

## Metales Pesados: De las Estrellas a su Mesa

Alejandro Carrillo-Chávez\*, Carolina Muñoz Torres

Centro de Geociencias UNAM, Campus Juriquilla. Blvd. Juriquilla 3001, Juriquilla, Querétaro, 76230 México

\*Correo electrónico: [ambiente@geociencias.unam.mx](mailto:ambiente@geociencias.unam.mx)

### Resumen

Los modelos astronómicos modernos indican que los metales pesados se forman en los núcleos de estrellas gigantes, en explosiones de supernovas y en colisiones de estrellas de neutrones. El polvo cósmico expulsado de esas explosiones forma nebulosas planetarias que inician un proceso de acreción, formación de nuevas estrellas y discos proto-planetarios que formarán, en parte, planetas rocosos con núcleos metálicos. Nuestro planeta Tierra se estratifica en un núcleo metálico (Fierro y Níquel básicamente, pero con muchos otros metales en menores concentraciones), un manto rocoso rico en Fe, Al, Mg, O y Si y una corteza rocosa rica en Al, Fe, Si, O, Ca, Na. La diferencia de densidades y flujo calorífico genera una tectónica de placas que, mediante procesos geoquímicos transporta metales desde el manto y hasta la corteza terrestre, donde se acumulan en yacimientos minerales metálicos. El desarrollo histórico, la industria y economía moderna de la humanidad se basan en gran parte en la extracción y proceso de metales. Actualmente dependemos en un gran porcentaje de los metales pesados para nuestra vida diaria, por ejemplo, algunos metales pesados son elementos traza esenciales en procesos metabólicos de plantas, animales y de nosotros mismos. La extracción sin control de los metales, ha alterado ciclos y concentraciones naturales de estos en el medio ambiente (agua, suelo y aire). Consecuentemente ha habido graves casos de desastres antropogénicos de contaminación por metales pesados. La geoquímica médica es una línea de investigación relativamente nueva que investiga los efectos positivos y negativos de metales pesados en nuestra dieta diaria. Se sabe que algunos metales pesados son necesarios en nuestros alimentos para tener una plena salud física y mental. Literalmente los metales pesados se forman en las estrellas y los disfrutamos en nuestra mesa.

### Introducción

Registros históricos indican que hace unos 6,000 años el ser humano ya sabía trabajar algunos metales; primero utilizó el cobre (Edad del Cobre), después descubrió estaño

y que combinándolo con cobre se obtenía un metal superior en calidad, el bronce (Edad del Bronce) y posteriormente utilizó ampliamente el hierro (Edad del Hierro), y en menor escala, pero muy apreciados y valorados, también aprendió a extraer y trabajar el oro y plata. Relatos bíblicos, y de otros libros antiguos, indican que el oro y la plata se trabajan muy bien hace 4,000 años. Desde hace unos 500 años antes de la era común (ac) y hasta los 1,700 de nuestra era, la química antigua, o alquimia, descubre otros elementos y se empiezan a hacer experimentos y compuestos con ideas de transformar elementos, intentos frustrados de transmutaciones a oro. Pero no fue sino hasta mediados de 1,700's que Antonio Lavoisier funda las bases de la química moderna, con experimentos bien desarrollados, para conocer compuestos y aislar elementos. A mediados y finales de 1,800's Dmitri Mendeléyev realiza una categorización y agrupación de los elementos conocidos en ese tiempo por medio de características químicas similares. Una verdadera obra maestra, que en la educación media nos enseñan, la famosa Tabla Periódica de los Elementos, ahora completa con elementos que no conoció Mendeléyev, pero que de alguna manera predijo algunas de sus propiedades químicas. Durante miles de años, cobre, bronce y hierro se utilizaron para la industria bélica (lanzas, espadas, flechas, escudos, armaduras, etc) y para herramientas básicas (hachas, arados, etc.) Pero, no fue sino hasta el inicio de la Revolución Industrial en Europa (1760-1840) que se empieza a dar un uso industrial a los metales transformándolos en máquinas, calderas, pistones, rieles de ferrocarril, máquinas de vapor, etc. Es decir, el nacimiento de la industria de la transformación de metales y aleaciones. A finales del siglo XIX y principios del siglo XX (1880 – 1910) esta industria se acelera de manera impresionante con el uso de petróleo y derivados como combustible y lubricantes para mover motores de todos los tamaños, desde motores pequeños para motocicletas hasta motores enormes de barcos, trenes y aviones. Todo esto motivado, básica y lamentablemente, por los conflictos bélicos. A la fecha, 2022 toda la actividad industrial, agrícola, extracción, construcción, comunicaciones, etc., del ser humano depende de los recursos naturales de la Tierra, principalmente de los metales. Un ejemplo lo tenemos en nuestras manos, un teléfono celular o tableta o una computadora moderna, que contienen en sus componentes unos 70 a 75 elementos, de los cuales unos 60 a 68 son metales. Lamentablemente, muchos de los conflictos bélicos en este tiempo son para controlar algún territorio rico en algunos metales muy bien valorados por la industria moderna. Este artículo tiene por objetivo presentar una breve descripción sobre: 1) los procesos astro-químicos, como la nucleosíntesis, para explicar la formación de los

metales pesados en estrellas de diferente tipo; 2) describir como se acumularon metales pesados en polvo cósmico (quizás material reciclado de varios ciclos estelares de formación y explosión de estrellas), y como este polvo forma un sistema planetario (una estrella central, planetas rocosos y gaseosos, y cuerpos mas pequeños rocosos, metálicos, de hielo, etc., orbitando la estrella); 3) como se han acumulado estos metales en nuestro planeta Tierra; 4) como explotamos y usamos los metales en la sociedad moderna; 5) como hemos creado un des-balance en las contracciones normales de metales en agua, suelo y aire (contaminación ambiental por metales); y 6) como algunos metales son parte del metabolismo vegetal, animal y humano (elementos traza esenciales en nuestro cuerpo), y como un exceso o déficit de metales en agua y alimentos puede causar graves problemas de salud. Literalmente haremos un recorrido desde las Estrellas y hasta su Mesa.

