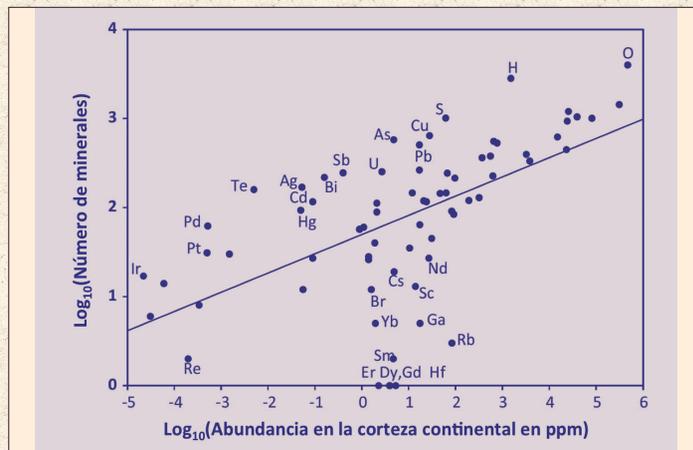


LA GEOLOGÍA ES NOTICIA

La diversidad mineral de la Tierra es única en el Universo

Juan Jiménez Millán _____ (pag. 344)



ÚLTIMAS INVESTIGACIONES: Yacimiento de la Sima de los Huesos de la Sierra de Atapuerca

Ignacio Martínez Mendizábal, Ana Pantoja Pérez y Nohemi Sala Burgos _____ (pag. 347)

EN FEBRERO Y MARZO DE 2015

Las inundaciones del Ebro



Alfredo Ollero Ojeda y Miguel Sánchez Fabre _____ (pag. 350)

La diversidad mineral de la Tierra es única en el Universo

JUAN JIMÉNEZ MILLÁN

*Departamento de Geología y CEACTierra.
Universidad de Jaén.*

La presencia de vida en nuestro planeta ha sido, hasta el momento, la característica más invocada para considerar a la Tierra como un planeta único en el Universo. Actualmente, es ampliamente aceptado que en el origen y evolución de la vida juegan un papel importante la combinación de procesos casuales y procesos ineludibles determinados por las leyes físicas y químicas. Algunos estudios recientes sugieren que la diversidad mineral y la distribución de los minerales en la Tierra se rigen por el equilibrio del mismo tipo de procesos que generaron la vida tal y como la conocemos, constituyendo un factor esencial que contribuye a considerar a nuestro planeta como único. **¿Cuántos minerales existen?**

La última lista aprobada en septiembre de 2015 por la Comisión de Nuevos Minerales, Nomenclatura y Clasificación de la Asociación Internacional de Mineralogía contiene 5070 especies minerales válidas. Este listado es actualizado periódicamente y crece a un promedio de más de 100 minerales al año. La mejora de las técnicas instrumentales ha contribuido al crecimiento del ritmo de identificación de nuevos minerales. Por ello, es lógico plantearse la pregunta ¿Cuántos minerales podrían llegar a identificarse realmente en nuestro planeta?

De forma simplificada, puede establecerse cierto paralelismo entre el patrón que caracteriza a las palabras que aparecen en los libros de un determinado autor y el modelo que sigue la composición y distribución mineralógica de la Tierra y del Universo en

su conjunto. En los libros, las combinaciones de letras forman las palabras que son organizadas con la idiosincrasia característica del autor para dar lugar a los textos que componen un libro concreto. El Universo en su conjunto y la Tierra particular pueden considerarse como grandes sistemas químicos en continua evolución, donde los elementos químicos se combinan entre sí para formar minerales. En la analogía entre la mineralogía del cosmos y las palabras de los libros, los elementos químicos juegan el papel de las letras, mientras que los minerales, como agrupaciones de elementos químicos, equivaldrían a las palabras. El conjunto de palabras de un libro sería el equivalente de la mineralogía conocida de un planeta, como la Tierra, mientras que el vocabulario potencial de todos los libros equivaldría al conjunto de minerales posibles en el Universo.

La información disponible en la base de datos de la Asociación Internacional de Mineralogía y en webs como mindata.org revelan que los elementos formadores de minerales más comunes (Si, Al, Ca y Fe) están representados por más de 1000 especies conocidas cada uno. Por ello, algunos estudios recientes, liderados por el Prof. Robert Hazen de la Carnegie Institution of Washington, sugieren que 1000 minerales es el potencial mínimo de la diversidad mineral de cada uno de los 72 elementos esenciales formadores de minerales que pueden deducirse del listado aprobado de minerales. Es decir, empleando cualquiera de los 72 elementos esenciales se podrían sintetizar al menos 1000 compuestos inorgánicos cristalinos bajo las condiciones de presión y temperatura de la corteza terrestre y en presencia de combinaciones variables de otros elementos químicos esenciales.

Los 5070 minerales aprobados por la Asociación Internacional de Mineralogía (en septiembre de 2015) incorporan un promedio de 4.7 elementos químicos por especie. Por ello, teniendo en cuenta que cada uno de los 72 elementos esenciales está representado en 1000 minerales, la diversidad mineralógica potencial máxima podría calcularse del siguiente modo:

$$D_{\max} \approx (72 \text{ elementos} \times 1000 \text{ especies por elemento}) / 4.7 \approx 15.300 \text{ minerales}$$

Esta cifra representaría el máximo número de especies minerales posibles que podrían existir colectivamente en el Universo. Volviendo a la analogía sobre los estudios léxicos, este cálculo constituiría el vocabulario completo de los libros de un determinado autor. Sin embargo, cualquier autor no emplea su vocabulario completo en cada uno de sus libros. Por analogía, el número de especies minerales posibles en cualquier planeta debe ser necesariamente inferior a la diversidad mineral potencial máxima.

¿Cuáles son los factores que influyen en la diversidad mineral a escala planetaria?

Los sistemas complejos evolucionan y sufren modificaciones por la combinación de dos tipos de procesos: deterministas y estocásticos. Todos los sistemas cambiantes deben comportarse según las leyes naturales (procesos deterministas), pero la existencia de acontecimientos casuales juega también un papel importante, produciendo un cierto grado de impredecibilidad que se recogen como “accidentes congelados” (procesos estocásticos).

La mineralogía de los planetas terrestres es consecuencia de la combinación de procesos deterministas y estocásticos. Algunos de los factores

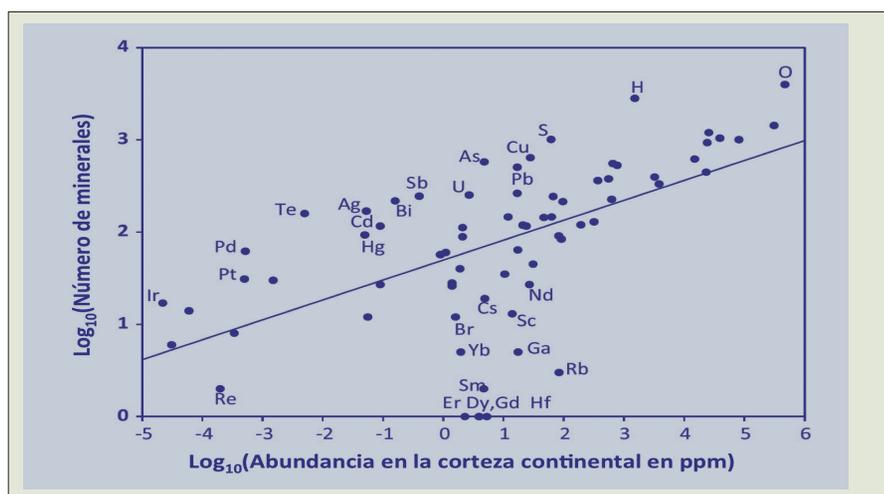


Fig. 1. Número de minerales identificados en la corteza terrestre que incorporan los 72 elementos químicos esenciales frente a la abundancia de los elementos (Modificada de Hazen et al., 2015a).

deterministas más influyentes son la abundancia de los elementos químicos en el sistema, su comportamiento cristaloquímico y las relaciones de estabilidad de fases.

