

GEOQUÍMICA GLACIAR: REGISTRO CLIMÁTICO AMBIENTAL QUE SE PIERDE

Alejandro Carrillo-Chávez ^{1*}, Daniela K. Calvo-Ramos ¹,
Carolina Muñoz-Torres ¹ y Rocío García ²

¹Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla. Blvd. Juriquilla 3001, Juriquilla, Querétaro, C.P. 76230, México.

²Instituto de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México. C.P. 04510, México.

*ambiente@geociencias.unam.mx (autor para correspondencia)

RESUMEN

Alarmantes son las noticias sobre la desaparición de los glaciares en todo el planeta. En México aún quedan dos pequeños cuerpos de hielo (glaciares) en altas montañas del centro del país: Iztaccíhuatl (5215 metros sobre nivel del mar: ms.n.m.) y Citlaltépetl (5626 ms.n.m). Estos glaciares, localizados a 19° latitud norte y recibiendo precipitación (nieve) tanto del Océano Pacífico como del Golfo de México (Océano Atlántico), y muy cercanos a importantes zonas urbanas e industriales, contienen un registro de metales pesados en el ambiente de mucho interés para su comparación con otras regiones de alta montaña: Andes, Rocallosas, Alpes e Himalayas. Desde el 2006 se está trabajando en el Centro de Geociencias Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) Campus Juriquilla, con la recolección de muestras de nieve y hielo en estos glaciares mexicanos para análisis químicos de elementos mayores y metales pesados. A la fecha, se tiene ya una base de datos del 2006 a 2022 para hacer una evaluación de 16 años de monitoreo y presentar los resultados en una publicación internacional. Un análisis preliminar de estos datos muestra concentraciones considerables de V, Cr, Ni, Cu, Zn, Pb y Hg en nieve e hielo glaciar en aumento y comparables con datos del glaciar Sajama de Bolivia. El aumento va de valores preindustriales (valores naturales) a mayores concentraciones en las últimas décadas. En este artículo se describen en general las técnicas de Geoquímica Glaciar Ambiental modernas, se presentan datos preliminares como ejemplos, y se describen algunos proyectos actuales de la UNAM sobre esta línea de investigación.

Palabras clave: Geoquímica glaciar ambiental, metales pesados, Iztaccíhuatl, Citlaltépetl.

ABSTRACT

There is alarming news about the disappearance of glaciers around the planet. In Mexico there are still two small bodies of ice (glaciers) in high mountains in the center of the country: Iztaccíhuatl (5215 meters above sea level, m a. s. l.) and Citlaltépetl (5626 m a. s. l.). These glaciers, located at 19° north latitude and receiving precipitation (snow) from both the Pacific Ocean and the Gulf of

Mexico (Atlantic Ocean), and very close to important urban and industrial areas, contain an environmental record of heavy metals of great interest for comparison with Andean, North American, Alpine and Himalayan regions. Since 2006, the Centro de Geociencias UNAM, Campus Juriquilla, has been working on the collection of snow and ice samples from these Mexican glaciers for chemical analysis of major elements and heavy metals. Currently, we have a database from 2006 to 2022 to evaluate 16 years of monitoring concentrations of metals and present the results in an international publication. A preliminary analysis shows considerable concentrations of V, Cr, Ni, Cu, Zn, Pb, and Hg in snow and glacier ice comparable with data from the Sajama glacier in Bolivia. The concentration increase goes from pre-industrial time (natural values) to higher concentrations in the last decades. In this article, we describe modern environmental glacial geochemistry techniques, present some preliminary data as examples, and describe current UNAM projects in this line of research.

Keywords: Environmental glacial geochemistry, heavy metals, Iztaccíhuatl, Citlaltépetl.

INTRODUCCIÓN

Los glaciares son la acumulación de nieve transformada en hielo (sólido) que se mueve de acuerdo al basamento rocoso y pendiente hasta la zona de ablación o fusión (líquido), y se forman cuando la velocidad de acumulación de nieve y hielo es mayor a la velocidad de fusión de la misma. Esto se da cuando la temperatura promedio de la zona de acumulación-fusión de nieve es menor a cero grados centígrados. Estos procesos glaciares se dan en zonas polares como la Antártida (Polo Sur) y Groenlandia (Hemisferio Norte), los cuales se llaman Glaciares Continentales por su gran extensión continental. El espesor de estos glaciares continentales puede ser de varios kilómetros. Pero también las altas montañas de todo el mundo, dependiendo de la latitud y altitud, presentan glaciares (llamados Glaciares de Montaña), los cuales pueden tener centenas de metros de espesor, en algunos casos, y longitudes de decenas de kilómetros.