### Estrellas Formadoras de Metales – Procesos de Nucleosíntesis

Las estrellas son las verdaderas fábricas de todos los elementos que hay en nuestro planeta. De hecho, un caso interesante es el Helio, un gas raro no muy abundante en la tierra, pero que fue descubierto en el Sol, nuestra estrella, en 1868. Desde entonces se descubrieron principalmente Hidrógeno (92%), Helio (7.8 %), Oxígeno (0.061%); Carbono (0.03%), Nitrógeno (0.0084%), y pequeñas trazas de Neón, Fierro, Azufre, Magnesio y Sílice en el Sol, nuestra estrella. Estos descubrimientos se realizaron gracias a técnicas de espectroscopia y espectrometría, técnicas que analizan y miden el color o el espectro que genera un elemento bajo ciertas condiciones. Mediante esas técnicas, ahora sabemos que la composición química promedio del universo que nos rodea es de: Hidrógeno en un 74%, Helio en un 24% y todo los demás 90 elementos naturales solo un 2%.

Por otro lado, nuestro planeta Tierra tiene la siguiente composición promedio: Fe 32%, Oxígeno 32%, Sílice 15%, Magnesio 14%, Azufre 3%, y el resto de todos los demás elementos de la tabla periódica solo un 3%. Una simple comparación entre la composición química del Sol, el Universo y la Tierra, indica que la Tierra es una verdadera anomalía química en el Universo. Es decir, la composición química de la Tierra es muy diferente a todo el universo, y a excepción del Fe y Mg, no se ha detectado ningún otro metal en el Sol, de los que existen en nuestro planeta y usamos en nuestra vida diaria. Las preguntas, por tanto, son; ¿Como se forman los metales en el universo?, y ¿como se acumularon de manera anómala los metales en nuestro planeta, la Tierra?

La astroquímica es una ciencia compuesta por la química, astronomía y física. Trabaja con modelos\* de “nucleosíntesis estelar”, definida como “el conjunto de reacciones nucleares que tienen lugar en las estrellas y que son responsables de la creación de elementos químicos, algunos de ellos desde sus orígenes durante el Big Bang: como el hidrógeno, el helio y el litio”. Estos modelos se están refinando conforme se descubre mas sobre nuestro fascinante universo.

*\*Un Modelo es una representación de la realidad en escala y con muchas simplificaciones y basados en datos, pero haciendo muchas suposiciones. Un modelo es siempre imperfecto y una sobre-simplificación, pero muy útil.*

Muchos telescopios en la Tierra y algunos en orbitas terrestres o solares recaban una enorme cantidad de datos (color, temperatura, movimiento, cambios, espectros en todas las longitudes de onda, etc.) sobre las estrellas, las galaxias, supernovas, y recientemente fusión de estrellas de neutrones y ondas gravitacionales, tanto en nuestra galaxia “Vía Láctea” como también en los confines del universo observable. Instrumentos como el telescopio “Hubble” nos han maravillado por mas de 30 años con imágenes del universo. Ahora, toda la mira esta en el telescopio espacial “James Webb” con su prometedor alcance hacia el pasado cósmico. A continuación se expone un resumen del modelo de la “nucleosíntesis estelar”:

**1. Big-Bang (Gran Explosión Original).** Los procesos dominantes son: fusión nuclear para formar elementos adicionando protones y neutrones a un núcleo estable. Se forman las partículas elementales (neutrones, protones y electrones) y átomos de Hidrógeno (número atómico o número de protones en el núcleo, 1), Helio (número atómico 2) y posiblemente Litio (número atómico 3).

**2. Núcleos de estrellas como el sol y más grandes.** Los procesos dominantes son: Cadena Protón-Neutrón, Proceso Triple-Alfa, y Ciclo C-N-O. Se forman los elementos Helio (2), Litio (3), Berilio (4), Carbono (6), Nitrógeno (7) y Oxígeno (8), y muy posiblemente otros.

**3. Núcleos de estrellas masivas** de 1 a 3 mil veces mas grandes que el sol en diámetro (gigantes rojas y súper-gigantes rojas). Los procesos dominantes son: “Quema” de oxígeno y sílice, proceso alfa o captura de una partícula alfa (núcleo de Helio). Se forman metales como Sodio (11), Magnesio (12), Aluminio (13), Calcio (20) y hasta Fierro (26) u otros similares.

**4) Explosiones de Supernovas.** Los procesos dominantes en esta etapa son: Proceso de rápida “r” captura de neutrones en una semilla de Níquel (28), se forman



metales mas pesados que Fe y Zn. Y el proceso lento (“s” de slow en ingles) de captura neutrones. Se forman metales de transición como Ni(28), Cobre (29), Zn (30), Plata (47), Oro (79) y otros metales de número atómico entre 31 y 80.

**5) Fusión de Estrellas de Neutrones** (las explosiones mas grandes que se han detectado en el universo, y quizás fusión de hoyos negros), quizás son responsables de metales mas pesados en nuestra Tierra. Los procesos que se llevan a cabo en esta etapa aun no se conocen bien. Pero seguramente se entenderán detalles de la formación de elementos de la serie de los Actínidos: Torio (90), Uranio (92), Neptunio (93), Plutonio (94) y demás elementos radiactivos, inestables y de vida muy corta (la lista va en el Ununocio,118). Una vez formados los metales por procesos de enormes explosiones, difíciles de imaginar, en donde las condiciones son de muy alta temperatura y presión, prácticamente imposibles de reproducir en experimentos científicos en la Tierra, las nebulosas protoplanetarias constituyen la siguiente etapa para la acumulación (enriquecimiento) de metales en ciertas zonas de las galaxias.

#### Nebulosas Protoplanetarias

El 5 de Julio de 1054, algunos astrónomos chinos y árabes reportaron una estrella muy brillante que no se había observado en el cielo antes, una “Estrella Nueva o Nova en Latín”. Según los registros históricos, esta estrella “Nova”, fue notoria a la luz del día durante 23 días, y visible, y muy brillante, en cielo nocturno durante 653 noches. Después de ese tiempo la “Estrella Nova” se desvaneció de la misma manera que apareció. Actualmente solo es visible bajo un telescopio mediano y se observa como una mancha difusa o nebulosa. No fue sino hasta el año de 1731 que el astrónomo ingles John Bevis apunto su telescopio hacia el

punto que indicaban los registros de 1054 de los chinos y árabes, que la “Nebulosa del Cangrejo” fue descubierta. Esta nebulosa esta situada a una distancia de aproximadamente 6,300 años luz\* de la Tierra y ubicada en la constelación del Tauro, la nebulosa tiene un diámetro de seis años luz y su velocidad de expansión es de 1,500 km/s. El centro de la nebulosa contiene un “pulsar” o estrella de neutrones súper densa, llamado “Pulsar del Cangrejo”, que gira sobre sí misma a 30 revoluciones por segundo, emitiendo pulsos de radiación que van desde los rayos gamma a las ondas de radio. El descubrimiento de esta nebulosa produjo la primera evidencia de que las explosiones de estrellas masivas (gigantes y súper-gigantes) producen los que ahora se conoce como “explosiones de supernovas”, y como remanente queda una estrella de neutrones súper-densa o pulsar, y material expulsado, o nebulosa rodeando al pulsar. Y es precisamente aquí donde se forman metales pesados y se acumulan en el material que rodea a la estrella de neutrones. Este material rico en metales es expulsado y la nebulosa interactúa con otro material bajo la influencia de enormes fuerzas electromagnéticas y gravitacionales para formar nebulosas protoplanetarias, es decir criaderos de nuevos sistemas planetarios con la formación de una estrella (o varias estrellas – sistemas de estrellas múltiples) al centro y material solido rocoso-gaseoso girando en orbita a la(s) estrella(s), un sistema planetario en formación. A la fecha se han catalogado una gran cantidad de nebulosas planetarias y polvo cósmico considerados como criaderos de estrellas, y potencialmente sistemas planetarios.

