizas indican elevadas concentraciones de SiO_2 , Al_2O_3 y K_2O y valores inferiores para Fe_2O_3 y CaO . La clasificación T.A.S. (Total Alkali *versus* Silica) para rocas volcánicas indica que se trata de rocas ácidas riolíticas con un contenido de $\text{SiO}_2 > 63\%$. Aunque todos los elementos mayoritarios tienen el mismo orden de magnitud que la media en la corteza terrestre, las cenizas volcánicas resultan enriquecidas principalmente en K_2O (2,75 %), hecho bien conocido en un contexto orogénico de tipo andino. Para los elementos trazas la comparación con el promedio de la corteza indica que los elementos más enriquecidos en las cenizas volcánicas son Cs, As, Bi, Sb, U, Rb, Th, Li, Pb, W, Tl y Mo. Estos elementos tienen un FE que varía desde 18,6 para el Cs a 1,86 para el Mo, mientras que para Cr, Cu, Mn, Ni, Sr, V y Zr se han hallado valores de FE mucho más bajos.

En la Tabla II se comparan los principales valores estadísticos de las concentraciones de los parámetros mayoritarios y trazas de 15 muestras de aguas superficiales en el área de estudio con el promedio mundial de composición de los ríos (Taylor y McLennan, 1985), los factores de enriquecimiento (FE) entre las observaciones y los promedios y los niveles guía para agua de consumo humano indicados por la Organización Mundial de la Salud (2003). En el área de estudio las aguas superficiales están poco mineralizadas, puesto que la mediana de la CE es de 450 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cuando se comparan las medianas de las concentraciones observadas para los elementos mayoritarios con los promedios mundiales de ríos se nota que todos tienen un orden de magnitud más alto, excepto Ca, Mg y K. Por lo general, en el área de estudio las aguas superficiales son de tipo bicarbonatado-sódico. Además, todos los elementos mayoritarios muestran concentraciones dentro de los límites establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2003) excepto el Na que tiene un valor máximo (336 mg l^{-1}) más alto que el valor límite (200 mg l^{-1}). Confrontando las medianas de los elementos trazas con el promedio mundial resulta que la mayoría tienen el mismo orden de magnitud. Algunos elementos de las tierras raras y Cs, B, Li, U, Rb, W, V, Fe, Sb, Ge, As, Ni, Be, Mn, Y, Br, Mo, Au y Sr tienen valores elevados, mientras que Al, Cu, Pb y Zn que tienen valores más bajos en el área de estudio que en el promedio mundial. Los FE varían entre 147 % para el Cs al 2 % para el Sr.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los elementos químicos se fraccionan diferencialmente cuando pasan de un fundido silicatado, el magma, a la nube de material particulado y volátiles que forman la pluma volcánica durante la erupción. Las cenizas volcánicas son complejas mezclas de material particulado compuesto por vidrio y fragmentos de cristales de diversos minerales. Por lo general, los elementos que tienen gran radio iónico y una carga baja son elementos incompatibles con una elevada capacidad de movilización hacia la fase volátil. Esto explica las elevadas concentraciones de elementos, como por ejemplo Cs, K, Li y Rb, detectadas en las cenizas volcánicas. Entre los elementos potencialmente tóxicos que presentan valores de FE más elevados se han detectado $\text{As} > \text{Sb} > \text{Pb}$, que tienen un comportamiento geoquímico calcófilo que implica una afinidad con el S.

La afinidad entre los elementos con altos factores de enriquecimiento en cenizas y aguas indica que en el contexto de la región de Antofagasta de la Sierra las cenizas juegan un papel muy importante como fuente de ETPT a las aguas. Dentro de estos elementos, sólo As, B, Br, Fe y U exceden los límites establecidos por la OMS para el consumo humano en las aguas estudiadas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se llevó a cabo en el marco del Grupo de Investigación Consolidado SGR - 2005 - 795 PEGEFA (Petrología y Geoquímica Fundamental y Aplicada), financiado por AGAUR - DURSI, Generalitat de Catalunya.

REFERENCIAS

- Código Alimentario Argentino (CAA, 1994). http://www.anmat.gov.ar/codigoa/Capitulo_XII_Agua_2007-05.pdf
- Cronin, S.J., Neall, V.E. Y Palmer, A.S., (1996): Investigation of an aggrading paleosol developed into andesitic ring-plain deposits, Ruapehu volcano, New Zealand. *Geoderma*, 69 (1-2): 119-135.
- Delmelle, P., Villieras, F. Y Pelletier, M. (2005): Surface area, porosity and water adsorption properties of fine volcanic ash particles. *Bulletin of Volcanology*, 67: 160-169.
- Heiken, G. Y Wohletz, K. (1985). *Volcanic Ash*. University of California Press, Berkeley, 245 pp.
- Johnston, D.M., Houghton, B.F., Neall, V.E., Ronan, K.R. Y Paton, D. (2000): Impacts of the 1945 and 1995-1996 Ruapehu eruptions, New Zealand: an example of increasing societal vulnerability. *Geological Society of America Bulletin*, 112, 720-726.
- Taylor, S.R. Y McLennan, S.M. (1985): *The Continental Crust: its Composition and Evolution*. Blackwell Scientific, Oxford, 312 pp.
- Organización Mundial de la Salud (OMS, 2003). http://www.who.int/water_sanitation_health/dwg/guielines/en/