La nieve se precipita en la zona de acumulación junto con partículas sólidas micrométricas (aerosoles atmosféricos) y gases que se acumulan en poros de la nieve. Una vez precipitada, la nieve experimenta muchos cambios físicos (cambios en estructura cristalina nieve - hielo) formando hielo de varios tipos (toda una especialidad de la glaciología física - mineralógica glaciario) que no trataremos más en este artículo y que puede leerse en artículos especializados. Entre los aerosoles atmosféricos precipitados en la nieve y acumulados (registrados) en nieve-hielo glaciario tenemos: 1) Na, Cl, Mg, K, básicamente de fuente de brisa marina; 2) SiO₂, Ca, Fe, Al, Mg, y muchos más elementos y compuestos del polvo atmosférico; 3) C, Fe, Cd, Cr, Zn, Pb, Hg y algunos otros metales debido a incendios forestales; 4) SiO₂, Ca, Mg, Fe y muchos compuestos y elementos más derivados de ceniza volcánica de eventos locales, regionales y hasta mundiales (las grandes explosiones volcánicas arrojan ceniza volcánica micrométrica a grandes alturas 10 a 20 km de altura) y puede dar vuelta a todo el planeta en unas cuantas semanas; 5) Fe, Ni, Pt y elementos del grupo del platino, Cr, Cd, Zn, Ag, Au, y algunos otros metales derivados de impactos de meteoritos; 6) todos los elementos y compuestos derivados de la actividad humana (industria, combustión de hidrocarburos, incendios, agricultura, pesticidas, fertilizantes, etc.); 7) gases atmosféricos (O₂, CO₂, CH₄, SO₂, NO₂, CFC, etc.) que quedan atrapados en poros del hielo durante la transformación cristalográfica de nieve a hielo; 8) elementos cosmogénicos (isótopos cosmogénicos atmosféricos los cuales se forman debido a impacto de rayos cósmicos con átomos de gases atmosféricos, ejemplo: ¹⁴C, ¹⁰Be, ³⁶Cl, y otros más); y 9) recientemente se han detectado micro-plásticos en nieve de alta montaña. También se puede determinar la temperatura de precipitación (precipitación de verano cercana a cero grados centígrados, o precipitación de invierno temperaturas de 10 °C a 60 °C dependiendo de latitud y altitud) con base a isótopos estables en agua (²H y ¹⁸O). A la fecha (2022), existen técnicas de isotopía estable de metales que nos permiten diferenciar fuentes de metales en el registro glaciario (natural o antropogénico).

El hielo glaciario puede formar registros de varios kilómetros de espesor (glaciares continentales: Antártica y Groenlandia) o de centenares de metros en Glaciares de Montaña. El espesor y tiempo de acumulación de hielo (registro de hielo glaciario) depende de muchos factores climático-atmosféricos, pero en tiempo puede ser de millones de años (Glaciares Continentales) y de centenas o miles de años en Glaciares de Montaña. Los procesos glaciares son



Figura 1. Fotografía del frente del Glaciar de Jamapa, cara norte del Citlaltépetl en el centro de México (5100 ms.n.m.). Uno de los dos glaciares que aún existen en alta montaña en México (Octubre 2021). Se estima que la parte central del glaciar puede tener un espesor de 50 m.

bastante comunes en la historia de la Tierra desde el Precámbrico hasta el Holoceno. Evidencias de glaciares en tiempo geológico se tienen en los depósitos de rocas, grava, arena y arcillas, conocidos como morrenas, y algunos otros procesos. Pero los glaciares que nos interesan como un registro geoquímico de procesos ambientales atmosféricos superficiales son los heredados del Último Máximo Glacial (LMG, por sus siglas en inglés), y el cual se refiere a la época de máxima extensión de las capas de hielo durante el último período glacial, aproximadamente hace 20 000 años (Pleistoceno-Holoceno).