La abundancia de los elementos químicos

En la Fig. 1 puede observarse el número de especies minerales en la Tierra respecto a la abundancia cortical de los 72 elementos esenciales que forman parte de la composición de los minerales. Se revela una tendencia general en la que los elementos más abundantes tienden a tener un mayor número de especies minerales. Así, el elemento más abundante en la corteza, el O, está presente en más del 80% de los minerales corticales (3984). El Si con 1430 especies, Ca (1197), Fe (1043), y Al (1006) son

cationes corticales abundantes con los mayores números de especies minerales. En conclusión, los minerales de los elementos más abundantes, O, Si, Mg, Ca, Al, y Fe, dominan todos los ambientes geológicos de la corteza de la Tierra. Es de suponer que esta tendencia se repita en otros planetas y lunas de tipo terrestre.

El comportamiento cristaloquímico

Un buen número de elementos se apartan de la tendencia general indicada por las rectas de la figura. Por un lado, existen elementos relativamente raros que se presentan predominantemente sólo en un estado de oxidación, en un entorno químico muy concreto (Ej. siempre enlazados con oxígeno), y que forman fácilmente soluciones sólidas con otros elementos más comunes. Estos elementos producen un

menor número de especies de las que cabría esperar (Ej., Ga^{3+} , Rb^{+} ...). Por el contrario, es posible encontrar algunos elementos que tienden a formar más especies minerales de lo que se esperaría de acuerdo con su abundancia (ej. Ag, As, Bi, Cu, H, Hg, O, Pb, Pd, S, Sb, Te, y U).

La explicación de estos comportamientos puede encontrarse en las características cristaloquímicas de dichos elementos. Algunas de las más significativas son las siguientes: 1) el elemento tiene una cristaloquímica única, es decir, su combinación de radio iónico, estado de oxidación y número de coordinación no se encuentra duplicada por ningún otro elemento químico en la Tierra, por lo que no puede ser fácilmente incorporado como elemento minoritario en otros minerales; 2) el elemento aparece en varios estados de oxidación y por ello puede jugar papeles cristaloquímicos múltiples; 3) el elemento, aunque sea relativamente raro, tiene mecanismos de concentración eficientes, lo que produce abundancias locales especialmente elevadas. Este sería el caso de los enriquecimientos hidrotermales que producen las menas de Cu, Hg, Pb, y U; 4) el elemento aparece en ambientes geoquímicos asociado a otros elementos raros, incrementándose las posibilidades de que se combine para formar minerales poco frecuentes de composiciones bien diferenciadas.

Las relaciones de estabilidad de fases

A priori, se podría pensar que la existencia de una fase mineral estable en un intervalo amplio de condiciones

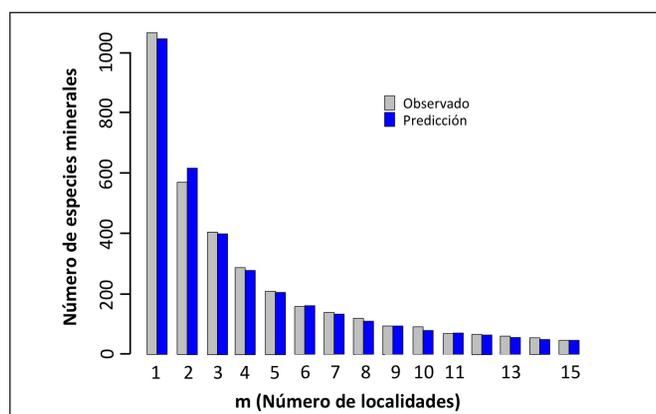


Fig. 2. Frecuencias de distribución mineral observadas (en gris) y previsible según el modelo de eventos raros (en azul). La escala horizontal indica el número de localidades "m" en el que aparece un mineral. La escala vertical representa el número de especies minerales que aparecen en un número de localidades (Modificada de Hazen et al., 2015a).

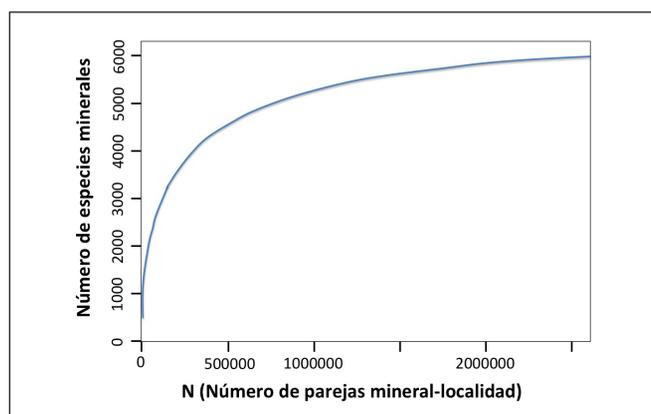


Fig. 3. Modelo de predicción del número de especies minerales basado en la aplicación de la teoría de eventos raros (Modificada de Hystad et al., 2015b).

de presión, temperatura y composición del sistema podría reducir drásticamente la diversidad mineral de los elementos que incorpora. Sin embargo, el análisis de la diversidad mineral de algunos elementos químicos revela que esta afirmación no es correcta. Este sería el caso, por ejemplo, del Zr. A pesar de la amplia estabilidad en diferentes condiciones ambientales de la fase predominante que incorpora Zr, el zircón, el listado de minerales de la Asociación Internacional de Mineralogía incorpora 121 especies diferentes de Zr. Esta diversidad es coherente con su abundancia cortical de 190 ppm. En cualquier caso, las condiciones ambientales son factores esenciales que condicionan la cristalización local de algunos minerales. Así, la formación de arcillas sería imposible en la Luna o en Mercurio por ser demasiado secos, o en Venus por ser demasiado caliente.

Superposición de los aspectos deterministas y de los procesos estocásticos. ¿Es posible que la diversidad mineral de la Tierra se repita?

La comparación con la distribución de palabras en un texto es útil para comprender el cálculo de la diversidad mineral potencial de un sistema mediante el empleo de algoritmos matemáticos basados en la frecuencia de distribución de acontecimientos o características. En el patrón de un manuscrito típico, es fácil identificar la existencia de unas pocas palabras que son usadas muchas veces (por ejemplo, “un”, “y”, “el”). Frente a estas palabras repetitivamente empleadas, la mayoría de las palabras del texto son sólo usadas una o dos veces. Cada autor tiende a producir textos con una distribución de frases y palabras característica, que podría permitir su reconocimiento. La frecuencia de distribución de los minerales sigue un patrón característico análogo a las palabras en un documento y se ajusta a la aplicación de las teorías de sucesos de baja probabilidad de ocurrencia, especialmente, a los modelos de distribución que contienen un gran número de eventos raros. Los datos disponibles revelan que unos pocos cientos minerales formadores de rocas (tales como el cuarzo, los feldspatos, la calcita, la pirita, etc.) son dominantes en términos de volumen y aparecen en decenas de miles de localidades del planeta. Sin embargo, más de un tercio de la diver-

sidad mineral de la Tierra es debida a la existencia de especies minerales que sólo aparecen en una o dos localidades (Fig. 2). Esta circunstancia indica claramente que los eventos raros no juegan un papel trivial en la mineralogía de la corteza terrestre.

La aplicación de las teorías de eventos raros, teniendo en cuenta el número de especies minerales y su frecuencia de aparición, permite predecir que en la corteza de la Tierra deben existir actualmente 6394 minerales (Fig. 3). En la analogía con los estudios léxicos, representaría el vocabulario que un determinado autor podría emplear en la redacción de uno de sus libros. Esta cifra es sensiblemente inferior a la diversidad mineral potencial máxima (alrededor de 15300 minerales, el vocabulario completo de los libros de un autor) pero superior al número de especies actualmente identificadas (5070). Este modelo también revela que si volviéramos a reiniciar la historia de la Tierra, los minerales que aparecen actualmente al menos en 4 o más localidades volverían a ser descubiertos con total seguridad (2799). Sin embargo, la aparición de los minerales más raros, registrados en una o dos localidades, sería más incierta. Esta repetición del proceso produciría 4164 minerales de las especies actuales y 662 especies diferentes a las registradas hoy en día. Este modelo de predicción sugiere que una fracción significativa de diversidad mineral de la Tierra es consecuencia de “accidentes congelados” que tenían baja probabilidad de haber ocurrido. Así mismo, estos datos implican que la realización de una réplica de la mineralogía documentada de la Tierra requeriría un número extremadamente alto de eventos

de bajas probabilidades (más de 1000) y que, por tanto, la probabilidad de encontrar un duplicado de la Tierra podría estimarse inferior a 10^{-322} .

La mineralogía de la corteza de la Tierra ha sufrido cambios sucesivos durante los 4500 millones de años de la historia del planeta. La mayoría de las características de la mineralogía de los planetas, incluyendo la prevalencia de los minerales formadores de rocas más abundantes, son aspectos deterministas de la evolución mineral. De forma general, la diversidad y distribución de los minerales que se observa actualmente en la Tierra debe ser bastante similar a la que presentan los planetas terrestres de otras galaxias y muy parecida que la hubo en la propia Tierra en el pasado. Concretamente, el hecho de que O, C, Mg, Si, S, y Fe sean los elementos más abundantes del sistema solar condiciona que un grupo relativamente pequeño de silicatos y óxidos sean los minerales mayoritarios que dominan la corteza y el manto de cualquier planeta rocoso en nuestro sistema solar, nuestra galaxia o incluso más allá. Sin embargo, la casualidad puede jugar un papel determinante en ocasiones, condicionando el desarrollo de las diferencias mineralógicas que caracterizan a los distintos cuerpos del Universo. Teniendo en cuenta que se estima que deben de existir en el Universo más de mil cuerpos con características de tipo terrestre, las diferencias significativas de composición mineral que ocurrirían volviendo a repetir la historia de un mismo planeta y la amplificación que producirían la existencia de diferencias iniciales de parámetros físicos y químicos, puede concluirse que la mineralogía de la Tierra es única en el Cosmos. ●

Para ampliar información pueden consultarse los siguientes artículos y webs

Hazen, R.M., Grew, E.S., Downs, R.T., Golden, J., and Hystad, G. (2015a) *Mineral ecology: Chance and necessity in the mineral diversity of terrestrial planets. Canadian Mineralogist*, in press.

Hazen, R.M., Hystad, G., Downs, R.T., Golden, J., Pires, A., and Grew, E.S. (2015b) *Earth's "missing" minerals. American Mineralogist* 100, 2344-2347.

Hystad, G., Downs, R.T., and Hazen, R.M. (2015a) *Mineral frequency distribution data conform to a LNRE model: Prediction of Earth's "missing" minerals. Mathematical Geosciences*, in press.

Hystad, G., Downs, R.T., Grew, E.S., and Hazen, R.M. (2015b) *Statistical analysis of mineral diversity and distribution: Earth's mineralogy is unique. Earth & Planetary Science Letters*, 426, 154-157.

<https://hazen.carnegiescience.edu/research/mineral-ecology>

<http://www.ima-mineralogy.org/Minlist.htm>

<http://www.mindat.org/>