

# MINERALOGÍA Y GEOQUÍMICA DE LOS ELEMENTOS DE TIERRAS RARAS ASOCIADOS A LOS DEPÓSITOS DE LATERITAS ALUMINÍFERAS

Auridis Altagracia Severino Díaz  
Luis Ángel Mosquea García  
Lisard Torró i Abat

## Resumen

*El depósito de bauxitas kársticas de Las Mercedes, situado en la Sierra de Batoruco, zona sur de la República Dominicana, está ubicado en el núcleo de un sinclinal y, encajante en una (calizas) que corresponde a un wakestone de foraminíferos planctónicos y algún bentónico. Este depósito se caracteriza por la presencia de hematites, goethita, gibbsita, boehmita, nordstrandita, rutilo y anatasa. El depósito de Mercedes fue caracterizado como una bauxita rica en Fe, y con un alto grado de laterización.*

*Estas bauxitas por sus altos contenidos en Cr es probable que la fuente que originó este depósito sea de composición básica. El mismo tiene alto contenido en LREE, que presentan una clara correlación positiva con los óxidos mayores de Al, Fe y Ti. Debido a los contenidos de tierras raras las bauxitas de Mercedes se pueden considerar como una fuente no-convencional de REE.*

**Palabras claves:** Bauxitas kársticas; geoquímica y mineralogía de REE; Las Mercedes; Sierra de Batoruco

co, roca carbonatada (calizas), tierras raras, las menas bastnasita, monacita, loparita.

## ABSTRACT:

The karst bauxite deposit of Las Mercedes, located in the Sierra de Bahoruco, southern zone of the Dominican Republic, is located in the nucleus of a syncline and, in a limestone, corresponding to a wakestone of planktonic foraminifera and some benthic. This deposit is characterized by the presence of hematite, goethite, gibbsite, boehmite, nordstrandite, rutile and anatase. The Mercedes deposit was characterized as a bauxite rich in Fe, and with a high degree of laterization.

These bauxites for their high Cr-contents are likely to have the basic source of this deposit. It has a high content of LREE, which presents a clear positive correlation with the higher Al, Fe and Ti oxides. Due to rare earth contents Mercedes bauxites can be considered as a non-conventional source of REE.

**Keywords:** Bauxite karst; Geochemistry and mineralogy of REE; The Mercedes; Sierra de Bahoruco, carbonated rock (limestone), rare earths, ores bastnasita, monacita, loparita.

## INTRODUCCIÓN

En 2010, la Comisión de la Unión Europea definió 14 materiales críticos sobre la base de su importancia económica y su riesgo de suministro (CE, 2010). Entre estas materias críticas, las tierras raras (REE) se clasifican como de prioridad máxima. Estos elementos tienen aplicaciones en tecnologías de alta gama tales como las

denominadas verdes asociadas a las energías renovables, la reducción de gases de efecto invernadero y la eficiencia energética (volumen de *elements* dedicado a las REE en el 2012, Chakhmouradian y Wall, 2012).

La actual situación de tensión en el mercado de estos elementos es producto del cambio brusco en la política de exportación de China, máximo productor mundial, que puso de manifiesto la gran vulnerabilidad de las industrias occidentales dependientes de estas materias primas. Esta situación ha conllevado a que nuevos proyectos de exploración de recursos de tierras raras se hayan iniciado en todo el mundo.

Los recursos mundiales de tierras raras se encuentran principalmente en las menas bastnasita, monacita, loparita, y en arcillas ricas en REE (*EE.UU. Geological Survey, 2013*). Los mayores recursos mundiales de tierras raras son los depósitos de bastnasita asociados a rocas alcalinas y carbonatitas en China y los Estados Unidos, seguido de los depósitos de monacita en Australia, Brasil, China, India, Malasia, Sudáfrica, Sri Lanka, Tailandia y en los EE. UU. La mayor parte de los recursos mundiales restantes están contenidos en arcillas (*REE-bearing ion-adsorption clays*) en el sur de China (Bao y Zhao, 2007; Foley et al., 2013).

Actualmente, ha llamado la atención de las compañías mineras los denominados “depósitos no convencionales de REE”. Entre estos recursos, las lateritas (incluyendo las bauxitas) son consideradas un objetivo prioritario de exploración donde las tierras raras pueden ser concentradas durante los procesos de meteorización como resultado de su limitada movilidad en las aguas superficiales.

Los procesos intensos de meteorización química en las regiones tropicales pueden dar lugar a la formación de arcillas enriquecida en REE. En particular, el Escandio (Sc) es considerado una tierra rara ya que tiene propiedades físicas y químicas similares, ha sido descrito en concentraciones de hasta 390 ppm de  $\text{Sc}_2\text{O}_3$ , junto con otras REE a partir de residuos de bauxita de Jamaica (Wagh y Pinnock 1987). Una revisión publicada recientemente sobre los procesos metalúrgicos para la recuperación de las lateritas como “los recursos de escandio más prometedores para su producción” (Wang et al., 2011).

Las bauxitas representan la primera fuente mundial de Aluminio (Al), y brindan información muy valiosas para reconstrucciones paleoambientales (Freyssinet et al., 2005; Price et al., 1997). Estos depósitos se agrupan en dos grandes categorías en función de la naturaleza de la roca madre (Bárdossy, 1982): i) depósitos desarrollados sobre rocas carbonatadas (tipo kárstico), ii) depósitos desarrollados sobre rocas aluminosilicatadas (se dividen en dos subtipos: bauxitas lateríticas y tipos Tikhvin).

