

Mineralogía del enriquecimiento de REY, Sc y Ga en bauxitas kársticas: ¿qué sabemos y qué nos falta por conocer?

Joaquín A. Proenza (1*)

(1) Grupo MinResET, Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada. Universitat de Barcelona, 08028, Barcelona (España)

* corresponding author: japroenza@ub.edu

Palabras Clave: Bauxitas kársticas, Tierras Raras, Galio, Escandio. **Key Words:** Karst bauxites, Rare earth elements, Gallium, Scandium.

INTRODUCCIÓN

Entre las materias primas más críticas se encuentran los elementos del grupo de las tierras raras (incluido el itrio; *rare-earth elements and yttrium*, REY), el galio y el escandio. Estos metales se utilizan en aplicaciones estratégicas, que abarcan desde tecnologías energéticas de bajas emisiones de carbono, electrónica, inteligencia artificial, robótica y computación cuántica, hasta sistemas aeroespaciales y de defensa. La importancia económica y el carácter estratégico de estos metales, unidos a la elevada concentración de sus cadenas de suministro, han incrementado de forma notable su relevancia en los debates actuales sobre seguridad energética y económica (International Energy Agency, 2026). En este contexto, la diversificación de las fuentes primarias de estos metales críticos se convierte en una cuestión clave de autonomía estratégica y seguridad nacional. Esta contribución presenta una revisión del estado actual del conocimiento sobre la geoquímica y mineralogía de los REY, Ga y Sc en los depósitos de bauxitas kársticas, utilizando como ejemplos depósitos de la Sierra de Bahoruco (suroeste de la República Dominicana) y de la Península Ibérica.

REY EN BAUXITAS KÁRSTICAS

Los denominados “depósitos no convencionales” de REY han suscitado un creciente interés tanto científico como económico. Entre ellos, destacan los depósitos de bauxitas kársticas, que actualmente se consideran un objetivo de exploración especialmente atractivo (Domínguez-Carretero et al., 2026 y referencias incluidas). Las principales fases portadoras de REY incluyen oxihidróxidos de Al (gibbsita, böhmite, nordstrandita, diásporo) y minerales del grupo de las arcillas (principalmente caolinita), anatasa y oxihidróxidos de Fe; además de minerales específicos de REY, como fosfatos (monacita, xenotima, rabdofana, churchita, florencita, crandallita, goyazita), carbonatos (bastnäsita, parisita, sinchisita, tenerita) y óxidos (cerianita) (p.ej., Villanova de Benavent et al., 2023; Domínguez-Carretero et al., 2026 y referencias incluidas). Los depósitos de bauxitas kársticas de la Sierra de Bahoruco presentan un enriquecimiento excepcional en REY, con medianas superiores a 1400 ppm y valores máximos cercanos al 3 % en peso (Villanova-de-Benavent et al., 2023; Domínguez-Carretero et al., 2026). Los REY se concentran principalmente en los oxihidróxidos de Al, donde se infiere que están adsorbidos; y en fases propias de REY, como fosfatos relictos y autigénicos (principalmente monacita y xenotima) y carbonatos autigénicos de la serie polisomática bastnäsita-sinchisita. Este grado de enriquecimiento es poco común en bauxitas kársticas mediterráneas, como las de la Península Ibérica, donde los contenidos totales de REY en los depósitos estudiados suelen ser inferiores (mediana < 400 ppm).

Ga EN BAUXITAS KÁRSTICAS

Las bauxitas kársticas presentan contenidos de Ga que oscilan entre <10 y 180 ppm, con un valor medio de 58 ppm. Los datos disponibles indican que el hidróxido de Ga constituye la especie predominante en soluciones meteóricas durante los procesos de bauxitización y que, en un intervalo de pH comprendido entre 3 y 7, exhibe una solubilidad superior a la del hidróxido de Al. En consecuencia, bajo condiciones ácidas, el Ga presenta una movilidad significativamente mayor que el Al. Las principales fases portadoras de Ga son los oxihidróxidos de Al, en los que

el Ga puede incorporarse mediante sustitución isomórfica del Al^{3+} , favorecida por la similitud de sus radios iónicos, y/o adsorción. En perfiles de bauxitización evolucionados, donde la solubilidad del Ga es reducida, este elemento puede incorporarse en rutilo y hematites. A diferencia de lo observado para los contenidos de REY, los depósitos de bauxitas kársticas de la Península Ibérica, así como los de otras regiones mediterráneas, presentan un mayor enriquecimiento en Ga (mediana de 54 ppm, y con valores máximos de hasta 200 ppm) en comparación con los estudiados en la Sierra de Bahoruco (mediana de 38 ppm).