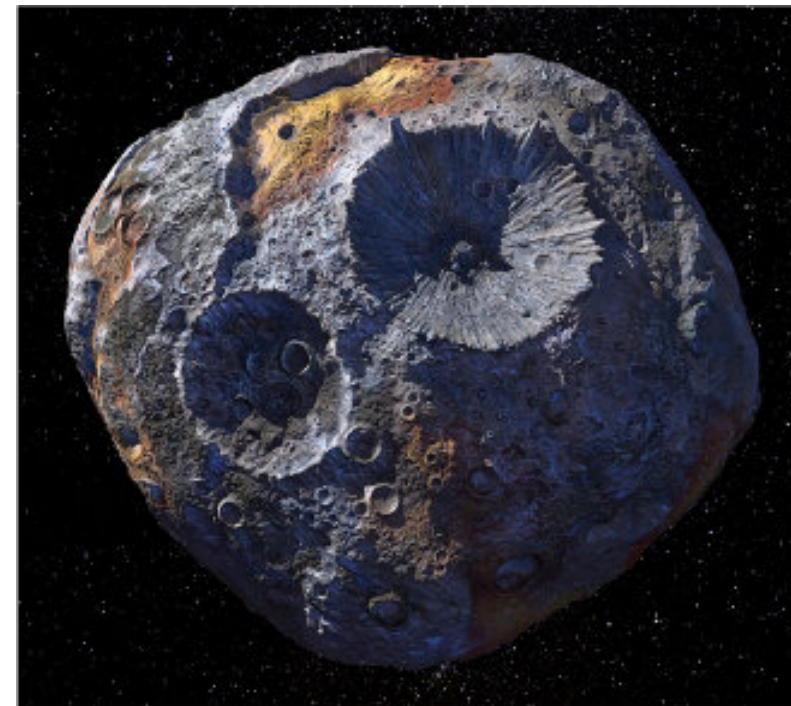
\* Año Luz: Distancia que equivalente a al recorrido de la Luz viajando a una velocidad de 300,000 kilómetros por segundo.



Figura 1. Nebulosa del Cangrejo, remanente de la “Supernova” observada en 1054. En el centro existe un “pulsar” o estrella de neutrones girando 30 veces por segundo. El material expulsado contiene metales pesados. Imagen de NASA compuesta por varias fotografías en diferentes longitudes de onda (multi-espectral; <https://apod.nasa.gov/apod/ap220304.html>).

#### Formación de planetas rocosos enriquecidos en metales

Un modelo para la formación de planetas rocosos ricos en metales como el nuestro es: 1) Acumulación de hidrógeno, helio y otros elementos en el disco protoplanetario bajo la acción de poderosas fuerzas electromagnéticas y gravitacionales generadas por el mismo material en movimiento; 2) 99.9 % de la masa del disco protoplanetario esta en la estrella central (estrella rica en Hidrógeno y Helio); 3) menos del 0.1% de la masa se distribuyo en: Planetas Rocosos, Planetas Gaseosos, Planetas Enanos, Satélites, Asteroides y Cometas; 4) La Tierra (planeta pequeño rocoso) dejo escapar grandes cantidades de hidrógeno y helio y acumuló Fe, O, Si, Mg, S y todos los demás elementos con ayuda del bombardeo de una gran cantidad de planetesimales o pequeños cuerpos sólidos rocosos y enriquecidos en metales en el disco protoplanetario. Un excelente ejemplo de uno de estos planetesimales metálicos que quedo en orbita solar es el asteroide 16Psique (16P, 16Psyche en ingles). 16P, descubierto en 1852, mide 226 kilómetros de diámetro y se localiza a unos 370 millones de kilómetros de nuestro hogar, situado en el cinturón de asteroides entre los



planetas Marte y Júpiter. 16P es una rareza o anomalía química (un total “outlier”) porque está compuesto básicamente de hierro y níquel, y quizás muchos otros metales en menos del 2 o 1% del total. Una teoría afirma que este asteroide fue el núcleo metálico de un antiguo planeta del sistema solar que tenía el tamaño de Marte y perdió todas sus capas exteriores, hace miles de millones de años por colisiones con otros cuerpos. Algunas estimaciones indican que el valor económico total de todos los metales de 16P, podría superar los US\$10,000 cuatrillones. Teniendo en cuenta que el valor de la economía global en 2019 era de US\$142 billones de acuerdo al portal de datos alemán “Statista”, podría decirse que los minerales de 16P valen unas 70.000 veces más. Por supuesto, esto es un sueño del ser humano, el minado espacial, aun es un muy lejano sueño. De hecho, ya hay una misión NASA programada para lanzar un robot explorador a 16P en agosto de este año (2022), para llegar a 16P en 2026 y durante dos años orbitarlo y enviar información (básicamente sobre su composición química) muy valiosa a la Tierra

Figura 2. Imagen artística basada en fotografías reales de 16P tomadas por la NASA. La Misión NASA 16P enviara una sonda espacial en Agosto del 2022. Se planea que la sonda llegara en 2026 a 16P y lo orbitara durante dos años tomando gran cantidad de información.

#### Tierra; “Anomalía Química” en el Universo

Nuestro hermoso Planeta Tierra es también un “outlier” o anomalía química en el universo con: 1) una composición química, 2) estructura interna, 3) material solido, liquido y gaseoso, 4) dinámica interna y externa, 5) una constante interacción entre los medios sólidos, líquidos y gaseosos, y 6) con ciclos bien definidos. Todo esto y mucho mas hacen de nuestro planeta una verdadera “aguja del pajar”, o un pequeño diamante en 10 toneladas de roca. De hecho,

NASA y otros centros de investigación por todo el mundo están enfocando la mira en planetas similares a la tierra en otros lugares del nuestra galaxia y hay quienes quieren ir mas allá (la búsqueda de exoplanetas\*).