Muchos depósitos de bauxitas kársticas, desarrollados sobre rocas carbonatadas, están relativamente enriquecidos en REE (Mordberg, 1993) y en algunos casos como los depósitos de bauxitas de China, los contenidos de tierras raras alcanzan grados industriales (Wang et al., 2010). De acuerdo con los datos obtenidos por geólogos chinos, 3 cortezas de meteorización con contenidos de REE de 500 ppm (g/t) son viables económicamente (Bao y Zaho, 2007; Klyucharev et al., 2013). En muchos de los depósitos las reservas estimadas de estos elementos oscilan entre 5 y 10 toneladas. Las principales fases portadoras de REE son minera-

les del grupo de las arcillas, donde los elementos de tierras raras se encuentran adsorbidas en la superficie, y cómo minerales propios de estos (synchysita, bastnasita, cerianita, parisita, churchita, crandallita, goyazita, svanbergita-woodhousita, xenotima, thorita, florencita, rhadophana) (Mongelli, 1997; Mordberg, 1999, 2000; Horbe y Costa, 1999; Lanskou y Andreou, 2003; Mameli et al., 2007; Wang et al., 2010; Li et al., 2013).

La región del Caribe alberga recursos importantes de bauxitas, estos han sido extensamente explotados en Jamaica (Nelson et al., 2011). En la República Dominicana, en la Sierra de Baboruco, también existen recursos de bauxitas (depósitos de Las Mercedes, Rancho Nuevo, Aceitillar, Hundidero, Canote, Güirito, indicios de Caña de Peblque, Llanos de Franco, Punta de la Colmena, entre otros) aunque adolecen de estudios mineralógicos y geoquímicos detallados (memorias de recursos minerales, de los cuadrantes circundantes a escala 1:100,000, del proyecto de desarrollo al sector geológico y minero de la República Dominicana, Programas SYSMIN II, 2007-2011). La mena bauxítica fue explotada en el período comprendido entre 1954 y 1983 por Alcoa Exploration Company, y entre 1989 y 1991 por la empresa Ideal Dominicana. Las reservas iniciales de bauxitas se estimaron en 28 millones de toneladas métricas (TM) de los cuales se han extraído alrededor de 16 (TM).

## **METODOLOGÍA**

### **Diseño de investigación**

La presente investigación se ubica dentro del diseño no experimental, del tipo transeccional exploratorio, ya que se describieron variables y se analizaron su

incidencia en un momento dado. La investigación es de carácter exploratorio debido a la falta de antecedentes y procesos analíticos desarrollados en la zona de interés. De la zona de estudio solo se cuenta con datos relativamente superficiales sobre el tema de investigación, de modo que, para la efectividad de la presente se crearon fundamentos propios, basado en conclusiones planteadas por diversos autores en depósitos de bauxitas del extranjero.

En cuanto al enfoque, para cumplir con los objetivos de esta investigación las variables fueron medidas y descritas en función de las características geológicas, petrológicas y mineralógicas presentes en los afloramientos rocosos; por este motivo el diseño apropiado para obtener la correcta interpretación y recolección de los datos, es el enfoque mixto. La selección de este diseño de investigación está basada en la interpretación de las principales características del enfoque mixto, el cual es recomendado para investigaciones que requieran de la combinación de los enfoques cualitativos y de los cuantitativos. (Hernández, Batista. 2003).

De acuerdo con Le Compte (1995), la investigación cualitativa se refiere a una categoría de diseños de investigación que extraen descripciones a partir de las observaciones que adoptan diversas formas: tales como observaciones y descripciones tomadas en el campo, interpretación de los mapas, fotografías de los afloramientos rocosos, etc.; las mismas dependerán del tipo de dato a coleccionar. De acuerdo con Robles (2000), la investigación cuantitativa tiene un control sistemático de una variable de otra. Manteniendo un control estricto de la situación a experimental, utilizando variables definida operacionales. Se basa en la recolección

de datos numéricos que se obtienen de la construcción de instrumentos de medición para la prueba de hipótesis. Acorde a lo planteado por estos autores presentado en los dos conceptos expuestos anteriormente la investigación es de enfoque mixto.

| <b>Operacionalización de las variables Objetivos específicos</b>                                                                  | <b>Variables</b>                                                                                                      | <b>Medio de verificación</b>                                                    | <b>Indicadores</b>                                                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| a) Caracterizar desde un punto de vista geológico, mineralógico y geoquímico, las mineralizaciones de bauxitas.                   | a) Geología, mineralogía y geoquímica, de las mineralizaciones de bauxitas.                                           | Con los resultados de los análisis geoquímicos de laboratorios.                 | - Geoquímica de elementos traza (REE, HFSE, LILE).<br>- Modelos de balance masas. |
| b) Identificar la roca madre de los depósitos de bauxitas de la sierra de Bahuco.                                                 | b) Roca madre de los depósitos de bauxitas de la sierra de Bahuco.                                                    | Con los resultados de los análisis geoquímicos de laboratorios.                 | - Contenidos en óxidos de Al, Si y FE.<br>- Geología regional.                    |
| c) Definir las condiciones físico-químicas y procesos de formación, que controlan la movilidad de las REE en ambiente bauxíticos. | c) Condiciones físico-químicas y procesos de formación, que controlan la movilidad de las REE en ambiente bauxíticos. | Con los resultados de los análisis mineralógicos y geoquímicos de laboratorios. | - Contenidos en elementos mayores y trazas.                                       |

|                                                                                                               |                                                                                                 |                                                              |                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| d) Interpretar la morfología de los patrones de REE y su significado genético.                                | d) Morfología de los patrones de REE y su significado genético.                                 | Con los resultados de los análisis químicos de laboratorios. | - Concentraciones en REE (LREE y HREE).                               |
| e) Determinar la potencialidad de las bauxitas de la sierra de Bahuco como una fuente no convencional de REE. | e) Potencialidad de las bauxitas de la sierra de Bahuco como una fuente no convencional de REE. | Con los resultados de los análisis químicos de laboratorios. | - Menas portadoras de REE.<br>- Concentraciones en REE (LREE y HREE). |

## Métodos

El presente estudio es de método deductivo, ya que el método deductivo crea leyes a partir de la observación de los hechos, mediante la generalización del comportamiento observado, lo que realiza es una especie de generalización, sin que por medio de la lógica pueda comprobar una demostración de las citadas leyes o conjunto de conclusiones (Behar 2008).