En este artículo hablaremos de algunas técnicas de Geoquímica Ambiental y Geoquímica Isotópica Ambiental aplicadas a nieve y hielo glaciario. Esto es básicamente para determinar el registro climático - ambiental e impacto antropogénico que se encuentra en la nieve y hielo glaciario. También se presentan datos preliminares de concentraciones de metales pesados medidos en diferentes años en el Iztaccíhuatl y el Citlaltépetl, se comparan con datos reportados para el Nevado Sajama en Bolivia y se comentan algunas posibles explicaciones sobre estas diferencias. Finalmente, mencionaremos algunos de los proyectos que se tienen actualmente en la UNAM sobre Geoquímica Glaciario Ambiental en los glaciares del Iztaccíhuatl (5230 m s. n. m.) y Citlaltépetl (5636 m s. n. m.), en el centro de México y las perspectivas a corto y mediano plazo de colaboración con instituciones de Sudamérica. Básicamente, la idea es mencionar la urgencia de describir el registro geoquímico ambiental de estos glaciares que se está perdiendo irremediablemente (Figura 1).

Carbon Negro

El Carbón Negro (CN) es un aerosol característico de la troposfera derivado de incendios forestales y, desde finales de los 1700's, de la combustión incompleta de los combustibles fósiles. El CN puede ser transportado a grandes distancias y depositarse en glaciares de alta montaña y continentales. Debido a sus propiedades absorbentes de luz, el CN puede oscurecer la superficie de la nieve o del hielo, afectar el balance de energía y la velocidad de fusión de una masa glaciario. Trabajos de investigación de CN en núcleos de hielo glaciario de Alaska y Himalaya muestran concentraciones promedio anual es de hasta 10 nanogramos/gramos (ng/g, partes por billón o ppb) con picos de hasta 100 ng/g de manera consistente desde 1930 y hasta el 2000 (Sierra-Hernandez *et al.*, 2022; Barker *et al.*, 2021). Estos datos de concentración de CN se complementan con modelos de circulación atmosférica para determinar las fuentes de CN en la atmósfera. Actualmente (2022) el Centro de Geociencias de la UNAM Juriquilla realiza una investigación de CN en nieve-hielo de los glaciares del Iztaccíhuatl y el Citlaltépetl.

Metales Pesados

Desde hace unos 6000 años hemos utilizado metales como el Cu, Fe, Zn, Au, Ag, entre otros, para nuestro desarrollo industrial y de la sociedad humana. Desde la revolución industrial (1700) hemos aumentado considerablemente el número de metales que utilizamos en la tecnología y en los procesos industriales. Pero en los últimos 40 años el número de metales utilizados en la tecnología moderna ha aumentado hasta unos 70. Un buen ejemplo del uso de estos 70 metales en la tecnología está en nuestros dispositivos móviles, ordenadores, automóviles eléctricos, baterías y otros dispositivos electrónicos. Por otro lado, algunos metales como Ca, Mg, Fe, Cu, Co, Cr, Zn, Mo, Li (entre otros) son básicos en los procesos metabólicos de las plantas, los animales e incluso los humanos. Como se ha mencionado anteriormente, estos metales



Figura 2. Extracción de un núcleo de hielo somero en el Glaciar del Citlaltépetl.

que flotan en la troposfera en forma de partículas milimétricas se depositan en la nieve y en el hielo de los glaciares, formando un registro ambiental.

Se ha obtenido una base de datos muy amplia de metales pesados en núcleos de hielo de Groenlandia, la Antártida y los Alpes. Por otro lado, Lonnie Thompson y su equipo de la Universidad Estatal de Ohio, comenzaron a perforar núcleos de hielo en los Andes peruanos (glaciares tropicales o de baja latitud). El equipo de Lonnie Thompson ha reunido una base de datos geoquímicos durante casi 40 años, fechados entre el 22 000 AP (antes del presente; Último Máximo Glacial) y la Pequeña Edad de Hielo 1300 a 1850 de la era común (e.c.). La conclusión más importante de estos trabajos indica que la fuente de metales procede principalmente del polvo de las rocas y del suelo, pero es necesario explicar otras fuentes (Ferrari *et al.*, 2001).

El análisis estándar actual de los metales pesados en el hielo y la nieve de los glaciares se realiza mediante las sensibles técnicas de ICP-MMS (Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente, por sus siglas en inglés) que pueden detectar fracciones de partes por millón (ppm) de metales en solución. Se han perforado núcleos de hielo en glaciares de montaña en



Figura 3. Muestreo de nieve recién precipitada y relacionada con la Tormenta Kay del Pacífico, primer semana de septiembre de 2022 en la zona de la “Panza de Iztaccihuatl” a 5150 ms.n.m. Fotografía de Jehú Hinojosa.