\*(Nota: Para Octubre de 2021 se habían confirmado 4,852 exoplanetas en 3.586 sistemas, 800 de los cuales tienen más de un planeta, pero estas cifras crecen constantemente).



Mencionamos en la Introducción que la composición química general de la Tierra es de Fe 32%, O 30%, Si 15%, Mg 14%, S 3%, y el resto de los elementos 3%. Es decir, solo 3% para los otros 87 elementos (más de 65 metales). Analicemos brevemente la estructura interna de la Tierra para conocer y entender la distribución en composición y condiciones de las diferentes capas de la Tierra. En general tenemos: 1) un núcleo interno sólido constituido por Fe (80% aprox), Ni (5.8%) y Azufre (4.5%), y quizás muchos otros metales en concentraciones de traza (menos de 1% o fracciones más pequeñas), con un radio de 1,200 km; 2) un núcleo externo, siguiente capa de Fe, Ni y S y trazas de otros metales, todos fundidos con 2,300 km de espesor; 3) la capa del manto rocoso de unos 2,800 km de espesor constituido por Sílice 21%, Oxígeno 44%, Magnesio 23%, Hierro 5.8%, Calcio 2.3%, Aluminio 2.2% y trazas de otros metales y elementos en general. Estos elementos se



Figura 3. Nuestro Planeta La Tierra, una verdadera anomalía química (y bioquímica) en el universo. Apodado por los astronautas como la “Canica Azul” (Blue Marble). Fotografía NASA tomada por astronautas de la Misión Apollo 17 en 1972.

#### Yacimientos Minerales Metálicos en la Tierra

La composición química general de la corteza continental es: oxígeno (46.6%), sílice (27.7%), aluminio (8.1%), el hierro (5.0%), calcio (3.6%), sodio (2.8%), potasio (2.6%) y magnesio (2.3%). En promedio, metales como cobre, zinc, cadmio, estaño, y otros están en cantidades de mg/kg en rocas y suelos de la corteza. Metales como oro, plata, platino, mercurio, se encuentran en concentraciones de mg/kg (partes por millón) o fracciones. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, la dinámica de la corteza, asociada a las dinámicas del manto externo de la Tierra (Litósfera Terrestre, la capa sólida más externa de la Tierra); y de la Astenósfera (capa del manto superior con condiciones plásticas) ubicado por debajo de la Litósfera,

combinan en silicatos metálicos (Al, Fe, Mg, Ca) en fases minerales muy interesantes y que aun estamos descubriendo. Investigaciones recientes indican que podría haber cantidades importantes de agua atrapada en el manto a alta presión y temperatura que tiende a fugarse hacia zonas de menor presión. Finalmente tenemos una delgada capa, en comparación con las otras, y la cual llamamos corteza de la Tierra con un espesor de 6 a unos 50 km. Pero, es aquí en la corteza en donde se desarrolla toda la dinámica de la Tierra para enriquecer metales en zonas con características muy particulares, los llamados Yacimientos Minerales Metálicos, que explotamos desde hace miles de años y en particular durante los últimos 500 años por unos cuantos metales, pero en la actualidad explotamos más de 65 metales para prácticamente todas nuestras actividades modernas.

juegan un papel fundamental para transportar metales en solución en agua a muy alta temperatura, y bajo condiciones de acidez desde el manto superior. El agua del manto superior combinada con azufre, cloro y metales, forma compuestos sulfurosos y clorados de metales. Este es el reino de la Metalogenia o Yacimientos Minerales, línea de investigación que tiene el objetivo de explorar y explotar yacimientos metálicos con fines económicos. La tectónica de placas terrestres controla, de manera general, la distribución de los yacimientos minerales metálicos (YMM) en la Tierra. Un YMM es definido como la concentración anómala de uno o varios metales enriquecidos varios órdenes de magnitud a su promedio en la corteza terrestre, y localizados en una área

relativamente pequeña, otra anomalía química, ahora en la corteza de la Tierra. Existe toda una especialidad para clasificar e investigar los diferentes yacimientos metálicos, entre los más importantes tipos de YMM tenemos: vetas metálicas hidrotermales, sulfuros masivos, pórfidos cupríferos-auríferos, yacimientos diseminados, yacimientos de placer, etc. Aquí solamente mencionaremos que la necesidad de usar metales en la industria y economía nos ha conducido a explotar concentraciones de Cu o Zn en el rango de 2-5% (unos 20

a 50 kg por cada tonelada de roca), y metales como oro o platino en concentraciones de 1 mg/kg (1 gramo de oro o platino por cada tonelada de roca). El que una mina opere económicamente depende de la oferta y la demanda del metal o metales explotados. El precio de metales y acciones de empresas mineras se compran y venden todos los días en las Bolsas de Valores de todo el mundo. Somos una sociedad moderna que dependemos de los metales en gran manera, y nuestra necesidad de metales aumenta día con día.

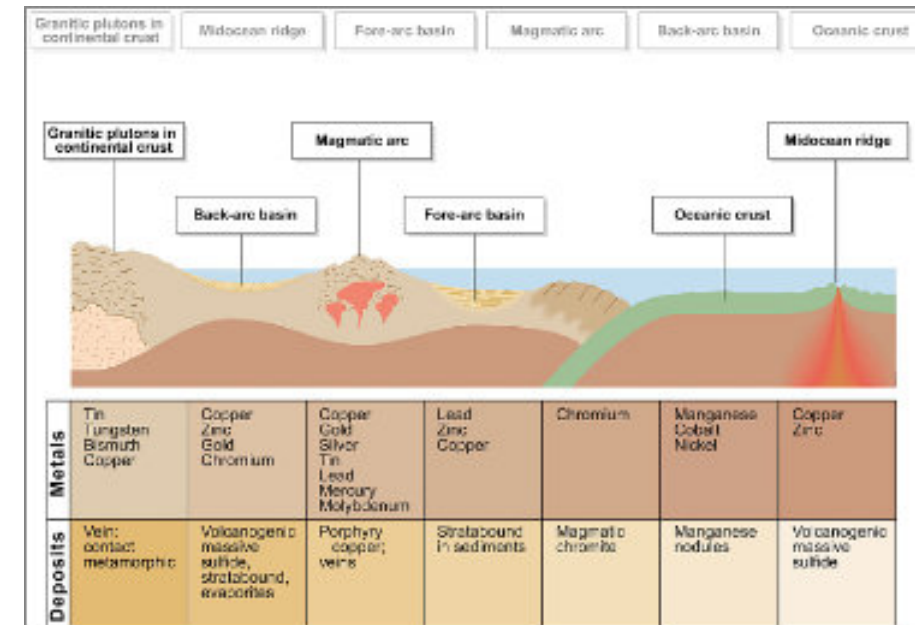


Figura 4. Diagrama esquemático que relaciona el marco tectónico (tectónica de placas) con los diferentes yacimientos minerales metálicos. Tomado de Skinner and Porter, 1987.