Se acogió un método de investigación deductivo debido a lo planteado por Behar en el 2008, porque en la presente investigación se estudiaron a detalles los procesos de formación del yacimiento de bauxitas mediante evidencias geológicas en los perfiles del 23 yacimiento, es decir analizando los elementos de la formación para llegar a un concepto o ley siguiendo un proceso analítico-sintético.

## **Técnicas e instrumentos**

Las técnicas utilizadas en la investigación fueron: registros de datos mediante una bitácora de trabajo de campo, piqueta, GPS, brújula, escalímetro, lupa, rayador, fotografías satelitales, software informático aplicado a la geología para la creación de mapas geológicos (ArcGis 10.2), y los mapas topográficos y geológicos de la provincia de Bahoruco a escala 1:50.000. Entre las técnicas analíticas de geoquímicas que se desarrollaron, están las siguientes: - Análisis geoquímicos de roca total para elementos mayores y traza mediante Fluorescencia de Rayos-X (XRF) e ICP-MS, respectivamente.

- Realización de láminas delgadas-pulidas, y de probetas pulidas. - Estudio petrográfico mediante microscopía óptica de luz reflejada y transmitida. - Caracterización mineralógica mediante difracción de Rayos-X, y micro-Raman. - Estudio mediante microscopía electrónica con analizador de energías (SEM-EDS). - Determinación de la composición química de las principales fases minerales mediante microsonda electrónica (EMPA).

## **Procedimientos**

- a) Para el presente estudio se cuenta con informaciones cartográficas y geoquímicas, proveniente de los trabajos desarrollado en el marco del Programa de la CartografíaGeotemática de la República Dominicana, Proyecto 1B, financiado en consideración de donación por la Unión Europea, a través, del programa SYSMIN II de soporte al sector geológico-minero (Programa CRIS 190-604, ex No 9 ACP

DO006/01). Estos trabajos se realizaron en el período 2007-2010 por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), formando parte del Consorcio IGME-BRGM-INYPSA, con normativas de realización, dirección y supervisión de la Dirección General de Minería de la República Dominicana.

- b) Se realizó una cartografía de pequeña escala de las áreas de afloramiento de las mineralizaciones de bauxita. Mediante este tipo de cartografía se establece relaciones estructurales y petrológicas que se sometieron a corroboración con métodos analíticos subsecuentes. Esto fue posible con los datos del muestreo intensivo desarrollado en aquellas áreas seleccionadas para cartografía de detalle.
- c) Se estudió las características de las mineralizaciones a distintos niveles del perfil de meteorización. Además, se seleccionó perfiles representativos para realizar el muestreo desde la zona superior hasta la roca madre. En especial, se estudió el espesor de los perfiles de meteorización y su posible correlación con cambios en el tipo de roca madre, topografía, condiciones de drenaje y nivel freático. En esta etapa se tomaron las muestras representativas para su caracterización mineralógica y geoquímica. En el caso de las muestras que fueron procesadas por (EPD+HS) (Fig. 4), se tomaron muestras de 2 a 3 kg. Además, se realizó mediciones *in situ* de Ph-Eh en el área de los yacimientos.
- d) Se utilizó los datos arrojados por las mediciones de pH y Eh realizadas *in situ* y la toma de muestra de agua en el área de los yacimientos. Se determinó el grosor de los 25 perfiles de meteorización y su posible correlación con cambios litológicos en la roca

madre y con la topografía, para con esto determinar la distribución de las zonas minerales y composición química con la profundidad. Del mismo modo, se realizaron análisis de los elementos más inmóviles dentro de los perfiles para poder definir sus perfiles de concentración, y se midió la densidad de la roca (laterita) a distintas profundidades. Con esta información, se pueden calcular los valores de los factores de enriquecimiento volumétricos y másicos. Los trabajos de campo fueron realizados por los equipos del Servicio Geológico Nacional (SGN) y las Universidades de Barcelona (UB) y Granada, en dos campañas de muestreo de campo de 15 días cada una, los equipos de trabajos estaban formados por especialistas en conocimiento del terreno y geología local, en geología regional y estructural, en petrología, y yacimientos minerales.

Ya realizados los trabajos de campos y obtenidas las muestras a analizar para lograr los objetivos planteados se llevó un arduo proceso de análisis químico analítico mediante las siguientes técnicas y métodos:

### **Análisis químico de los elementos mayores y traza de las rocas mediante ICP-MS y XRF.**

Para la obtención de los objetivos a, b y c, se trituró moliendo y pulverizando grandes cantidades de muestras (>2.5 kg) en molino de mandíbulas y posteriormente en un mortero eléctrico de ágata (Fig. 5; anexo I). Los elementos mayores y menores de transición (Sc, V, Cr y Ni) se determinaron mediante Fluorescencia de Rayos-X en las 26 Universidades de Barcelona y Granada, o en el GeoAnalytical Lab de la Washington State University (Estados Unidos). Los elementos tra-

za (Li, Co, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Cs, Ba, elementos de las tierras raras, Hf, Ta, Pb, Th y U) se analizaron por Espectrometría de Masas sobre Plasma Inductivamente Acoplado (ICP-MS) en la Universidad de Granada.