Tabla 1. Resumen de la concentración promedio para V, Cr, Ni, Cu, Zn y Pb para diferentes muestras de nieve y hielo glaciar (núcleo somero) para Iztaccihuatl y el Citlaltépetl durante diferentes temporadas de 2006 a 2021. Los datos están en microgramos por litro (partes por billón o 10⁻⁹). Prom: promedio; prof: profundidad. Altitud en ms.n.m.

Año	Localización	Muestra/ prof.	Altitud	V	Cr	Ni	Cu	Zn	Pb
2006	Iztaccihuatl	Nieve (20 cm)	3500 - 4720	0.50	0.20	0.30	0.10	5.40	0.0
2007	Iztaccihuatl	Núcleo (10-150 cm)	5100	0.50	1.00	7.50	2.89	39.12	0.35
2007	Citlaltépetl	Núcleo (10-150 cm)	5100	1.90	1.60	6.80	25.70	118.84	0.60
2008	Citlaltépetl	Núcleo (10-80 cm)	5100	0.60	0.50	5.58	4.64	38.24	0.31
2021	Citlaltépetl	Núcleo (10-100 cm)	5150	0.0	1.02	0.0	8.50	31.06	0.0
Prom				0.70	0.86	4.04	8.37	46.53	0.25

los Andes, Alaska, el Kilimanjaro, los Alpes y el Himalaya, pero las investigaciones de la UNAM apenas comienzan a recoger datos de metales pesados en los pequeños glaciares mexicanos. Los glaciares mexicanos son los únicos que se encuentran en zonas intertropicales en el hemisferio norte. Su ubicación geográfica, la proximidad a una de las mayores áreas metropolitanas del mundo (Ciudad de México), a grandes zonas industriales y la precipitación de la humedad de la nieve desde el Golfo de México (Océano Atlántico) y el Océano Pacífico, tanto en las tormentas de invierno como de verano, ofrecen una buena oportunidad para analizar el impacto antropogénico en la precipitación atmosférica registrada en la nieve y el hielo de los glaciares. Desde hace una década, se han tomado muestras de nieve superficial y de hielo glaciar (sondeos y testigos someros a 1 metro de profundidad) en el Iztaccihuatl y el Citlaltépetl para realizar análisis geoquímicos e isotópicos (²H y ¹⁸O). La Figura 2 muestra parte del trabajo de campo de perforación de un núcleo de hielo somero (1 m) a 5300 m s. n. m. en el centro del Glaciar de Jamapa del Citlaltépetl. La Figura 3 muestra la recolección de nieve recién precipitada (30 cm de acumulación en una noche) en la primera semana de septiembre del 2022 a 5200 m s. n. m. en la zona de la “panza” del Iztaccihuatl y que se relaciona directamente con humedad del Océano Pacífico debido a la tormenta Kay (6 de septiembre, 2022).

RESULTADOS PRELIMINARES

La Tabla 1 muestra un resumen de la concentración promedio de los elementos: V, Cr, Ni, Cu, Zn y Pb para el Iztaccihuatl y el Citlaltépetl durante diferentes temporadas de 2006 a 2021 (más de 20 muestreos diferentes) medidos en el Centro de Geociencias de la UNAM, Campus Juriquilla. La Tabla 2 compara los valores reportados por Ferrari *et al.* (2001) para muestras de núcleo de hielo tomadas a

Tabla 2. Comparación entre datos obtenidos por el grupo de climatología de la Universidad estatal de Ohio, dirigidos por el Dr. Lonnie Thompson (Ferrari *et al.*, 2001), y los promedios medidos en nieve y hielo glaciario de montañas de México en el Centro de Geociencias de la UNAM, Campus Juriquilla. n/r: no reportado.

Metal	Sajama	Sajama	Sajama	Sajama	Iztaccíhuatl	Citlaltépetl
	120 m	100 m	60 m	40 m	Superficie	Superficie
V	0.06	0.15	0.071	0.10	0.50	0.83
Cr	0.03	0.05	0.01	0.02	0.60	1.04
Ni	n/r	n/r	n/r	n/r	3.90	4.13
Cu	0.09	0.24	0.06	0.15	0.15	12.95
Zn	0.27	0.23	0.21	0.38	22.26	62.71
Pb	0.03	0.09	0.06	0.36	0.18	0.30

diferentes profundidades (120, 100, 60 y 40 metros de profundidad) del Glaciar del Sajama, Bolivia con datos promedio de las montañas mexicanas. Se aprecia que las concentraciones de V, Cr y Pb están en rango con diferencia de 1 orden de magnitud mayor en las de las montañas mexicanas con respecto a datos del Sajama, Bolivia. Las concentraciones de Zn y Cu son hasta de 3 órdenes de magnitud mayores en los glaciares mexicanos. Estas concentraciones más altas en nieve y hielo de glaciares mexicanos con respecto al Sajama en Bolivia tiene varias posibles explicaciones: 1) Las muestras de núcleos del Sajama son de una profundidad mucho mayor y representan edades mucho más antiguas (22 000 años AP para los 120 m de profundidad; 8000 años AP para 100 m de profundidad; año 1650 e.c para los 60 m de profundidad y 1897 e.c. para los 40 m de profundidad (Ferrari *et al.*, 2001).

De hecho las muestras para las profundidades 120, 100 y 80 m, podrían tomarse como valores base debido a fuentes naturales (polvo, cenizas por incendios, cenizas volcánicas, y otras fuentes naturales). Los datos de 40 m de profundidad (1987 e.c.) muestran un ligero aumento para los elementos V, Cu, Zn y Pb y puede ser debido a un incremento en la actividad industrial en Bolivia. Por otro lado, 1) las muestras del Iztaccíhuatl y el Citlaltépetl son del periodo entre 2006 a 2021, y representan la gran actividad industrial en el centro de México; 2) la cercanía de los glaciares mexicanos a importantes zonas industriales (petrolera, automotriz, metal-mecánica) y a una de las mayores zonas metropolitanas del mundo (Cd. de México) pueden explicar estas mayores concentraciones de metales en los glaciares mexicanos; y 3) el volcán Popocatepetl muy cercano al Iztaccíhuatl (15 km) y no lejos del Citlaltépetl (142 km de distancia). El Popocatepetl ha estado en actividad intermitente desde 1994 con erupciones periódicas de gases, cenizas y otro material volcánico. Sobre todo la erupción de cenizas (material con trazas de metales) y en la circulación en la parte alta de la troposfera lo que fácilmente permite la acumulación de cenizas-metales en la nieve y en el hielo glaciario de las altas montañas de México.

Por otro lado, el ^2H , isótopo pesado del H, y el ^{18}O , hacen que moléculas “ligeras y pesadas” de agua se evaporen y precipiten a diferente ritmo (fraccionamiento isotópico). Cuando se grafican los resultados de las mediciones de estos isótopos en agua (nieve y hielo) se puede determinar altura de precipitación y procesos como de evaporación, entre otros. Datos preliminares del ^2H y ^{18}O en nieve y hielo del Iztaccíhuatl y el Citlaltépetl, muestran procesos de evaporación normales en alta montaña.

Isótopos estables de metales

Los isótopos estables de metales en muestras ambientales (agua, suelo, materia orgánica, nieve-hielo glaciario) contienen información muy valiosa sobre las fuentes de los metales (natural o antropogénica) y los procesos geoquímicos que han afectado a las muestras. Por varias décadas la geoquímica isotópica tradicional se enfocó en análisis de ^2H , ^{18}O , ^{13}C , ^{15}N y ^{34}S . Gracias a los desarrollos de los últimos 20 años de la tecnología de química analítica, como el Multicolector de Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MMS, por sus siglas en inglés), se han logrado realizar mediciones de concentraciones muy pequeñas de diferentes isótopos de metales. A continuación se describen brevemente los isótopos estables de Zn, Cu, Fe y Hg y sus aplicaciones en geoquímica ambiental.

Zinc (Zn)

El zinc es un elemento muy utilizado en la industria moderna, en aleaciones, pinturas fertilizantes y pantallas planas y tiene otros usos industriales y tecnológicos. También el Zn es un importante elemento traza esencial en procesos metabólicos de plantas, animales y del ser humano. El Zn tiene cinco isótopos estables, ^{64}Zn (48.63 %), ^{66}Zn (27.90 %), ^{67}Zn (4.10 %), ^{68}Zn (18.75 %) y ^{70}Zn (0.62 %). La relación isotópica que más se usa es la de $^{66}\text{Zn}/^{64}\text{Zn}$, la cual en materiales geológicos varía aproximadamente 2 per mil (‰). Variaciones en la relación $^{66}\text{Zn}/^{64}\text{Zn}$ indican un fraccionamiento isotópico y son un buen indicador de procesos geoquímicos como disolución de fases primarias de Zn, precipitación de fases secundarias y procesos biogeoquímicos, así como de la determinación de posibles fuentes de Zn al medio ambiente (ej. naturales vs antropogénicas; Bullen, 2011).

Cobre (Cu)

El cobre es uno de los primeros metales en ser usados por el ser humano. Actualmente tiene muchas aplicaciones industriales: cables eléctricos, electrónica, aleaciones metálicas, pintura, tuberías y monedas. El cobre puede ser tóxico para los animales, pero forma parte de un grupo relativamente pequeño de elementos metálicos que son esenciales para la salud humana. El Cu y otros metales son necesarios para los procesos metabólicos normales, de tal forma que la dieta humana debe suministrar cantidades regulares para su absorción.

El Cu tiene dos isótopos estables: ^{63}Cu (69 %) y ^{65}Cu (31 %). En los materiales naturales, el rango medido de $^{65}\text{Cu}/^{63}\text{Cu}$ es de aproximadamente 9 ‰ para las muestras sólidas y de 3 ‰ para las muestras de agua (Larson *et al.*, 2003; Borrok *et al.*, 2008). De manera similar al Zn, el fraccionamiento isotópico del Cu se da por procesos de disolución (intemperismo químico) de fases primarias, precipitación de fases secundarias, procesos redox (óxido-reducción) y ahora se sabe que los procesos biogeoquímicos juegan un papel fundamental en el fraccionamiento isotópico del Cu y otros metales.

Hierro (Fe)

El hierro es el elemento más abundante en la Tierra y el cuarto elemento en la corteza terrestre. El Fe metálico tiene una gran variedad de aplicaciones como en metalurgia, industria del transporte, construcción y maquinaria en general. El Fe desempeña un papel importante en la biología y es un nutriente esencial para casi todos los organismos vivos (Weber *et al.* 2006). Los procesos de transformación y reciclaje del hierro son determinantes para el funcionamiento de los ecosistemas vegetales, forestales y agrícolas.

El Fe tiene cuatro isótopos estables: ^{54}Fe (5.6 %), ^{56}Fe (91.95 %), ^{57}Fe (2.18 %) y ^{58}Fe (0.30 %). El rango medido de la relación $^{56}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$ en materiales naturales es de $\sim 5\%$ (Severmann y Anbar, 2009). Se ha demostrado que tanto la oxidación inorgánica en menor grado como los procesos de oxidación y reducción mediada por los microbios de Fe(II) a Fe(III) en un grado mayor dan lugar a un fraccionamiento de isótopos estables de Fe y otros elementos (Bullen *et al.* 2011; Balci *et al.* 2006; Beard *et al.* 1999, Lotfi-Kalahroodi *et al.*, 2021).

Mercurio (Hg)

El mercurio se utiliza ampliamente en termómetros y otros aparatos científicos, amalgamas para restauraciones dentales, lámparas de vapor, cosméticos y telescopios de espejo líquido. Históricamente, el Hg se ha utilizado ampliamente en las operaciones de extracción de oro. Actualmente dada su toxicidad el uso de mercurio está prohibido en gran parte del mundo, pero su presencia en el medio ambiente aún es considerable. El mercurio y sus compuestos (por ejemplo, monometilmercurio (MeHg) y cloruro de mercurio) son extremadamente tóxicos y pueden ingerirse fácilmente por inhalación o absorción a través de la piel y las mucosas.

El mercurio tiene siete isótopos estables: ^{196}Hg (0.15 %), ^{198}Hg (9.97 %), ^{199}Hg (16.87 %), ^{200}Hg (23.10 %), ^{201}Hg (13.18 %), ^{202}Hg (29.86 %) y ^{204}Hg (6.87 %). El rango medido de $^{202}\text{Hg}/^{198}\text{Hg}$ en materiales naturales resultante del fraccionamiento dependiente de la masa (MDF, por sus siglas en inglés) entre los grupos de Hg coexistentes es de aproximadamente 7 ‰. Además, los isótopos estables del Hg muestran un considerable fraccionamiento independiente de la masa (MIF, por sus siglas en inglés), en el que los isótopos impares ^{199}Hg y ^{201}Hg se comportan de forma diferente a los isótopos pares en ciertas reacciones químicas como la reducción fotoquímica (Bergquist y Blum 2007), lo que conduce a importantes enriquecimientos y agotamientos de los isótopos impares en relación con los isótopos pares en las reservas ambientales de Hg.