Sc EN BAUXITAS KÁRSTICAS

Los depósitos de bauxitas kársticas también pueden presentar enriquecimientos significativos en Sc, en algunos las concentraciones son superiores a 100 ppm. Durante el proceso Bayer, el Sc (de manera análoga a los REY) tiende a acumularse en los lodos rojos producidos (Vind et al., 2018). Según estos autores, el Sc se localiza principalmente en hematites, goethita y zircón.

En el caso de las bauxitas de la Sierra de Bahoruco, los contenidos de Sc alcanzan valores de hasta 150 ppm (con una mediana de 66 ppm), comparables a las de los depósitos lateríticos de Ni-Co de los que actualmente se extrae Sc. Las principales menas de Sc en los depósitos de la Sierra de Bahoruco son los oxihidróxidos de Al (hasta 190 ppm) y los oxihidróxidos de Mn (hasta 170 ppm). Aunque actualmente no se extrae Sc de menas bauxíticas, algunos trabajos recientes indican que su recuperación puede ser viable económicamente como subproducto de la minería de Al (p.ej., Domínguez-Carretero et al., 2026). Este grado de enriquecimiento no ha sido documentado en los depósitos de la Península Ibérica (mediana < 40 ppm).

CONSIDERACIONES FINALES

Actualmente, se reconoce que las bauxitas kársticas pueden constituir una fuente relevante de REY, Ga y Sc, con potencial para su recuperación como subproductos de la explotación del Al. En yacimientos excepcionalmente enriquecidos, como los de la Sierra de Bahoruco, estos elementos podrían incluso llegar a representar el objetivo principal de la actividad minera. La variabilidad en los contenidos de REY entre los distintos cinturones de bauxitas kársticas está controlada por la composición del protolito, los procesos de transporte y las condiciones fisicoquímicas durante el proceso de bauxitización. Los minerales de mena de REY incluyen oxihidróxidos de Al (mena principal), caolinita y anatasa; así como fosfatos y carbonatos de REY, tanto primarios (relictos) como secundarios (autigénicos). En el caso del Ga, las fases portadoras dominantes comprenden oxihidróxidos de Al y hematites, y tentativamente rutilo, mientras que el Sc se encuentra predominantemente asociado a hematites, goethita, zircón y oxihidróxidos de Al y Mn.

No obstante, persisten lagunas de conocimiento relevantes, entre las que destacan: i) la distribución y estabilidad de los fosfatos y carbonatos de REY; ii) el aparente predominio de la monacita relictica sobre la autigénica; iii) la especiación de REY, Ga y Sc en los minerales portadores; iv) las condiciones de pH/Eh bajo las cuales se han formado estas mineralizaciones de metales críticos; y v) la capacidad de adsorción de los oxihidróxidos de Al respecto a los REY, así como los mecanismos de retención implicados en este proceso.

REFERENCIAS

- Domínguez-Carretero, D., Aiglsperger, T., Villanova-de-Benavent, C., Torró, L., Pujol-Solà, N., Llovet, X., Bover-Arnal, T., Tisora, À., Domènech, C., Ramírez, A., Rodríguez, J., Dold, B., Proenza, J.A. (2026): The hyper-enriched rare earth elements karst bauxites of the Sierra de Bahoruco, SW Dominican Republic. *Econ. Geol.*, in press. DOI: 10.5382/econgeo.5214.
- International Energy Agency (2026): Rare Earth Elements, Pathways to secure and diversified supply chains. Paris, 104 p.
- Villanova-de-Benavent, C., Proenza, J.A., Torró, L., Aiglsperger, T., Domènech, C., Domínguez-Carretero, D., Llovet, X., Suñer, P., Ramírez, A., Rodríguez, J. (2023): REE ultra-rich karst bauxite deposits in the Pedernales Peninsula, Dominican Republic: Mineralogy of REE phosphates and carbonates. *Ore Geol. Rev.*, **157**, 105422.
- Vind, J., Malfliet, A., Blanpain, B., Tsakiridis, P.E., Tkaczyk, A.H., Vassiliadou, V., Panias, D. (2018): Rare earth element phases in bauxite residue. *Minerals*, **8**, 77.