### **Estudios mediante microscopía óptica, SEM-EDS, EMPA, LA-ICP-MS y RAMAN.**

Para la obtención del objetivo d, se realizaron láminas delgadas pulidas y probetas pulidas (en la Universidad de Barcelona y Universidad de Granada). A partir de estas láminas y probetas se realizaron un estudio mineralógico y textural (mediante microscopía óptica, SEM-EDS) y se determinó la composición química de los minerales mediante microsonda electrónica (EMPA).

Por otra parte, los minerales que componen la mena bauxítica se caracterizaron mediante espectroscopía Raman. La espectroscopía micro-Raman constituye un método rápido, sencillo, fiable y no destructivo para identificar fases minerales. Cada una de estas especies minerales tiene unas vibraciones Raman específicas que permiten identificarlas mediante un análisis directo sobre las mismas secciones pulidas o láminas delgadas pulidas que se usan en microscopía óptica. La espectroscopía micro-Raman constituye un complemento idóneo para las técnicas convencionales de identificación mineral (Difracción de Rayos X (SEM, EMPA). Los análisis serán realizados en los Centros Científicos y Tecnológicos de la Universidad de Barcelona (CCITUB).

## **Caracterización mediante Difracción de Rayos X (DRX).**

1. Para lograr los objetivos a, c, e; en conjunto con la técnica a, las muestras fueron caracterizadas cualitativa y cuantitativamente mediante difracción de rayos X en la Universidad de Barcelona. La caracterización incluye diversas etapas, que por orden de complejidad son:
  - a) Simple caracterización de fases minerales bien conocidas; identificación y parámetros cristalinos.
  - b) Identificación y caracterización física (cristalinidad) de fases complejas, mal definidas, poco cristalinas o muy variables. Es conocida la existencia de fases complejas de este tipo de mineralización.
  - c) Caracterización, hasta donde sea posible, de nuevas fases no descritas anteriormente.
  - d) Cuantificación de las fases (% en peso o % en volumen). Todos los apartados anteriores, excepto el a) requieren métodos no estándares de: Preparación de la muestra;
2. Método experimental de medida de intensidades de difracción y,
3. Método de análisis de los datos.

A continuación se describen brevemente los equipos disponibles en la universidad de Barcelona, y los métodos de análisis que se utilizaron.

Según las características del material, la muestra puede ser en capilar, o en forma plana. En este caso, además puede ser un agregado orientado. Para cada una de estas muestras, pueden registrar las intensidades mediante: a) PSD (detector sensible a la posición,

120° (2 $\theta$ ); b) detector unidimensional gran angular posicionable (3° (2 $\theta$ )); c) detector de posición (clásico). En las planas, además, puede ser muy útil combinar difracción con temperatura, para registrar procesos como deshidratación y oxidación-reducción. Las intensidades de difracción del material policristalino se analizaron para identificar las fases (mediante los softwares de “search” habituales).

### **Métodos y técnicas de análisis de datos**

Mediantes las técnicas mencionadas y descritas en el apartado anterior se realizaron diagramas binarios utilizando el software informático aplicado a la geología para interpretación geoquímica GCDkit 4.00, y se realizaron tablas en donde se presentan detalladamente las concentraciones mineralógicas de REE y minerales de bauxitas. Además mediante software especializado del campo de investigación se realizaron gráficas donde se presentan las variaciones en las concentraciones en ppm de cada los REE en los depósitos de bauxitas de acuerdo a las muestras estudiadas. Así mismo, se realizaron diagramas de normalización de REE a condritos.

Las preparaciones de las muestras para aplicarles las técnicas analíticas se realizaron en la Universidad de Barcelona.

## RESULTADOS

### **Petrografía y mineralogía de los depósitos de bauxita de la Sierra de Bahoruco**

#### **Descripción petrográfica**

Se estudiaron 8 secciones delgadas pulidas y 3 probetas pulidas. Las secciones delgadas corresponden a las muestras: M-P4-1; M-P7-1; M-P8-2, M-P8-3, M-P8-4, M-P8-5; M-P9-1 y M-P11-1. Las probetas corresponden a las muestras M-P8-3, M-P8-4 y M-P8-5. Las descripciones de las muestras más carbonatadas (representativas del encajante) siguen un esquema en el cual se definen los componentes (esqueléticos y no esqueléticos), la porosidad (primaria y secundaria), los cementos y se les otorga un nombre según la clasificación de Dunham (1962). Mientras, las muestras más bauxitizadas han sido descritas siguiendo un esquema basado en características texturales y mineralógicas. Ésta se basa en la identificación de los componentes petrográficos (ooides, pisoides, clastos), la identificación de la matriz, la porosidad, los cementos y se le otorga un nombre en función de la textura dominante.

Como se puede observar en la figura 8 las muestras más carbonatadas corresponden al encajante de las bauxitas. En las muestras menos meteorizadas (figura 8a) se puede caracterizar el carbonato encajante de las bauxitas que corresponde a un wakestone de foraminíferos planctónicos y algún bentónico que no han sido identificados. Las imágenes b, c, d, e, f, g, h e i muestran texturas de meteorización mucho más avanzadas. En ellas se puede observar como la roca carbonatada, que al principio presentaba una porosidad primaria interparticular, va siendo remplazada por 31 oxihidróxidos

de hierro. Los oxihidróxidos de hierro forman concreciones esferulíticas de distintos tamaños (desde  $20\mu\text{m}$  hasta  $>250\mu\text{m}$ ) que se clasifican como ooides, pisoides o clastos en aumentar su tamaño.