Blum (2011) señala que la mayoría de las aplicaciones ambientales de los isótopos de Hg están relacionadas con: 1) la interpretación de la composición isotópica del MeHg presente en los sedimentos y organismos, o 2) la interpretación de la composición isotópica del Hg(II) asociado a los sedimentos o depositado en la superficie de la tierra o en una masa de agua. A la fecha, se está trabajando en un proyecto financiado por la UNAM para determinar concentraciones de Zn y Hg en nieve-hielo glaciar de Iztaccíhuatl y el Citlaltépetl, y medir fraccionamiento isotópico estable de $^{66}\text{Zn}/^{64}\text{Zn}$ y $^{202}\text{Hg}/^{198}\text{Hg}$. La idea básica es comparar estos datos con estudios en otras montañas y determinar su posible fuente natural o antropogénica.

Isótopos Cosmogénicos (^{10}Be)

Los isótopos cosmogénicos de berilio (Be) se forman cuando rayos cósmicos (neutrones y protones de alta energía que provienen de fenómenos astronómicos) chocan con átomos de oxígeno y nitrógeno en la atmósfera y provocan una serie de reacciones nucleares (procesos de espalación). Los isótopos de Be más útiles para su uso en las geociencias son el ^7Be de vida corta (vida media de 53.1 días) y el ^{10}Be de vida más larga (vida media 1.4 Ma; Nishiizumi *et al.*, 2007). Debido a que los rayos cósmicos que causan la cascada inicial de neutrones y protones en la alta atmósfera responsable de las reacciones de espalación son atenuados por la masa de la propia atmósfera, las tasas de producción de Be cosmogénico son tres órdenes de magnitud mayores en la estratosfera que a nivel del mar (Masarik y Beer, 1999, 2009). Por lo tanto, la mayor parte de la producción de Be cosmogénico tiene lugar en la atmósfera superior (5-30 km). Una vez que el Be cosmogénico se forma en la atmósfera, se precipita en lluvia, nieve, granizo y deposición seca.

En escalas de tiempo de décadas, las tasas de producción varían aproximadamente un 25 % con el ciclo solar de 11 años, pero en el transcurso de cientos de años, las tasas de producción pueden variar entre el 50 % y 75 % debido a los ciclos de mayor escala de tiempo en la actividad del sol (Koch y Mann, 1996; Vonmoos *et al.*, 2006; Berggren *et al.*, 2009). Como los rayos cósmicos se desvían hacia los polos, las tasas de producción de Be cosmogénico pueden ser de 3 a 5 mayores en atmósfera polar que en la atmósfera ecuatorial dependiendo de la altitud (Harvey y Matthews, 1989; Masarik y Beer, 1999). Por tanto, las atmósferas polares tienen mayores cantidades de Be cosmogénico, pero la mayor precipitación se da en glaciares tropicales.

El Instituto de Física de la UNAM cuenta con un Espectrómetro de Masas con Acelerador (Accelerator Mass Spectrometer; AMS por sus siglas en inglés), instrumento necesario para la medición de concentraciones de isótopos cosmogénicos (^{10}Be , ^{14}C , ^{36}Cl , ^{129}I , entre otros) en diferentes matrices en el orden de 10^{-15} . A la fecha, se están analizando las primeras muestras de ^{10}Be en hielo y nieve glaciar de alta montaña en México.

CONCLUSIONES

Los glaciares de alta montaña de México y de todo el mundo están desapareciendo a un ritmo alarmante. Los glaciares de México, aunque pequeños y en vías de desaparición, pueden aportar interesante información climática y ambiental de los últimos 100 años, o más, utilizando técnicas modernas de química analítica como la espectrometría de masas. Esta técnica permite la detección de fracciones de microgramos por litro (10^{-9} o partes por mil millones ppb) de metales disueltos o en partículas sólidas depositadas en nieve y hielo glaciar. La combinación de herramientas estadísticas y de geoquímica isotópica de metales puede ayudar en la caracterización de las fuentes de metales a la atmósfera; natural o antropogénica. Consideramos que las cooperaciones internacionales en proyectos conjuntos sobre geoquímica glaciar ambiental son muy importantes entre instituciones de investigación de México y otros países de América Latina. Esto permitirá una mejor interpretación de fuentes y cronología de aportes metálicos a la atmósfera (registro ambiental-climático), una mejor administración de los recursos hídricos y por supuesto de los hermosos parques nacionales y montañas de México y de los Andes (Thompson, 2017).

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento al “Grupo UNAM de apoyo para la perforación de núcleos de hielo en Pico de Orizaba e Iztaccihuatl”: Jaime Carrera, Dora Carreón, Erandi Cerca, Gabriela Ponce “Gaby”, Lorenzo Ortíz “Lencho”, Juan Carlos Gómez de la Fuente “Jano”, Samael Oliver “Sama”, Julio Zacatzi, Daniela Montaña “Dany”, Jehú Hinojosa, Eber Ramírez “Gerber”, Jonatán Hortelano “Jona”, Luis Acosta, Libertad Barrón, y Raúl Gómez. Este artículo y el trabajo actual de “Geoquímica de Núcleos de hielo” es posible gracias a los recursos del Proyecto UNAM-PAPIIT IN 110421 “Concentraciones y fraccionamiento Isotópico de Zn y Hg en agua de lluvia y hielo glaciar de alta montaña: procesos geoquímicos, fuentes y trayectorias de metales en el centro de México”.

REFERENCIAS

- Barker, J. D., Kaspari, S., Gabrielli, P., Wegner, A., Beaudon, E., Sierra-Hernández, M. R., & Thompson, L. (2021). Drought-induced biomass burning as a source of black carbon to the central Himalaya since 1781 CE as reconstructed from the Dasuopu ice core. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(7), 5615–5633. <https://doi.org/10.5194/acp-21-5615-2021>
- Bergquist BA, Blum JD (2007) Mass-dependent and -independent fractionation of Hg isotopes by photoreduction in aquatic systems. *Science* 318:417–420
- Borrok DM, Nimick DA, Wanty RB, Ridley WI (2008) Isotopic variations of dissolved copper and zinc in stream waters affected by historical mining. *Geochim Cosmochim Acta* 72:329–344
- Bullen, T. (2011). Stable Isotopes of Transition and Post-Transition Metals as Tracers in Environmental Studies. In: Baskaran M (ed) *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*, Advances in Isotope Geochemistry, Springer.
- Callender, E. (2014). Heavy metals in the environment – historical trends. In *Treatise on Geochemistry* (pp. 59–89). Elsevier.
- Ferrari, C.P., Clotteau, T., Thompson, L., Barbante, C., Cozzi, G., Cescon, P., Hong, S., Maurice-Bourgoin, L., Franco, B., Boutron, C. (2001). Heavy metals in ancient tropical ice: initial results. *Atmospheric Environment*, Vol. 35, p. 5809-5815.
- Harvey MJ, Matthews KM (1989) ⁷Be deposition in a high-rainfall area of New Zealand. *J Atmos Chem* 8:299–306.
- Larson PB, Maher K, Ramos FC, Chang Z, Gaspar M, Meinert LD (2003) Copper isotope ratios in magmatic and hydrothermal ore-forming environments. *Chem Geol* 201:337–350.
- Lotfi-Kalahroodi E, Pierson-Wickmann AC, Rouxel, O (2021) More than redox, biological or-ganic ligands control iron isotope fractionation in the riparian wetland. *Sci Rep* 11, 1933 (2021).
- Mathur R, Ruiz J, Titley S, Liermann L, Buss H, Brantley SL (2005) Cu isotopic fractionation in the supergene environment with and without bacteria. *Geochim Cosmochim Acta* 69:5233–5246.
- Masarik J, Beer J (1999) Simulation of particle fluxes and cosmogenic nuclide production in the Earth’s atmosphere. *J Geophys Res Atmos* 104:12099–12111
- Nriagu JO (1988a) A silent epidemic of environmental metal poisoning? *Environmental Pollution* 50: 139–161.
- Nriagu JO (1990a) The rise and fall of leaded gasoline. *Science of the Total Environment* 92: 13–18.
- Nriagu JO (1990b) Global metal pollution. *Environment* 32: 7–33.
- Sierra-Hernández, M. R., Beaudon, E., Porter, S. E., Mosley-Thompson, E., y Thompson, L. G. (2022). Increased fire activity in Alaska since the 1980s: Evidence from an ice core-derived black carbon record. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 127(2). <https://doi.org/10.1029/2021jd035668>
- Nishiizumi K, Imamura M, Caffee MW et al (2007) Absolute calibration of Be-10 AMS standards. *Nucl Instrum Meth Phys Res Sect B Beam Interact Mater Atoms* 258:403–413
- Thompson, L. (2017). Past, Present, and Future of Glacier Archives from World’s Highest Mountains. *Proceedings of the American Philosophical Society*. Vol. 161, No. 3, pp. 226-243.

Manuscrito recibido: 6 de octubre de 2022
 Manuscrito corregido recibido: 10 de marzo de 2023
 Manuscrito aceptado: 31 de marzo de 2023