#### Metales, Industria Extractiva, Transformadora, y Economía Mundial

Mencionamos anteriormente que la economía mundial de los metales extraídos y procesados en 2019 alcanzó los US\$142 Billones. A la fecha se explotan enormes yacimientos de oro en sistemas pórfidos cupro-auríferos con leyes de 1 gr/ton o menos, pero con explotaciones diarias de miles de toneladas. Minado de plata, cobre, zinc, estaño, antimonio, por mencionar algunos metales, esta en máximos históricos. Y que podemos decir del litio, mineral de moda, o de las Tierras Raras, si, los lantánidos que hace 40 años se consideraban simplemente “raros” y ahora son parte fundamental de la electrónica moderna, desde nuestros teléfonos celulares y hasta la tecnología espacial. De la industria extractiva de metales pasamos a la industria transformadora: componentes eléctricos y electrónicos, aleaciones más ligeras y resistentes, conductores, industria automotriz, baterías para autos eléctricos, componentes para celdas fotovoltaicas y para turbinas aerogeneradores, transporte desde bicicletas hasta la estación espacial y el telescopio espacial Webb, etc., la lista es prácticamente interminable. Estos son

algunos ejemplos de la industria de los metales y nuestra dependencia tecnológica y económica en tiempos modernos. Sin embargo, toda esta industria de metales no ha sido gratis, de hecho estamos pagando un precio muy alto como humanidad, el precio es el aumento de metales en agua que bebemos, suelo que cultivamos y aire que bebemos; si la contaminación ambiental por metales.

#### Geoquímica Ambiental de Metales

La Geoquímica Ambiental es la parte de la geología y de la química que cuantifica, evalúa y determina si una zona en la Tierra tiene exceso de metales derivados de fuentes naturales y/o fuentes antropogénicas y que pueden afectar a la vegetación, animales y ser humano. Además, la Geoquímica Ambiental estudia los procesos que controlan las reacciones agua-roca, liberación, transporte y acumulación de un metal en diferentes medios: agua, suelo, vegetación. Lamentablemente, como humanidad siempre aprendemos a la mala, es decir después de una catástrofe ambiental empezamos a preguntarnos “¿qué es lo que pasó y porque pasó?”.



Las investigaciones de Geoquímica Ambiental empezaron desde la década de los 1960's y solo después de casos lamentables como: Minamata en Japón, Love Canal y Summitville en EUA, y muchos otros en todo el mundo. Describiremos brevemente estos tres casos de desastres ambientales y contaminación por metales. La bahía del Minamata, localizada en la ciudad de Kumamoto, isla de Kyushu de Japón, en la cual operaba la compañía Chisso Corporation, que entre 1932 y 1968 vertieron en esa bahía unas 27 toneladas de compuestos de mercurio. Resultado de ese vertimiento: más de 2,500 personas empezaron a sufrir de un desorden neurotóxico llamado la "Enfermedad de Minamata", cuyos síntomas son, alteración sensorial en manos y pies, deterioro de los sentidos de la vista y el oído, degeneraciones del sistema nervioso, des-coordinación en el movimiento de las partes del cuerpo, debilidad, movimientos involuntarios, desmayos, ceguera, y en casos extremos, parálisis y hasta la muerte, todo por causa de que el metilmercurio arrojado a la bahía había entrado en la cadena alimenticia a través de la ingestión de pescado y de marisco contaminado. La planta química Chisso Corporation fue cerrada y se inició una profunda investigación de las causas y la ruta del mercurio hasta el ser humano, y se iniciaron programas de remediación y limpieza. A la fecha la bahía de Minamata esta limpia de mercurio y en la ciudad de Minamata se estableció, desde 1978, el Instituto de Nacional de la Enfermedad de Minamata, institución de investigación de alto nivel para estudiar los efectos de mercurio en sistemas orgánicos, incluido el ser humano. Teniendo en cuenta los efectos sobre la salud humana del mercurio, se aprobó el Convenio de Minamata, que sirvió de base para que se expidiera la Ley 1658 de 2013, por medio de la cual se establecen estrictas normas para la comercialización y el uso de mercurio (prácticamente prohibición de uso de mercurio).

Segundo caso; la zona de "Love Canal", esta es una localidad situada en Niagara Falls (Nueva York). Esta zona protagonizó uno de los mayores desastres ambientales que se conocen. Esta zona urbana se construyó encima de un antiguo basurero de residuos industriales altamente tóxicos que acabó contaminando sus aguas y suelo. ¿Qué ocurrió exactamente? El empresario William T. Love comenzó en 1894 la construcción de un canal que uniría el Lago Ontario con el río Niágara. La obra quedó a medio construir por la falta de recursos. Entre 1942 y 1952, la zanja cavada para el canal se convirtió en un vertedero de basura cuando la empresa "Hooker Chemical" depositó 20.000 toneladas de productos químicos tóxicos en ella. En el año de 1953 la Junta de Educación de Niagara Falls expropió por un dólar simbólico los terrenos para construir el barrio de Love Canal. La empresa química advirtió de los

peligros de edificar sobre aquellos terrenos, renunciando a toda responsabilidad por los daños futuros debido a la presencia de los productos químicos enterrados. Pese a ello, el gobierno local consideró suficiente sellar el vertedero con varias capas de arcilla y tierra. Pero se equivocaron. La construcción de la zona urbana se completó. Los desechos tóxicos escaparon al ser lixiviados por el agua de lluvia, haciendo que los productos químicos enterrados se filtraran al canal. Durante los años siguientes, los vecinos advirtieron la presencia de líquidos de color oscuro y malos olores saliendo de las alcantarillas, así como problemas respiratorios, de fertilidad, taras genéticas, numerosos casos de cáncer, y la contaminación de las aguas del río Niágara. No fue hasta la primavera de 1977, que la Agencia de Protección Ambiental (EPA) comenzó a estudiar los problemas de Love Canal, y un año después el Departamento Estatal de Salud de Nueva York ordenó al Departamento de Salud del Condado restringir el acceso al área, e iniciar estudios de salud financiados por el propio Estado. Los resultados mostraron la presencia de 200 sustancias químicas contaminantes en el agua, algunas de ellas ricas en metales pesados. Finalmente, en 1980 el "Love Canal" se reconoció como zona catastrófica por la EPA y se financiaron programas de re-mediación ambiental (limpieza). A la fecha la zona esta deshabitada, pero los niveles de contaminación son muy bajos.