Elementos	Mediana	Valor máximo	Valor mínimo	Promedio mundial de los ríos	FE	OMS
T ^a	-1,9	11,5	-5			
pH ^b	8,39	8,6	7,9			6,5-8,5
CE ^c	450	1740	262			
O ₂ ^d	2,4	5,8	1			
Na ^d	60,7	336	33,6	6,30	9,64	200
Si ^d	27,9	37,8	20,4	6,50	4,29	
Cl ^d	30,1	207	17,7	7,80	3,86	250
HCO ₃ ^d	192	576	93,8	53,0	3,62	
K ^d	7,89	33,1	5,34	2,30	3,43	
SO ₄ ^d	38,4	178	19,6	11,5	3,34	250
Mg ^d	8,27	31,5	3,54	4,10	2,02	
Ca ^d	23,3	52,3	17,1	15,0	1,56	
Cs ^e	2,93	8,30	0,14	0,02	147	
B ^e	1206	6673	452	10,0	121	500
Li ^e	119	541	57,4	3,00	39,8	
U ^e	0,97	5,69	0,14	0,04	24,3	2
Rb ^e	19,7	48,0	7,09	1,00	19,7	
W ^e	0,34	0,85	0,10	0,03	11,5	
V ^e	7,92	28,6	0,99	0,90	8,80	
Fe ^e	312	1976	6,86	40,0	7,81	300
Sb ^e	0,55	0,71	0,38	0,07	7,79	5
Ge ^e	0,03	0,23	0,01	0,005	6,10	
As ^e	10,5	54,1	1,98	2,00	5,23	10
Ni ^e	1,53	6,78	0,36	0,30	5,09	20
Be ^e	0,03	0,24	<0,01	0,01	3,36	
Mn ^e	23,0	63,0	0,01	7,00	3,28	500
Y ^e	0,13	1,13	0,01	0,04	3,19	
Br ^e	55,4	295	22,4	20,0	2,77	
Mo ^e	1,57	8,20	1,06	0,60	2,62	70
Au ^e	0,01	0,17	0,01	0,002	2,50	
Sr ^e	145	322	79,6	70,0	2,08	
P ^e	31,0	73,2	4,01	20,0	1,55	
Co ^e	0,15	3,51	0,01	0,10	1,53	
Cd ^e	0,01	0,05	<0,01	0,01	1,37	3
Ba ^e	20,9	37,2	5,49	20,0	1,05	700
Th ^e	0,04	0,17	0,01	0,05	0,83	
Ti ^e	1,93	9,09	0,68	3,00	0,64	
Zn ^e	12,7	26,3	7,85	20,0	0,64	5000
Sn ^e	0,02	0,08	<0,01	0,04	0,55	
Hg ^e	0,01	0,03	<0,01	0,07	0,16	1
Ga ^e	0,01	0,04	<0,01	0,09	0,12	
Al ^e	5,76	495	0,01	50,0	0,12	200
Se ^e	0,01	2,53	0,01	0,06	0,08	10
Cu ^e	0,44	3,72	0,01	7,00	0,06	2000
Pb ^e	0,02	0,48	<0,01	1,00	0,02	10
Ag ^e	0,00	0,05	<0,01	0,30	0,01	
Cr ^e	0,01	0,01	0,01	1,00	0,01	50
Zr ^e	0,09	1,03	0,02			
Nb ^e	0,01	0,03	<0,01			
Te ^e	0,01	0,01	0,01			
Hf ^e	0,01	1,12	0,01			
Ta ^e	<0,01	0,01	<0,01			
Pt ^e	<0,01	0,01	<0,01			
Tl ^e	0,01	0,03	<0,01			
Bi ^e	0,01	0,01	0,01			

^a: T en °C; ^b: unidad de pH; ^c: Conductividad Especifica (CE) en $\mu\text{S cm}^{-1}$; ^d: concentración en mg l^{-1} ; ^e: concentración en $\mu\text{g l}^{-1}$.

TABLA II. Comparación de los principales valores estadísticos de las concentraciones de los elementos mayoritarios, minoritarios y trazas de 15 muestras de aguas superficiales en el área de estudio con la media mundial de composición de los ríos (Taylor y McLennan, 1985), los factores de enriquecimiento (FE) respecto a dicha media mundial y los niveles indicados por la Organización Mundial de la Salud (2003).