En la mayoría de casos la porosidad secundaria vacuolar, o “vug”, que viene dada por la disolución de los carbonatos durante la bauxitización queda rellenada por cementos de calcita blocky (figura h). En otros casos, se observa como los clastos de carbonato primario quedan envueltos por un cemento ferruginoso y llegan a formar pisoides complejos como los de la figura f. La génesis de este tipo de rocas es muy compleja, ya que los ambientes de formación, las fracturas, la permeabilidad, el clima y la geomorfología de la zona condicionan mucho la textura final que se observan.

En algunos casos como los oolitos de oxihidróxidos de hierro pueden llegar a ser transportados y depositarse en bandas que luego quedan cementadas por carbonatos. En otros, como en la figura h, solo se observa principalmente aglomeraciones masivas de oxihidróxidos de hierro con fracturas rellenadas por calcita. Las figuras j, k y l corresponden a fotografías de las probetas estudiadas con microscopía de luz reflejada.

Estas muestras se han clasificado como bauxitas pues más del 80% de la roca está formada por oxihidróxidos de hierro y aluminio. En estas muestras se observa principalmente hematites y goethita formando pisolitos como en la Figura j. En la figura k se observa porosidad vacuolar y pisolitos complejos con un núcleo anguloso que va siendo redondeado por cementos tardíos de oxihidróxidos de hierro. La Figura l corresponde a una textura masiva formada por hematites y goethita.

## **Análisis y Discusión de los Resultados**

### **Clasificación geoquímica de los depósitos de bauxitas**

Presentando los datos de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  en un diagrama ternario, se puede clasificar el tipo de depósito de bauxitas y determinar el grado de laterización (Bardossy, 1982). Todas las muestras analizadas del depósito de Mercedes quedan situadas dentro de la zona de bauxita rica en hierro (iron-rich bauxite), excepto una (M-P9-1) que cae dentro del campo de bauxita arcillosa (clayey bauxite), esto debido a que corresponde a un carbonato (Fig. 18a y véase tabla 1).

### **Rocas madre (fuente) y bauxitización**

Si se representan los contenidos en zirconio (Zr), cromo (Cr) y galio (Ga), de las muestras del depósito de Mercedes en un diagrama ternario similar al utilizado por 45 .Ordóñez et al. (1990), se puede obtener datos relativos del carácter de la roca madre de las bauxitas de origen kárstico. Para la interpretación del mismo se ha elegido el zirconio (Zr) como elemento “propio” de rocas ácidas y/o intermedias, el cromo (Cr) de las rocas ultrabásicas y, el galio (Ga) es utilizado como un elemento relativamente neutro.

Insertando los campos correspondientes a las rocas ácidas, intermedias, básicas y ultrabásicas definidos por Özlü (1983), las muestras estudiadas quedan incluidas, en su mayoría, en el campo correspondiente a las rocas básicas y ultrabásicas (Fig. 19). Por ello se sostiene que el depósito de bauxitas de Mercedes situado en la Sierra de Batoruco al suroeste de la República Dominicana, se ha originado con influencia de una roca madre de composición básica o ultrabásica.

Se afirma que este depósito de bauxitas se originó bajo influencia de las rocas basálticas pertenecientes a la Formación Dumisseau, ya que son los únicos materiales volcánicos de composición basálticas presentes en toda la Península de Bahoruco (Pérez-Valera, 2010). Esta formación aflora en la Sierra de Bahoruco y continua hasta la Republica Haití, en el territorio dominicano esta aflora en núcleo de escala kilométrica, en anticlinales con rumbo NW-SE, esta formación por lo general ocupa zonas topográficamente deprimidas (Llinás, 1972; De León, 1989; Abad, 2010; Joubert, 2010; Pérez-Valera, 2010; Escuder-Viruet et al., 2016). La formación Dumisseau consiste en una secuencia con aproximadamente 1.5 kilómetros de espesor de coladas de basaltos y depósitos piroclastos, depósitos menores de sedimentos volcanogénicos e intrusiones doleríticas de diques y sills (Escuder-Viruet, 2010).

La petrografía principal observada en la Formación Dumisseau son basaltos olivínicos, basaltos con clinopiroxenos (augita rica en Ti), basaltos con orto y clinopiroxeno, basaltos andesíticos con plagioclasas y basaltos afaníticos (Escuder-Viruet, 2010). Esta formación fue cartografiada en las hojas de la Ciénega 5970-II, Polo, Enriquillo y La Salina, al noreste de la zona de estudio (Proyecto SYSMIN II-01B). (Fig. 1).

Según Escuder-Viruet et al., (2016), basado en el contenido de  $\text{TiO}_2$ , patrón multi-elementos y los valores de los coeficientes de elementos traza incompatibles, en la Formación Dumisseau se pueden identificar tres grupos geoquímicos de basaltos: los de bajo Ti las toleitas (grupo I); los de alto Ti o basaltos transicionales (grupo II); y basaltos alcalinos de altos Ti y enriquecidos en LREE (grupo III).

El grupo I está compuesto por flujos de basaltos y diques microgabroico/doleríticos, que tienen composiciones de magma primitivos o ligeramente fraccionadas ( $Mg\# = 66-49$ ). Para contenidos relativamente altos de  $MgO$ , el contenido de  $TiO_2$ , Zr y Nb es bajo (Escuder-Virue et al., 2016).

El grupo II está compuesto por lavas basálticas de transición, que tienen composiciones ligeramente fraccionadas ( $Mg\# = 57-52$ ). Para intervalos similares de  $MgO$ , el contenido de  $TiO_2$ , Zr y Nb son más altos que los del grupo I. El contenido de Cr, Ni y Th también son comparativamente altos. Los valores Nb/Y son típicos de magmas de transición (Escuder-Virue et al., 2016).

El grupo III contiene olivino, clinopiroxeno y plagioclasas en basaltos, que tienen composiciones moderadamente fraccionadas ( $Mg\# = 52-45$ ). Este grupo tiene los más altos contenidos de  $TiO_2$ , las lavas de este grupo presentan altos contenidos en Fe. Este grupo también presenta contenidos altos en  $CaO$ , que puede ser debido a la acumulación de plagioclasas en los magmas y / o a los procesos de carbonatación durante alteración tardía, tal como se sugiere por los valores alto de LOI. Cabe resaltar, que lo valores de Nb/Y son típicos de magmas alcalinos (Escuder-Virue et al., 2016). Los basaltos del grupo III presentan un fuerte enriquecimiento general en REE, así como un enriquecimiento relativo en LREE con respecto a MREE y HREE que mimetiza los patrones de REE normalizadas para basaltos que han sido mostrados en este proyecto.

## **Condiciones físico-químicas de formación de la mineralización de REE y, Factores que controlan la distribución de las REE.**

Analizando el diagrama de normalización a condritos C1 de las REE del depósito de Mercedes, se observa que el patrón representado en la gráfica para las distintas muestras del depósito de Mercedes es muy semejante. Además, los datos de geoquímicas se evaluaron mediante análisis de coeficiente de correlación. Correlacionando los datos de las tablas 1 y 6 para las muestras de bauxitas del depósito de Mercedes, queda claro que la formación de REE está relacionado con minerales como diáspora, goethita, anatasa, ilmenita, rutilo o minerales arcillosos (Wang et al., 2010).

Los minerales de REE tales como la cerianita formados durante la meteorización son unos excelentes indicadores de una atmósfera oxidante (Pan y Stauffer, 2000). Por lo tanto, condiciones de meteorización oxidante comúnmente favorece la formación de la misma (CeO<sub>2</sub>) (Akagi y Masuda, 1998; Braun et al., 1990, 1998; Mongelli, 1997).

Dos mecanismos que podrían acidificar el suelo son la lixiviación de la roca madre durante una etapa temprana y la lluvia ácida asociada a una actividad volcánica que habría afectado la biota de la tierra y la ecología, o la formación de los suelos gruesos y ácidos orgánicos asociados con el desarrollo de una extensa vegetación en un clima tropical (Öztürk et al., 2002). En lo que, la única actividad volcánica registrada en la Sierra de Bahoruco corresponde a la Formación Dumisseau; no obstante, el volcanismo en esta formación (Campaniense superior-Eoceno inferior; Escuder-Viruete et al., 2016) fue muy anterior a la formación de las

bauxitas (Plioceno-Holoceno; Pérez-Valera, 2010). Por tanto consideramos que la afectación por acidificación asociada a volcanismo debe ser descartada en el caso de la bauxitización en el depósito de Romero.

En general, la meteorización de los minerales de la roca madre causa movilización de los elementos y fraccionamiento de LREE y HREE, de Ce y/o Eu (Hill et al., 2000; Ji et al., 2004; Karadağ et al., 2009; MacLean et al., 1997; Patino et al., 2003) citados por Li et al. (2013). Por lo tanto, los REE se liberan de los minerales primarios y son adsorbidos por ó sobre todos los tipos de minerales y asociaciones amorfas de las superficies durante el proceso de caolinización y lateritización (Karadağ et al., 2009).

El pH es el parámetro dominante para la movilidad de los REE. Bajo condiciones acidas, los REE son fácilmente removidos del material meteorizado, y los mismos precipitan bajo condiciones neutras o alcalinas (Fleet, 1984; Karadağ et al., 2009; Nesbitt, 1979).

La relación La/Y puede utilizarse como un juicio para determinar el carácter ácido o básico del medio de sedimentación, enunciación expuesta por Zuk-Pocikutov et al. (1986) y modificada por Crnicki (1987) y citada en Crnicki y Jurkovic (1989). De 50 acuerdo a estos autores, relaciones de La/Y superiores a uno indican un medio de deposición alcalino, mientras que valores de esta relación inferiores a uno indican un medio de sedimentación ácido (Ordóñez et al., 1990). Observando los datos de esta relación para las muestras del depósito de Mercedes, todos están por debajo de la unidad, caracterizando el medio de sedimentación en que se originó el mismo en un medio ácido.

De acuerdo a Ordóñez et al., (1990), la anomalía de europio puede interpretarse en relación con el carácter heredado, o bien en relación con la reducción del  $\text{Eu}^{+3}$  a  $\text{Eu}^{+2}$ , hecho éste que puede tener lugar bajo condiciones moderadamente reductoras. En la tabla 6 se observa que estos valores son muy similares. Si representamos en un diagrama binario la relación  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  con la de  $\text{La}/\text{Y}$ , lo que podría representar una representación Eh-pH del medio de sedimentación, si se observa la figura 21 casi en su mayoría las muestras del depósito el Mercedes tantos las muestras de bauxitas como de carbonatos-bauxitas caen en la zona I, por lo que se sugiere que el depósito de Mercedes se originó en un medio ácido y moderadamente reductor durante su proceso de meteorización.

### **Interpretación de la morfología de los patrones de REE y su significado genético**

El patrón de normalización de REE a condritos de las bauxitas de Mercedes muestra un enriquecimiento en LREE y un empobrecimiento en HREE con respecto a Condritos C1. Igualmente, se puede destacar la existencia de una depresión en los contenidos relativos en europio en prácticamente todas las muestras, depresión que suele caracterizar un ambiente reductor, datos que corroboran la información obtenida por las relaciones  $\text{La}/\text{Y}-\text{Eu}/\text{Eu}^*$  representada en un diagrama binario (fig. 21). Esta anomalía positiva en cerio se puede deber a los contenidos de cerianita en las muestras estudiadas de este depósito (fig. 15b). La presencia de este mineral de Ce, se representa en la morfología del patrón de REE e induce la clara anomalía positiva de este elemento en el depósito (Mongelli, 1997; Wang et al., 2010).

Estudios anteriores han planteado que la anomalía de Eu se origina durante una intensa meteorización (Mameli et al, 2007; Mongelli, 1997), información que se corrobora con las obtenidas en la figura 18b. No obstante, se revela que los minerales de tierras raras estudiados en este trabajo contienen pequeñas cantidades de Sm, y poco Eu, lo que significa un pequeño fraccionamiento entre el Sm, y el Eu y, por lo tanto, la anomalía de Eu puede cambiar suavemente durante la formación del mineral (Wang et al., 2010).

De igual forma, existe una depresión en los contenidos relativos en cerio, pero, todas las muestras del depósito de Mercedes presentan anomalías positivas en dichos elementos (tabla 6). Además hay que hacer notar, que al igual que sucedía con los elementos 52 mayores, menores y trazas, en las tierras raras se observa una alta correlación en todas las muestras del depósito.

Si se observan los diagramas de correlación REE, LREE y HREE frente los elementos mayores (fig. 12-14) y, se relacionan con los datos de las tablas 1 y 6, se puede concluir que el enriquecimiento en REE está relacionado con minerales como diáspora, goethita, anatasa, ilmenita, rutilo o minerales arcillosos (Wang et al., 2010).

### **Potencialidad de las bauxitas como una fuente no-convencional de REE.**

Generalmente las bauxitas se consideran como una fuente potencial de REE. Esto es en parte porque el aluminio y el galio extraído de bauxita parecen ser más importantes y, en parte porque el contenido de metales

raros de bauxita no ha sido suficientemente estudiado y no se encuentran en todas las bauxitas (Klyucharev et al., 2013).

De acuerdo a la investigación realizadas por Ordoñez et al. (1990) en las bauxitas kársticas del Noreste de la Península Ibérica en esta se encontraron valores de  $\Sigma$ REE de 698.67 ppm y 512.36 ppm, con promedio de  $\Sigma$ REE de 286.55 ppm. Por su lado, Karadag et al. (2009) en la bauxita de Mortas (al sur de Turquía) determinó que los contenidos en  $\Sigma$ REE de las muestras estudiadas de este depósito, excepto la piedra caliza de Katrangedigi tienen promedios de 54.6ppm variando entre 282 y 986 ppm.

Además, Bonig et al. (2013) en sus estudios sobre los depósitos de bauxitas kársticas en el sur de Apeninos, en Italia mostraron un contenido total de REE de 1,454 ppm, y un promedio en todos los depósitos de bauxitas, con valores de 550 ppm del total de REE en la parte superior del perfil de Regia Piana. El contenido de LREE (La-Eu) en las 53 muestras, varían entre 200 y 1,400 ppm, y el contenido de HREE (Gd-Lu) están siempre cerca de 40 a 80 ppm.

De modo, que si se comparan las concentraciones obtenidas en las muestras de bauxitas estudiadas del depósito de Mercedes con estos depósitos de bauxitas, se puede notar que estas tienen valores relativamente altos ( $\Sigma$ REE = 977.5 - 1159.97 ppm) con respecto a los encontrados por estos investigadores en los otros depósito de bauxitas; para un promedio (de 1079.50 ppm) valores superiores a los encontrados por Ordoñez et al. (1990) y a los encontrados por Karadag et al. (2009).

Como se muestra en los resultados obtenidos en esta investigación el depósito de bauxita de Mercedes presenta contenidos importantes de tierras raras muy superiores a los de otros depósitos de bauxitas, por lo que esta puede ser considerada como una potencial fuente no-convencional de REE.

## Conclusiones

Los datos de tierras raras y de elementos trazas indican que el depósito de bauxitas de Mercedes se originó a partir de roca madre de composición básicas o ultrabásicas. Las principales fases portadoras de REE en las bauxitas del depósito de Mercedes, corresponden a monacitas, con cristales semi-euhedrales y óxidos de tierras raras (principalmente cerianita). Por los datos adquiridos con la relaciones La/Y y la anomalía de Eu/Eu\*, se determina que el depósito de bauxitas de Mercedes se formó bajo condiciones ácidas y moderadamente reductoras.

De acuerdo con los datos obtenidos por geólogos chinos, cortezas de meteorización con contenidos de REE de 500 ppm (g/t) son viables económicamente (Bao y Zaho, 2007; Klyucharev et al., 2013). De modo que los datos de REE obtenidos en esta investigación (tabla 6), son superiores a los 500 ppm, se determina que el depósito de bauxita de Mercedes se considera como una fuente no-convencional de REE.

## Referencias

Abad, M.,( 2010). Mapa Geológico de la Hoja a E. 1:50.000 n° 5969-I (Enriquillo) y Memoria correspondien-

- te. Proyecto 1B de Cartografía Geotemática de la República Dominicana. Programa SYSMIN. Dirección General de Minería, Santo Domingo. (202 pp.).
- Akagi, T., Masuda, A., (1998), A simple thermodynamic interpretation of Ce anomaly. *Geochemical Journal*, v. 32, p. 301–314.
- Bao, Z., and Zhao, Z., (2007), Geochemistry of mineralization with exchangeable REY in the weathering crusts of granitic rocks in south China: *Ore Geology Reviews*, v. 33, p. 519–535.
- Behar, D., (2008), *Introducción a la Metodología de la Investigación*: Editorial Shalom, p.40.
- Braun, J.J., Viers, J., Dupré, B., Polve, M., Ndam, J., Muller, J.P., (1998), Solid/liquid REE fractionation in the lateritic system of Goyoum, East Cameroon: the implication for the present dynamics of the soil covers of the humid tropical regions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 62, 273–299.
- Braun, J.J., Pagel, M., Muller, J.P., Bilong, P., Michard, A., Guillet, B., 1990, Cerium anomalies in lateritic profiles. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 54, p. 781–795.
- Bonig, M., Rollinson, G., Mondillo, N., Balassone, G., Santoro, L., 2013, Quantitative Mineralogical Characterization of Karst Bauxite Deposits in the Southern Apennines Italy, *Society of Economic Geologists, Inc: Economic Geology*, v. 108, p. 813–833.
- Boynton, W.V., (1984), Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: Henderson, P. (Ed.), *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, p. 63–114.

- Crnicki, J., (1987), Lanthanides in Bauxites of Croatia and their Significance in the genetical interpretation. Tesis, Uni. Zagreb, p. 180.
- De León, R.O., (1989), Geología de la Sierra de Bahoruco (República Dominicana): Museo Nacional de Historia Natural, Santo Domingo, p. 112.
- Dmitry S. Klyucharev, Nataliya M. Volkova, Mikhail F. Comyn, 2013, The problems associated with using non-conventional rare-earth minerals: Institute of Mineralogy, Geochemistry, and Crystal Chemistry of Rare Elements (IMGRE) of MNRE RF, Moscow, Russia, Journal of Geochemical Exploration, v. 133, p.138–148.
- Dunham, R.J., (1962), Classification of Carbonate Rocks According to Depositional Texture. In, W.E. Hamm (Ed.), Classification of Carbonate Rocks, A Symposium. American Association of Petroleum Geologists, p. 108-121.
- Escuder-Virujete, J., Joubert, M., Abad, M., Pérez-Valera, F., Gabites, J., 2016. The basaltic volcanism of the Dumisseau Formation in the Sierra de Bahoruco, SW Dominican Republic: A record of themantle plume-related magmatism of the Caribbean Large Igneous Province, Lithos, v. 254–255, p. 67–83.
- Escuder-Virujete, J., (2010). Mapa Geológico de la República Dominicana E. 1:50.000.
- Informe (Parte 1) de Petrología de Rocas Ígneas y Metamórficas, Hojas de Polo, La Ciénaga, Enriquillo, Sabana Buey y Nizao. Dirección General de Minería, Santo Domingo, p. 33.
- Fleet, A.J., (1984), Aqueous and sedimentary geochemistry of the rare earth elements. In: Hendersonm, P. (Ed.), Rare Earth Element Geochemistry. Elsevier, p. 343–373.

- Foley, N.K., De Vivo, B., Salminen, R., (2013), Rare Earth Elements: The role of geology, exploration, and analytical geochemistry in ensuring diverse sources of supply and a globally sustainable resource *Journal of: Geochemical Exploration*, v. 133, p. 1–5.
- Freyssinet Ph, Butt C.R.M., Morris, R.C., (2005), Ore-forming processes related to lateritic weathering: *Economic Geology 100th Anniversary*, p. 681–722.
- Hernández, R., Fernández, C., Baptista, P., (2003), *Metodología de la investigación: tercera edición*, Mc Graw Hill, p. 188.
- Hill, I.G., Worden, R.H., Meighan, I.G., 2000, Geochemical evolution of a palaeolaterite: the Interbasaltic Formation, Northern Ireland. *Chemical Geology*, v. 166, p. 65–84.
- Horbe, A., and Costa, M., (1999), Geochemical evolution of a lateritic Sn–Zr–Th–Nb–Y–REE bearing ore body derived from apogranite the case of Pitanga, Amazonas—Brazil: *Journal of Geochemical Exploration*, v. 66, p.339–351.
- Horvath, L., y Peter, Z., (1984), Geochemical Investigations of the Iharkut bauxite. *Travaux*, v. 14-15, p. 101–116.
- Ji, H.B., Wang, S.J., Ouyang, Z.Y., Zhang, S., Sun, C.X., Liu, X.M., Zhou, D.Q., (2004), Geochemistry of red residua underlying dolomites in karst terrains of Yunnan–Guizhou plateau: II. The mobility of rare earth elements during weathering. *Chemical Geology*, v. 203, p. 29–50.
- Joubert, M., (2010). Mapa Geológico de la Hoja a E. 1:50.000 n° 5970-II (La Ciénaga) y Memoria correspondiente. Proyecto 1B de Cartografía Geotemática de la República Dominicana. Programa SYS-

- MIN. Dirección General de Minería, Santo Domingo, v. 202.
- Karadag, M.M., Kupeli, S., Arýk, F., Ayhan, A., Zedef, V., Doyen, A., (2009), Rare earth element (REE) geochemistry and genetic implications of the Mortas bauxite deposit(Seydisehir/Konya – Southern Turkey): *Chemie der Erde*, v. 69, p. 143–159.
- Klein, C., Hurlbut, C. S., (1959,) .*Manual de Mineralogía*: 2da edición. Editorial Reverté, S. A. p. 239-521.
- Li, Zaihui., Din, Jun., Xu, Jinsha., Liao, Chaogui., Yin, Fuguang., L, Tao., Cheng, Li., Li,Junmin.,( 2013) . Discovery of the REE minerals in the Wulong–Nanchuan bauxite deposits Chongqing, China: Insights on conditions of formation and processes. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 133, p. 88–102.
- Maksimovic, Z., y Roaldset, E., 1971, Lanthanide Elements in some Mediterranean karstic bauxite deposits: *Travaux*, v. 13, p. 199-220.
- Mameli, P., