



EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DEL GRANITO BORRACHUDOS COMO DEPÓSITO DE TIERRAS RARAS HOSPEDADAS EN REGOLITO, BRASIL

2024

Nadia Gabriela Jara Riquelme

Profesor Guía: Dr. Mauricio Espinoza Vargas
Profesores Comisión: Dra. Fernanda Álvarez Amado
Dr. Joaquín Cortés Aranda

Resumen.

Las tierras raras (REE) son un grupo de 17 elementos fundamentales para la fabricación de tecnologías limpias. En la actual era de transición energética, la demanda global está creciendo rápidamente, haciendo indispensable aumentar la producción mundial, dominado por China. Uno de los tipos de yacimiento son los depósitos de tierras raras hospedados en regolito (RH-REE), formados por la meteorización química de rocas graníticas en climas templados a tropicales, que promueven la formación de regolito, donde los minerales arcillosos adsorben REE y son preservados en zonas de bajas pendientes. La Suite Granítica Borrachudos muestra potencial como RH-REE debido a sus altas concentraciones de REE en la roca y evidencias de desarrollo de regolito. Esta unidad intruye en el basamento metasedimentario, que en el área de estudio se presenta como un roof pendant. Mediante campañas de mapeo superficial y perforación se identificaron los horizontes de regolito pedolito inferior y saprolito, enriquecidos en esta litología, con una distribución relativamente continua y espesores de hasta 12 metros. Comparaciones con otros proyectos sugieren su competitividad en el mercado. No obstante, es crucial determinar el espesor real y la continuidad de los horizontes mineralizados por debajo del basamento

Palabras Claves: *Tierras raras, Regolito, Suite Borrachudos*

1 Introducción

Las tierras raras (REE) son un grupo de 17 elementos compuesto por la serie de los lantánidos, además del itrio (Y) y del escandio (Sc) (Damhus *et al.*, 2005). Se dividen en dos subgrupos, según su número atómico: tierras raras livianas (LREE) de lantano (La) a europio (Eu); y tierras raras pesadas (HREE) de gadolinio (Gd) a lutecio (Lu) más Y (Li *et al.*, 2017).

Debido a sus propiedades físicas y químicas particulares, son materias primas críticas utilizadas en catalizadores, aleaciones, imanes permanentes, y son usados en la fabricación de tecnologías limpias como autos eléctricos y turbinas eólicas, especialmente el disprosio (Dy) y el neodimio (Nd), entre otros usos (Haque *et al.*, 2014).

Desde la década de los 90', el mercado de las REE ha sido dominado por China, con más del 90% de la producción mundial, cuyas exportaciones fueron restringidas entre los años 2010 y 2014. Esto condujo a la necesidad de fortalecer las exploraciones para descubrir nuevos depósitos de REE fuera de China, quienes además poseen el 40% de las reservas mundiales de REE (Van Gosen *et al.* 2017).

La abundancia de REE en la corteza terrestre no es tan escasa como su nombre sugiere. Algunas de ellas son más abundantes que metales "conocidos" como el cobre, plomo y molibdeno (Castor y Hedrick, 2006; Taylor y McClennan, 1985). Están presentes en

diferentes tipos de depósitos, que pueden ser divididos en primarios asociados a procesos ígneos e hidrotermales, y secundarios, asociados a procesos exógenos de sedimentación y erosión (Jaireth *et al.*, 2014). En este segundo grupo se encuentran los depósitos de REE hospedadas en regolito (RH-REE: *Regolith-hosted rare earth element deposits*), formados en climas templados a tropicales, que promueven el enriquecimiento de REE en arcillas por adsorción iónica (Sanematsu y Watanabe, 2016), producto de la meteorización de rocas ígneas graníticas (Borst *et al.*, 2020). Este tipo de depósito es la mayor fuente actual de HREE en el mercado, con costos relativamente bajos de extracción, mediante procesos de lixiviación con soluciones diluidas de sulfato de amonio (Li *et al.*, 2017). Además, este proceso de extracción genera bajos índices de radiactividad, menores a depósitos primarios, como carbonatitas o rocas ígneas alcalinas (Sanematsu y Watanabe, 2016).

En términos generales, la génesis de los RH-REE incluye el emplazamiento y exhumación de suites ígneas, principalmente graníticas, que contengan mineralogía primaria rica en REE. Además de procesos prolongados de meteorización que promueven el desarrollo de regolito, en donde las REE pueden ser adsorbidas en minerales arcillosos como caolinita, illita y halloysita, formados durante la meteorización de aluminosilicatos (Foley y Ayuso, 2015). Y, por último, la preservación de los horizontes enriquecidos, en zonas de bajas pendientes, controlado por las tasas de erosión y comportamientos de las aguas subterráneas (Bustos *et al.*, 2022).

Respecto al regolito, Scott y Pain (2009) lo definen como “todo lo que hay entre la roca fresca y el aire”. Proponen una clasificación vertical en tres unidades principales, de acuerdo a características texturales y mineralógicas: pedolito (P), caracterizado por la actividad biológica; saprolito (S), aquella capa friable con remanentes de la textura original y saprock (SR), con mayor presencia de fragmentos rocosos. Características más específicas permiten distinguir subunidades tanto en P como en S, como el Índice de alteración (CIA), que ha sido usado para cuantificar el grado de meteorización de la roca. Químicamente, las REE tienden a concentrarse en la zona de transición entre pedolito y saprolito, asociado a la

presencia de arcillas afines (Figura 1), por lo que el interés económico de un potencial depósito va a depender del espesor y extensión de este segmento enriquecido.

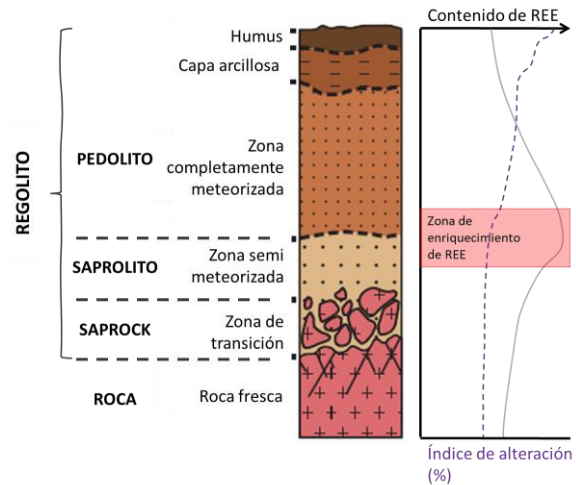


Figura 1. Perfil de regolito esquemático, modificado de Li *et al.* (2019).

Con esto en consideración, recientes trabajos han señalado como prospectivos los granitos altamente fraccionados tipo I y los granitos anorogénicos tipo A (Foley y Ayuso, 2015). De este último grupo, en la región sudeste de Brasil, se emplaza la Suite Borrachudos, que presenta altos contenidos de REE en roca (Gomes *et al.*, 2020). Mediante el mapeo y reconocimiento regional realizados en noviembre de 2022 en esta suite, se evidenció el desarrollo continuo de regolito del granito en una zona climática favorable, lo que impulsó el interés para evaluar su potencial como posible depósito económico de RH-REE.

1.1 Objetivo general

Evaluar el potencial geológico de la Suite Granítica Borrachudos como depósito de tierras raras hospedadas en regolito.

1.2 Objetivos Específicos

- Establecer unidades geológicas presentes en el área de estudio.
- Analizar la distribución de tierras raras para cada unidad geológica.
- Determinar la unidad geológica de interés prospectivo y su extensión en el área de estudio.

1.3 Ubicación

El área de estudio se ubica aproximadamente 5 km al suroeste de la ciudad de Sabinópolis, 300 km al noreste de Belo Horizonte, en el estado de Minas Gerais, Brasil (Figura 1).

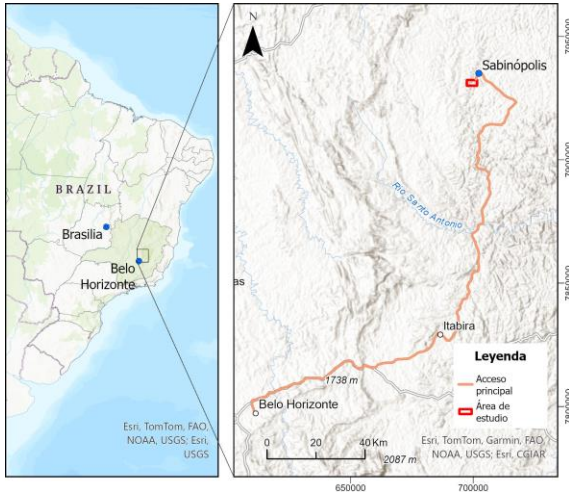


Figura 2. Mapa de ubicación del área de estudio.

1.4 Agradecimientos

Quisiera agradecer a Aclara Chile-Brasil por las facilidades brindadas para llevar a cabo este trabajo, y por permitir mi crecimiento y aprendizaje en la exploración de RH-REE durante todos estos años. También a los académicos y funcionarios del Departamento Ciencias de la Tierra, quienes me formaron en esta gratificante profesión, con especial reconocimiento a Mauri Espinoza por su guía e incesante paciencia. A Seba por su compañía, contención y amor cada día. A mis amigos queridos que la geología y las tierras raras han traído a mi vida, por las aventuras, locuras y risas; en especial a mis REElíquias, por sus constantes granitos de arena. Y, por supuesto, a mi familia, por su apoyo y amor incondicional en este camino.

2 Marco Geológico

Los granitos de la Suite Borrachudos comprenden cuerpos graníticos tipo A, metaluminosos a peraluminosos. Son granitos relativamente homogéneos, de grano medio a grueso, foliados, principalmente compuestos por microclina, cuarzo, albita y biotita, con minerales accesorios como magnetita, alanita y fluorita (Dussin *et al.*, 2000). Se han datado en diferentes localidades obteniéndose edades entre los 1.67 y 1.77 Ga (Gomes *et al.* 2020).

En el área de estudio la suite está representada por granito São Félix, del que se obtuvieron edades Pb-Pb en circones de 1729 Ga (Dossin *et al.*, 1993). Con relación a las concentraciones de REE, en la localidad de Açucena, se obtuvieron muestras que varían entre 346 y 1969 ppm, con relaciones LREE/HREE entre 2.8 y 7.0 (Gomes *et al.*, 2020)

La Suite intruye a rocas Arqueanas a Paleoproterozoicas del Complejo Guanhões, correspondiente a gneisses migmatíticos TTG y granitos asociados (Magalhães *et al.*, 2018). Este evento está asociado a la apertura del rift del Espinhaco (Fernandes *et al.*, 2000) y están ubicadas en el Cratón de San Francisco, en la porción suroccidental del Cinturón Neoproterozoico Araçuai (Figura 3), formado durante la orogenia Brasiliana, limitando con la Sierra del Espinhaco por el este (Gomes *et al.*, 2020).

2.1 Geología local

En la localidad de Sabinópolis, producto de los mapeos superficiales realizados por el equipo de exploración Aclara, se definieron 4 unidades litológicas principales (Figura 4): Basamento metasedimentario y Gneiss de basamento, ambos asociados al Complejo Guanhões; Granito de biotita de la Suite Borrachudos y Sedimentos recientes.

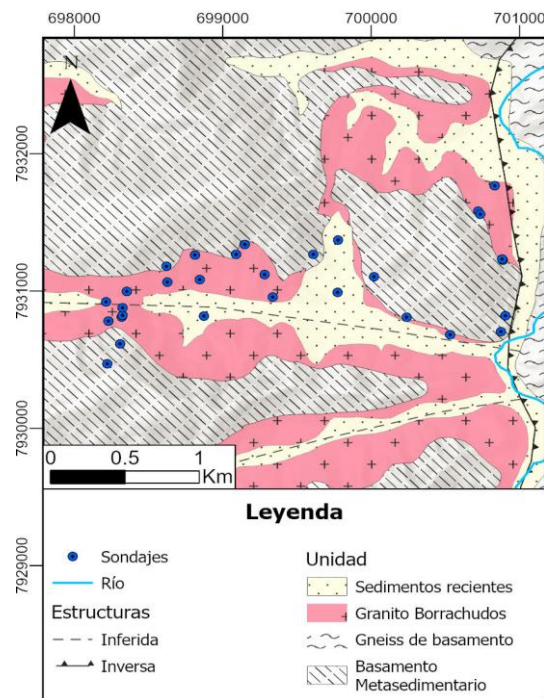


Figura 4. Mapa geológico del proyecto, resultado de mapeo superficial.

El Basamento metasedimentario (MSE) está compuesto por sucesiones estratificadas de esquistos micáceos, metapelitas y metareniscas. Localmente, presenta porfiroblastos de granate y alteración clorítica. Está ampliamente distribuido al oeste del área de estudio y como *roof pendant* por sobre el granito de biotita.

El Gneiss de basamento (GNE) se presenta en el área como secuencias altamente deformadas que varían entre tonalitas de biotita a muscovita de grano fino, con presencia de magnetita. Predomina al este del área de estudio limitado por una estructura producto del emplazamiento del granito Borrachudos.

En el área de estudio la Suite Borrachudos (MGB), corresponde a un granito de biotita de grano medio a grueso, levemente foliado. Localmente, presenta segregación de minerales en capas félsicas y máficas. Se encuentra localmente intruído por diques máficos y pegmatíticos. Estos últimos también afectan a las unidades de basamento. Es la litología dominante en el área de estudio, cortada por valles de orientación E-W regulares, asociados a una estructura NNE-SSW en el contacto con el Gneiss del basamento.

Finalmente, los Sedimentos recientes corresponden a depósitos fluviales, coluviales y aluviales, provenientes de la erosión de las unidades antes mencionadas.

3 Metodología

Una vez definida la localidad a evaluar, el trabajo se dividió en las siguientes etapas, desarrolladas entre agosto de 2023 y mayo de 2024:

- Recopilación bibliográfica, análisis topográfico y preparación de terreno.
- Campaña de terreno con mapeo detallado con elaboración de mapa geológico local. Además de muestreo superficial para análisis con equipo portátil de fluorescencia de rayos X (XRF).
- Elaboración de propuesta de campaña de perforación y solicitud de accesos a propietarios.
- Ejecución de campaña de perforación con el método de tornillo sinfín (*auger*) manual.
- Logueo de sondajes en intervalos de 1 metro, con descripción de mineralogía, grado de meteorización, fracción granos minerales/arcilla,

color, textura y granulometría.

- Muestreo y envío a laboratorio ALS para análisis de elementos traza por el método ME-MS81, correspondiente a fusión de borato de litio seguida de disolución ácida y medición ICP-AES.
- Análisis e interpretación de los resultados de mapeo superficial, información de los sondajes y resultados geoquímicos para definición de unidades geológicas (UG).
- Confección de perfiles de litología y regolito, e integración de estos en un modelo 3D en el software *Leapfrog*.

4 Resultados

Se describieron 378.55 metros de testigos, correspondientes a 30 sondajes perforados en el área de estudio, con 383 muestras analizadas. Esta información permite comprender las características y distribución del regolito de cada litología en superficie y en profundidad.

4.1 Definición de Unidades Geológicas

En los sondajes analizados se identificaron las litologías MSE y MGB; y los horizontes de regolito: UP (pedolito superior), LP (pedolito inferior), S (saprolito) y SR (saprock).

Combinando litología y regolito, se definieron 7 UG. Para MSE, estas corresponden a las UG MSE-UP y MSE-S, descritas en la Figura 5.

UG	COLOR	CARACTERÍSTICAS
MSE - UP		Sin evidencias de textura primaria, tonalidades rojizas, presencia de materia orgánica. Matriz arcillosa dominante con algunos granos de cuarzo. Puede contener muscovita y magnetita.
MSE - S		Conserva textura del protolito, con bandeamiento característico. Predomina la presencia de cuarzo fino y biotita con incipiente a moderada alteración a vermiculita.

Figura 5. Características principales para las UG identificadas en MSE.

Por otro lado, las UG para MGB son: MGB-UP, MGB-LP, MGB-S y MGB-SR, descritas en la Figura 6.

UG	COLOR	CIA	CARACTERÍSTICAS
MGB - UP		> 90	Sin evidencias de textura primaria, tonalidades oscuras, matriz fina arcillosa con escasos granos de cuarzo, presencia de materia orgánica
MGB - LP		90 - 77	Sin evidencias de textura primaria, tonalidades anaranjadas levemente rojizas. Matriz fina arenosa con escaso cuarzo fino, biotita pervasivamente alterada a vermiculita y pseudomorfos de feldespatos
MGB - S		77 - 67	Conservación de la textura del protolito. Tonalidades amarillentas a blanquecinas. Predominio de cuarzo de grano medio a grueso, biotita con moderada a incipiente alteración a vermiculita, feldespatos parcialmente alterados a caolinita.
MGB - SR		< 67	Fragmentos rocosos en matriz arcillosa a arenosa. Fragmentos con leve alteración superficial

Figura 6. Perfil esquemático con las UG definidas para el MSE con sus características principales.

4.2 Resultados geoquímicos

Se obtuvieron resultados analíticos de elementos mayores y tierras raras, que se utilizaron para evaluar las concentraciones de REE de los 30 sondajes, como se muestra en la Figura 7.

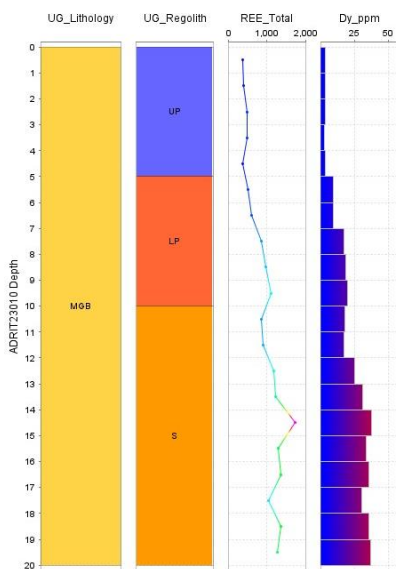


Figura 7. Ejemplo de perfil de sondaje que muestra la distribución de REE totales y Dy en profundidad, asociados a las UG.

4.3 Modelamiento en 3D

Con la integración de la información en secciones se generaron modelos de litología (Figura 8) y regolito, utilizando el software *Leapfrog Geo*. En el modelo de litología, MGB es la unidad de mayor distribución, cubierta por al menos 20 metros de MSE. Mientras que, el regolito queda representado en capas estratificadas de UP a SR, con espesores variables.

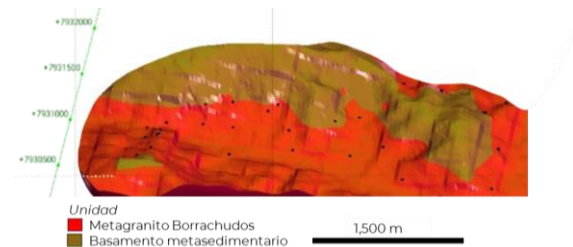


Figura 8. Vista al norte del modelo geológico. Los puntos negros indican los sondajes.

5 Discusión

5.1 Identificación de la UG de interés económico

Al comparar los resultados químicos de ambas litologías, se evidencia un mayor enriquecimiento en REE del MGB por sobre MSE (Figura 9), con concentraciones promedio de la sumatoria de REE de 818 ppm para el MGB y 347 ppm para el MSE.

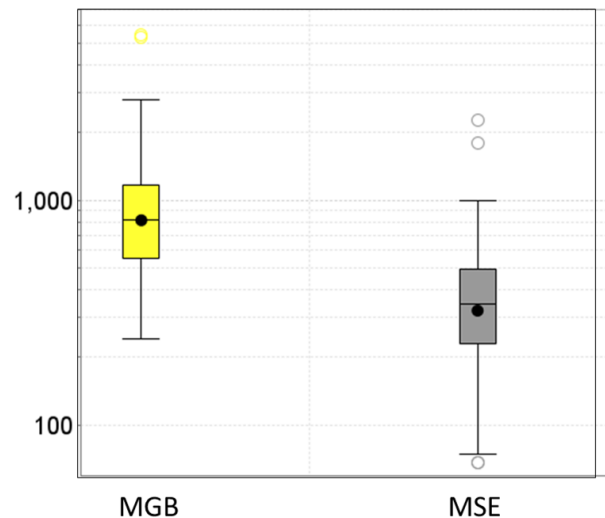


Figura 9. Diagrama de cajas y bigotes con contenidos totales de REE para cada unidad litológica.

Esta diferencia se debe a que el MGB de protolito ígneo, posee minerales enriquecidos en REE en su composición original. Además de feldespatos que al alterarse a arcillas permiten el intercambio catiónico

de REE, que no están presentes en MSE.

Evaluando por horizonte de regolito, se observa que los horizontes enriquecidos corresponden a LP y S (Figura 10), con promedios de 888 ppm y 1048 ppm, respectivamente, por sobre UP y S que no superan los 500 ppm en promedio, lo que coincide con el modelo teórico.

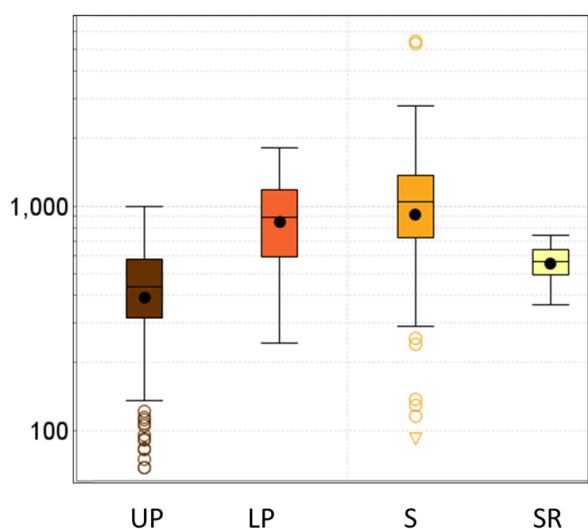


Figura 9. Diagrama de cajas y bigotes con contenidos de TREE para cada UG del MGB.

5.2 Distribución de la UG de interés económico

El área de estudio se caracteriza por la presencia de un *roof pendant* de MSE, que cubre el MGB. A partir de la información de los sondajes y del modelo litológico, se obtiene un espesor preliminar de al menos 20 metros de dicha cobertura, en las mayores elevaciones. Sin embargo, dado el alcance de los sondajes, no se ha podido conocer la profundidad exacta del MSE (Figura 10).

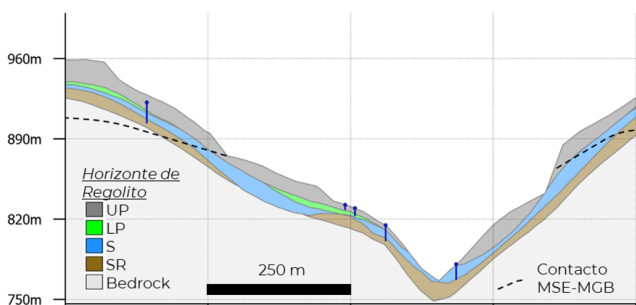


Figura 8. Sección transversal del modelo de regolito que muestra la interpolación de horizontes de regolito. En línea punteada el contacto inferido entre MSE y MGB. En líneas azules los sondajes presentes en ese perfil.

Por otra parte, se ha demostrado un buen desarrollo de regolito para ambas unidades, con continuidad lateral. En el caso del MGB, el espesor económico varía de 5 a 12 metros y se encuentra tanto en profundidad como también en aflorando en laderas. Además, el área está dominada por pendientes moderadas, que no favorecerían la conservación del regolito, por mayor erosión.

Esta configuración deja incierta la viabilidad económica en un contexto de extracción, debido a que el MSE podría ser muy potente, o bien, el regolito del MGB podría estar desarrollado sólo en laderas.

5.3 Comparación con otros proyectos

Una forma de evaluar el potencial económico del proyecto es mediante la comparación de concentraciones de REE con otros depósitos tipo REE-RH que ya se encuentran en el mercado en Brasil (Figura 11).

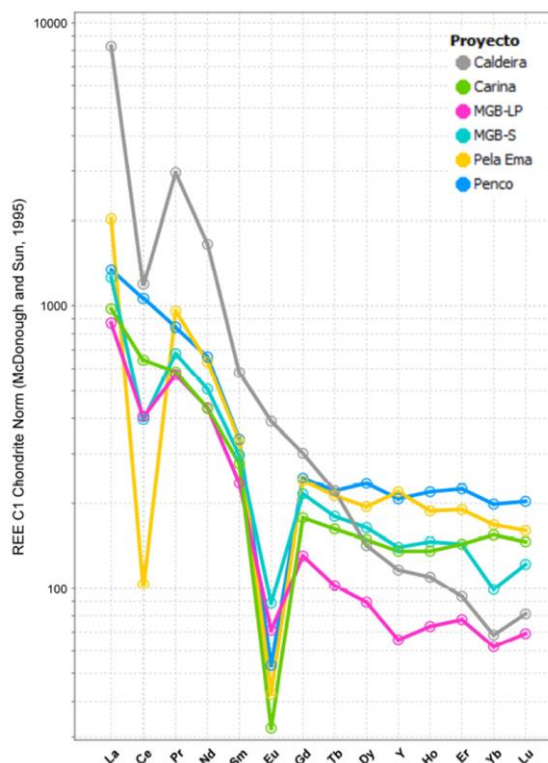


Figura 11. Diagrama de distribución de REE. Comparación entre las UG de interés del presente trabajo, Penco (Ausenco Engineering, 2021) y Carina (GE21, 2023) de Aclara Resources, Caldeira (Meteoric Resources, 2024) y Pela Ema (Mineração Serra Verde, 2016).

Se puede observar que el MGB-LP es el horizonte que se encuentra más empobrecido del grupo, incluso de su equivalente litológico MGB-S, tanto en LREE como en HREE. Esta diferencia puede deberse a la menor proporción de feldespatos alterados a caolinita, respecto al horizonte inferior. Por su parte, el MGB-S está más enriquecido en HREE que el proyecto Caldeira y es similar al proyecto Carina en LREE. Esto indicaría un potencial económico en el mercado actual, si existe un volumen suficiente.

6 Conclusiones y recomendaciones

- El granito São Félix de la Suite Borrachudos tiene potencial como depósito de RH-REE. La distribución de REE coincide con el modelo teórico, presentando horizontes mineralizados que varían entre 5 y 12 metros, relativamente continuos y presentan concentraciones promedio de REE de aproximadamente 1300 ppm.
- En el área de estudio, la presencia del basamento metasedimentario estéril podría impactar negativamente la extracción minera del horizonte mineralizado.
- Se recomienda una campaña de sondajes con mayor alcance en profundidad o realizar ensayos geofísicos de resistividad, para determinar el real espesor del *roof pendant*.
- Se recomienda evaluar otros cuerpos graníticos de la Suite Borrachudos, en zonas con menores pendientes y con pocas evidencias de basamento en la localidad.

7 Referencias

Ausenco Engineering. 2021. Preliminary Economic Assessment (PEA) for Penco Module Project (NI 43-101 Technical Report 1; p. 382). Aclara Resources Inc.

Borst, A. M.; Smith, M. P.; Finch, A. A.; Estrade, G.; Villanova-de-Benavent, C.; Nason, P.; Marquis, E.; Horsburgh, N.; Goodenough, K.; Xu, C.; Kynický, J.; Geraki, K. 2020. Adsorption of rare earth elements in regolith-hosted clay deposits. *Nature communications*. Vol. 11 (1): 4386 p.

Bustos, N.; Marquardt, C.; Belmar, Á.; Cordeiro, P. 2022. Regolith-hosted rare earth exploration in the Chilean Coastal Range of the Central Andes. *Journal of Geochemical Exploration*. Vol. 234: 106934 p.

Castor, S. B.; Hedrick, J. B. 2006. Rare earth elements. *Industrial minerals and rocks*. Vol 7: 769-792.

Damhus, T.; Hartshorn, R. M.; Hutton, A. T. 2005. Nomenclature of inorganic chemistry: IUPAC recommendations 2005. Chemistry International.

Dossin, I.; Dossin, T.; Charvet, J.; Cocherie, A.; Rossi, P. 1993. Single-zircon dating by step-wise Pb-Evaporation of middle proterozoic magmatism in the Espinhaço range, Southeastern São Francisco Craton (Minas Gerais, Brazil).

Dussin, T.; Duarte, P.; Dussin, I. 2000. Registros da tectônica brasileira na região de Guanhões (SE, Brasil): deformação e metamorfismo das rochas de idade pós-transamazônica. *Geonomos*.

Fernandes, M.; Fuzikawa, K.; Neves, J.; Bilal, E.; Leonardos, C. 2000. Fluids related to Endokarn Formation processes in the guanhões area, Minas Gerais state, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*. Vol: 30 (2): 326-330.

Foley, N.; Ayuso, R. 2015. REE enrichment in granite-derived regolith deposits of the Southeastern United States: Prospective source rocks and accumulation processes. *Geol. Surv. Pap.* Vol. 3: 131-138.

GE21, Consultoria Mineral Ltda. 2023. Preliminary Economic Assessment. Carina Rare Earth Element Project. Aclara Resources Mineração Ltda.

Gomes, S.; Silva, R.; Kemp, A.; Santos, J.; Hagemann, S.; Lobato, L.; Rosière, C.; Novo, T. 2020. Zircon U–Pb ages and Hf isotope compositions of Açucena Granite (Borrachudos Suite): Implications for Statherian-Cambrian tectono-magmatic evolution of the southern border of the São Francisco Craton, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*. Vol. 100: 102543 p.

Jaireth, S.; Hoatson, D. M.; Mieztis, Y. 2014. Geological setting and resources of the major rare-earth-element deposits in Australia. *Ore Geology Reviews*. Vol. 62: 72-128.

Haque, N.; Hughes, A.; Lim, S.; Vernon, C. 2014. Rare Earth Elements: Overview of Mining, Mineralogy, Uses, Sustainability and Environmental Impact. *Resources*. Vol. 3 (4): 614-635.

Meteoritic Resources. 2024. Capão do Mel Resource Update Doubles Caldeira Project Measured and Indicated Resources. ASX Announcement.

Li, Y. H. M.; Zhao, W. W.; Zhou, M. F. 2017. Nature of parent rocks, mineralization styles and ore genesis of regolith-hosted REE deposits in South China: An integrated genetic model. *Journal of Asian Earth Sciences*. Vol. 148: 65-95.

Li, M.; Zhou, M.; Williams-Jones, A. 2019. The genesis of regolith-hosted heavy rare earth element deposits: Insights from the world-class Zudong deposit in Jiangxi Province, South China. *Economic Geology*, Vol. 114 (3): 541-568.

Magalhães, J.; Pedrosa-Soares, A.; Dussin, I.; Müntener, O.; Pinheiro, M.; Silva, L.; Knauer, L.; Bouvier, A.; Baumgartner, L.

2018. First Lu-Hf, $\delta^{18}\text{O}$ and trace elements in zircon signatures from the Statherian Espinhaço anorogenic province (Eastern Brazil): geotectonic implications of a silicic large igneous province. *Brazilian Journal of Geology*. Vol. 48: 735-759.

Sanematsu, K.; Watanabe, Y. 2016. Characteristics and Genesis of Ion Adsorption-Type Rare Earth Element Deposits. *Reviews in Economic Geology*. Vol. 18: 55-79.

Mineração Serra Verde. 2016. Serra Verde Rare Earth Project. *Geology*.

Scott, K.; Pain, C. (2009). *Regolith science*. Csiro Publishing.

Taylor, S. R.; McLennan, S. 1985. *The Continental Crust: Composition and evolution*. Blackwall Scientific Publications. Vol. 54: 209-230.

Van Gosen, B. S.; Verplanck, P. L.; Seal II, R. R.; Long, K. R.; Gambogi, J. 2017. Rare-earth elements. No. 1802-O. US geological survey.

ANEXO

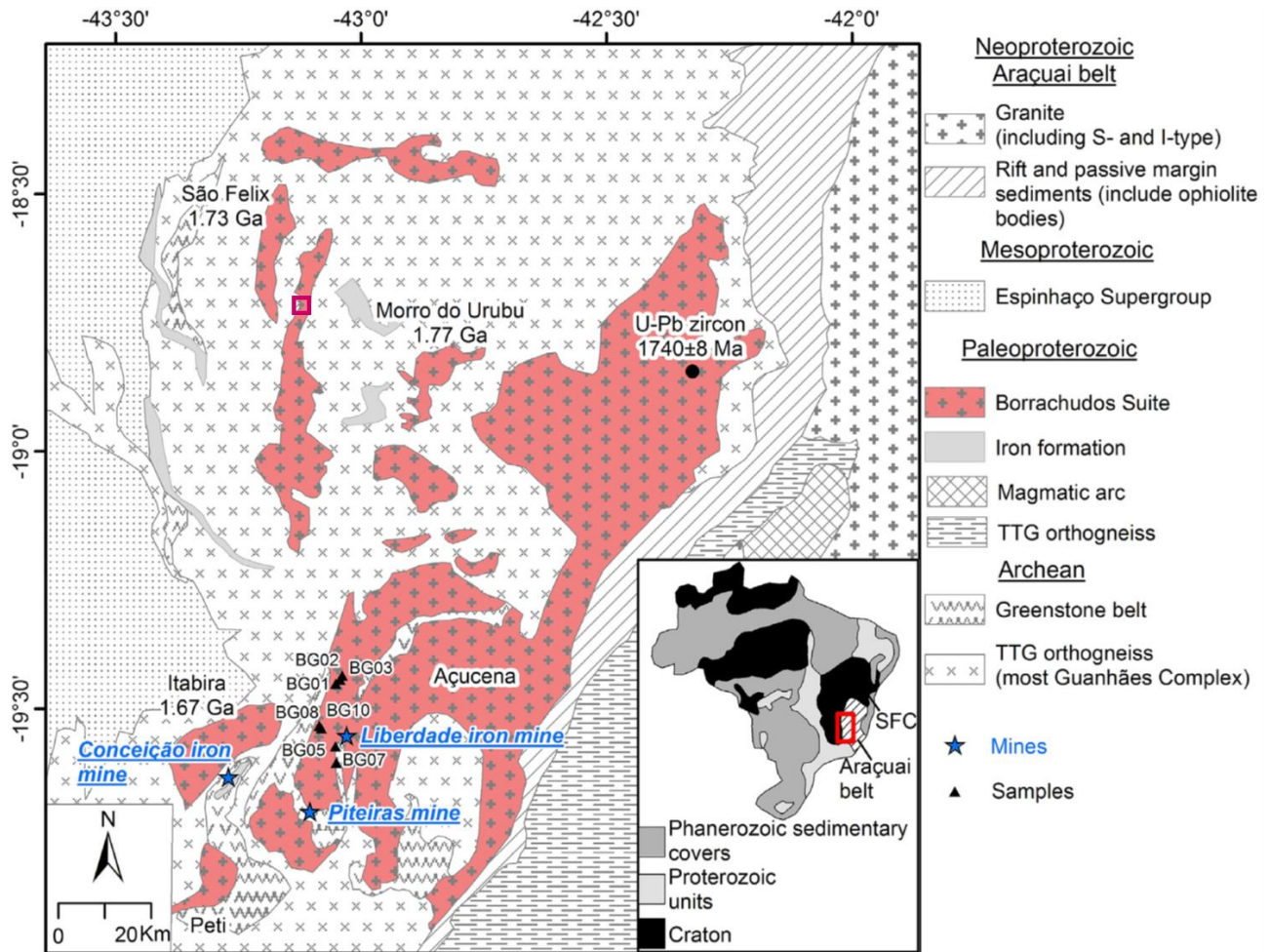


Figura 2. Mapa geológico regional de la Suite Borrachudos, extraído de Gomes *et al.* (2020). El cuadrado rosa indica el área de estudio.