Finalmente tenemos el caso de la mina de Summitville, Colorado. Esta mina de oro y plata esta ubicada en el condado de Rio Grande, Colorado, en la montañas Rocallosas a unos 40 km al sur de Del Norte. Este lugar es recordado por el daño ambiental causado en la década de 1980's por el drenaje ácido de minas y la lixivian de metales pesados a arroyos locales y finalmente al río Alamosa. La extracción de oro y plata comenzó en Summitville alrededor de 1870 mediante minería clásica de túneles y socavones. Pero, después de varios dueños, en 1986 se iniciaron operaciones a tajo abierto por la Summitville Consolidated Mining Corporation. El sitio fue abandonado en 1992. De manera natural existía en el sitio mineralizado drenaje ácido de rocas (reacción de oxidación y disolución de la Pirita (sulfuro de hierro) que libera Fe en solución y ácido sulfúrico. Este ácido sulfúrico acidifica el agua y mas metales entran en solución. El drenaje natural del sitio siempre había tenido arroyos ácidos y metales en solución. Pero las labores de minería, especialmente desde las operaciones a tajo abierto, aumentaron considerablemente el proceso de drenaje ácido de minas y lixiviación de metales pesados hasta el río Alamosa y el valle. Los elementos liberados al medio ambiente son cobre, manganeso, zinc, plomo, níquel, aluminio y fierro. La Agencia de protección ambiental de los EUA (US-EPA) tomó control del sitio en diciembre de

1992. Finalmente el sitio fue colocado en la Lista de Prioridades Nacionales de sitios "Superfund" o súper-financiamiento para control y remediación en mayo de 1994.

Como se ha mencionado anteriormente, la minería de metales es una de las mayores industrias actualmente, soporte de la economía, tecnología en todos los aspectos, desarrollo social y hasta la tecnología espacial. Sin embargo, el precio que estamos pagando es muy alto. Los residuos de la minería se consideran los mayores residuos por volumen al momento (jales y terreros mineros). Hemos alterado significativamente los ciclos naturales de metales en el medio ambiente: agua que bebemos, suelo



Figura 5. Mina del Cañón Bingham en Utah, es la mina mas grande del mundo (tajo abierto) con una profundidad de mas de 1,200 m y 4 km de diámetro. Esta mina ha producido unos 17 millones de toneladas de cobre, pero ha dejado cientos de millones de toneladas de residuos mineros (jales mineros) potencialmente ricos en metales y metaloides. Fotografía: Alejandro Carrillo.

### Geoquímica Médica

La grave contaminación por mercurio, otros metales y sustancias derivados de la industria y su consecuente impacto en la salud del ser humano en Minamata, Love Canal, Summitville y muchos otros sitios, detono la investigaciones a nivel mundial sobre el efecto de metales (y otras sustancias) en plantas animales y finalmente en el ser humano. Esta línea de investigación, relativamente nueva, sobre la relación entre metales y otra sustancias y la salud humana es conocida como la Geoquímica Médica. Algunas enfermedades que se relacionan con altos contenidos de ciertos elementos en la ingesta humana son: 1) Fluorosis (exceso de Flúor en agua), mas de 43 millones de personas sufren este problema en China y otros millones en todo el planeta; 2) Desorden por deficiencia de Iódo, mas de mil millones de personas

que cultivamos y aire que respiramos. Y si bien, necesitamos algunos metales en nuestras funciones metabólicas (fierro en sangre, calcio en huesos, zinc en algunas glándulas, etc.), un exceso o déficit de metales en nuestra ingesta puede conducir a graves problemas de salud. Y por supuesto, hay metales que no tienen ninguna función metabólica en el ser humano, pero que existen en el medio ambiente, principalmente por aporte antropogénico, que causan muy graves problemas de salud. A raíz de esta relación entre metales y otros elementos y la salud humana, es que surgió hace unas décadas la rama de la Geoquímica Médica, encargada de investigar el papel que juegan los metales en procesos metabólicos en el ser humano.

padecen este mal a nivel mundial; 3) Exceso de arsénico, toxico y cancerígeno. Casos bien documentados en Taiwan, Chile, Argentina, México, China, Bangladesh e India; 4) Muchas otras enfermedades atribuidas a déficit o exceso de metales como fierro, cobre, aluminio, titanio, mercurio, etc. No hay duda de que la vieja frase "somos lo que comemos" es mas cierta ahora que nunca. Y la industria moderna ha alterado los ciclos naturales de metales y otros elementos en el medio ambiente, a saber, agua que bebemos, suelo que cultivamos y aire que respiramos. Recientemente (últimos 20 años) se ha iniciado el mapeo de elementos en zonas rurales, urbanas e industriales, junto a el desarrollo estadístico de índices de contaminación ambiental a fin de conocer concentraciones naturales vs antropogénicas (afectadas por el ser humano) en suelo, agua y aire.



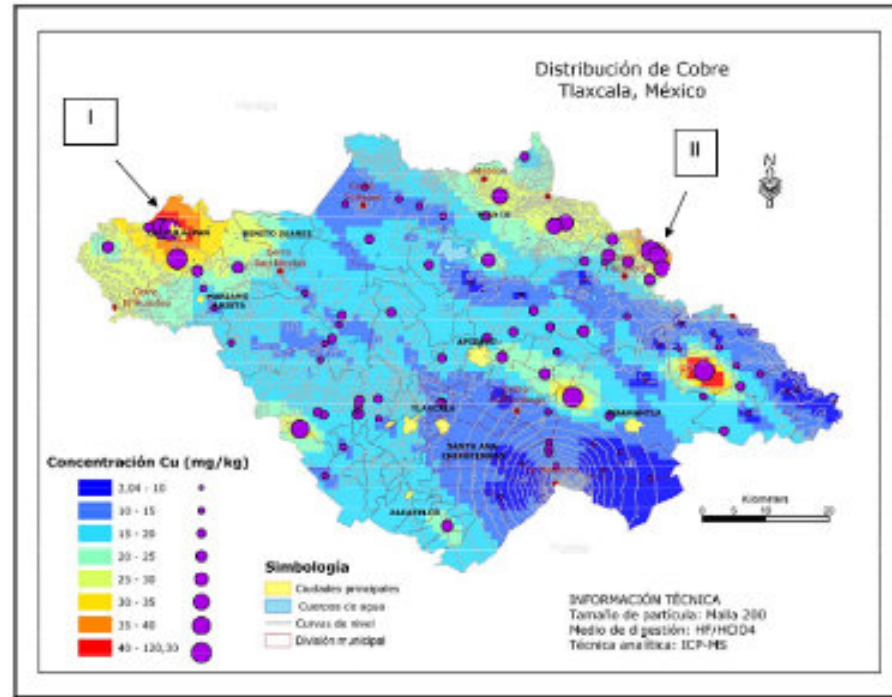


Figura 6. Mapa de Distribución de cobre en suelo (30 cm) del estado de Tlaxcala. Atlas Geoquímico del Estado de Tlaxcala, Carrillo Chávez y otros 2007.

#### De las Estrellas a su Mesa

Finalmente llegamos a los metales en nuestra mesa (alimentos y bebidas). Los principales elementos en nuestra dieta diaria son por supuesto carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, todos estos en forma de agua (el agua debe de tener unos 200 mg/l de Ca, Na, K, Mg, carbonato, sulfato y cloro); complejas proteínas, grasas, hidratos de carbono y vitaminas. Estos son llamados elementos mayores esenciales y se encuentran en todos los alimentos

que ingerimos. Pero también existen los elementos trazas esenciales, es decir, elementos esenciales en procesos metabólicos de nuestro cuerpo pero que se encuentran en concentraciones muy bajas y que requieren de un perfecto balance para que nuestro organismo funcione correctamente. La Tabla 1 muestra la relación entre algunos metales y metaloides (As y Se) como nutrientes esenciales traza en nuestro metabolismo y sus efectos por deficiencia y/o exceso en la dieta en alimentos y/o bebidas.

Elemento	Prom. Cuerpo	Año reconocido	Función	Efectos/def.
Fe	60 mg/kg	Siglo XVII	Transporta O <sub>2</sub> en sang.	Anemia
Cu	1.0	1928	Cu + Fe, enzimas	Anemia, prob. Huesos, colest.
Zn	33	1934	Metabol.	Prob. de crecimiento
As	18	1977	desconocido	desconocido
Cd	0.7	1977	desconocido	desconocido
Cr	0.03	1959	Insulina	Diabetes
Se	- - -	1957	Enzimas, Se + metales	Problemas de Corazón

Tabla 1. Relación entre elementos traza esenciales, su concentración promedio en nuestro cuerpo, su función metabólica y efectos por déficit y/o exceso en nuestra dieta.

Ademas de las funciones indicadas en la Tabla 1, se están encontrando otras funciones metabólicas de metales en nuestro organismo, por ejemplo, como el cobre es fundamental en funciones cerebrales-sinápticas. También se esta descubriendo y estudiando la relación de nanopartículas de oro en funciones neuronales. De hecho, la relación entre metales traza y funciones metabólicas es una linea de investigación muy reciente. Algunos ejemplos de investigaciones sobre metales pesados y alimentos y bebidas son: a) metales pesados en suelos, uvas y vino; b) cadmio, cobre y plomo en diferentes tipos de queso; c) metales pesados en diferentes cosechas, etc. En fin, esta linea de investigación de metales pesados en nuestros alimentos y su efecto benéfico o perjudicial sigue avanzando a grandes pasos conforme se avanza también en los métodos de instrumentación química analítica.

#### Conclusiones

Los metales pesados son parte fundamental de nuestra vida cotidiana, los usamos en muchos aspectos de nuestra vida. La industria moderna y la economía mundial dependen en gran manera de los metales pesados y sus aleaciones y aplicaciones en nuevos materiales. También se esta descubriendo que algunos metales pesados tienen funciones metabólicas en diferentes organismos (plantas y animales), y en nuestro propio cuerpo. Pero también un efecto tóxico cuando existe un desbalance en su ingesta (déficit y/o exceso). Todos recordamos la fortaleza de "Popeye" al comer sus espinacas ricas en hierro, pero ahora se esta descubriendo que muchas otras plantas son excelentes fuentes de hierro, cobre, zinc, y otros metales esenciales traza en nuestro organismo.

Por otro lado, la astroquímica descubre detalles de la formación de estos metales pesados en explosiones estelares de proporciones fuera de nuestra imaginación. Después viene la evolución de nebulosas planetarias y formación de planetas similares a nuestra Tierra. La astronomía moderna se enfoca en parte a la búsqueda y caracterización de exoplanetas. Sin embargo, por el momento y por mucho tiempo por delante, solo tenemos

nuestro hermoso Planeta Tierra, una anomalía química y bioquímica en el universo que nos provee de los metales pesados para nuestra industria y para alimentarnos, literalmente nuestro planeta tiene los Metales Pesados formados en las estrellas y dispuestos en nuestra mesa.

#### Biografía

A. Carrillo-Chávez, J. Calzada Mendoza, O. Morton Bermea, E. Alvarez Hernández, A. Delgado, R. Ortiz, E. Socorro Soto, I. Navarro de León, 2007. Atlas Geoquímico del estado de Tlaxcala. Proyecto de Fondos Mixtos (FOMIX). Clave Clave TLAX-2002-C01-1981

Astronomy Today, 2013, Chaisson, E. and McMillan S. 8th Edition, Pearson Education. Earth: An Introduction to Physical Geology, 2013. Tarbuck, Lutgens and Tasa, 11th Edition. Pearson Education, 876 p. <https://www.mining-technology.com/projects/bingham/>

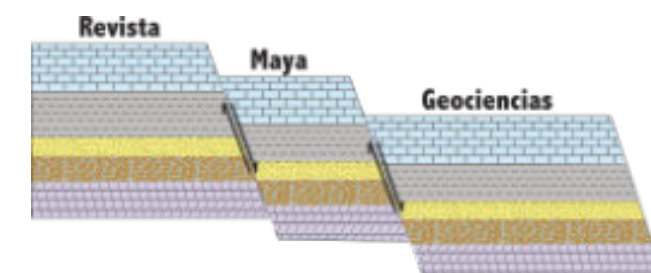
[www.nasa.gov](http://www.nasa.gov)

Ibrahim, E. 2004. Cadmiun, Copper and Lead in some kinds of Chesses, Benha Vet.Med.J., Vol.15, p. 55-64.

Prabhat Kumar Raia, Sang Soo Leeb, Ming Zhangc, Yiu Fai Tsangd, Ki-Hyun Kime, 2019. Heavy metals in food crops: Health risks, fate, mechanisms, and management. Environmental International, Elsevier, Vol. 125, p. 365-385 Physical Geology, 1987, B. J. Skinner and S. C. Porter, John Wiley & Sons, New York, 750 p.

R. Finkelman, W. Oren, G. Plumlee and O. Selinus. 2018. Applications of Geochemistry to Medical Geology. Environmental Geochemistry Ch. 17, Elsevier, p. 435 -465.

Orescain, V., Katunar, A., Kutle, A. and Valkovic, V., 2008. Heavy Metlas in Soil, Grape and Wine, J. of Trace and Miroprobe Techniques, V, 21, Issue 2, p. 171 – 180.





**Dr. Alejandro Carrillo-Chávez.** Ingeniero Geólogo del Instituto Politécnico Nacional, Maestría en La Universidad de Cincinnati, y Doctorado en la Universidad de Wyoming. Inició su trabajo en el Instituto Mexicano del Petróleo y después inició vida académica en la Universidad Autónoma de Baja California Sur. En 1998 ingresó al a Unidad Investigación en Ciencias de la Tierra (UNICIT) UNAM, Campus Juriquilla (actual Centro de Geociencias). Su trabajo inicial fue sobre petrografía ígnea y metamórfica. En academia inicio dando clases de petrología ígnea y metamórfica.

Actualmente es Tutor del Posgrado en Ciencias de la Tierra UNAM. Su maestría fue sobre yacimientos minerales metálicos y su doctorado sobre geoquímica ambiental. Actualmente sus líneas de investigación son: Metales Pesados en Medio Ambiente, Hidrogeoquímica, Geoquímica Isotópica de Metales Pesados e Hidrogeoquímica de Salmueras Petroleras. A la fecha es responsable de un Proyecto UNAM y CONAHCYT sobre Concentraciones de metales e isotopía estable de Zn y Hg en agua de lluvia, nieve y núcleos de hielo en glaciares mexicanos. [ambiente@geociencias.unam.mx](mailto:ambiente@geociencias.unam.mx)



**M. en C. María Carolina Muñoz Torres**

Técnico Académico Titular B, Centro de Geociencias UNAM, Campus Juriquilla

Carolina tiene una Maestría en Ciencias Ambientales y una Especialidad en Técnicas Instrumentales. Es Responsable Analítica del Laboratorio de Geoquímica Ambiental del Centro de Geociencias, Campus UNAM Juriquilla. Se especializa en análisis de agua por las técnicas de ICP-OES y HPLC. Participa en proyectos de investigación, en los cuales apoya en diversas actividades. Carolina está involucrada de forma activa en numerosas actividades de difusión y divulgación de la ciencia, tanto como participante como organizadora. Ella es parte de un grupo de académicos del CGEO que llevan a cabo el Taller de Ciencia para Jóvenes desde el 2009 a la fecha, y el Taller de Ciencia para Profesores. A ello hay que añadir la organización y participación en la primera versión de la Semana de la Tierra, ferias y exposiciones de ciencia. Del mismo modo ha acudido a la sierra a compartir con niños y profesores de lugares de difícil acceso su pasión por la ciencia. pasión que se ve reflejada en múltiples talleres de ciencia, seminarios y charlas de divulgación. Colabora activamente en Proyectos sobre metales pesados con el Dr. Alejandro carrillo en el Centro de Geociencias UNAM, Campus Juriquilla. [caromt@geociencias.unam.mx](mailto:caromt@geociencias.unam.mx)

## BIOGEOPATRIMONIO DEL PEDREGAL REMANENTE 176 DEL CAMPUS DE CIUDAD UNIVERSITARIA DE LA UNAM

**Itzel Analí Sánchez-Aguilar<sup>1</sup>, María del Pilar Ortega-Larrocea<sup>2</sup>, Marie-Noëlle Guilbaud<sup>3</sup>.**

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

<sup>2</sup> Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

<sup>3</sup> Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

### INTRODUCCIÓN

El vulcanismo monogenético en México predomina en la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM), la cual se caracteriza por ser una provincia volcánica activa y de mayor complejidad en el país. Se estima que la FVTM comprende más de 8,000 edificios volcánicos (Lorenzo, 2016) de los cuales, más de tres mil son volcanes de este tipo (Guilbaud, 2016).

Uno de los volcanes monogenéticos en México con mayor relevancia para el estudio de la actividad volcánica, así como con aportaciones valiosas a la geodiversidad y patrimonio (natural, cultural y geológico) es el volcán Xitle (1700 a.p) ubicado al Sur de la Cuenca de México (Fig. 1), el cual forma parte del Campo Volcánico Sierra Chichinautzin (CVSC) (Siebe, 2009). El edificio volcánico está conformado por un pequeño cono de escoria o tezontle (140 m de altura, 500 m de ancho) (Delgado et al., 1999; Siebe, 2009).

El derrame lávico cubrió un área aproximada de 80 km<sup>2</sup> en dirección noroeste del volcán, dejando una superficie heterogénea de lavas basálticas que cambiaron por completo el ecosistema y las condiciones ambientales en las que se encontraba dicha zona (Cano y Meave, 1996) y permitiendo el surgimiento de un nuevo ecosistema único designado como matorral xerófilo de *Pittocaulon praecox* (Rzedowski, 1954) o también conocido como Pedregal de San Ángel.

Dentro del Campus de Ciudad Universitaria (CU) de la Universidad Nacional Autónoma de México, se encuentra una parte del ecosistema del Pedregal resguardado en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA). Es importante mencionar que este espacio corresponde a un ecosistema fragmentado que ocupa 237 ha y representa el 33% del campus de CU (Lot et al., 2009). Actualmente se encuentra fuertemente presionado debido al crecimiento urbano y, por ende, a diversas actividades antropogénicas.

Lo anterior ha dado como resultado espacios de pedregales remanentes (PR) actualmente designados como pedregales remanentes de manejo especial, ubicados fuera de las zonas núcleo y de amortiguamiento de la REPSA, que se encuentran expuestos a diversas amenazas pero que albergan características bio-geológicas con un gran valor; por ello, vinculado al proyecto Geopedregal surge la propuesta de crear una Red de Geosenderos Universitaria (ReGeU) con el fin de contribuir a la divulgación y su conservación.

Por ello el presente estudio tiene como objetivo caracterizar la bio-geodiversidad del pedregal No.176 (*Tlali* "tierra en náhuatl) del campus de Ciudad Universitaria de la UNAM, así como analizar sus atributos para su integración a la ReGeU.

### MATERIALES Y MÉTODOS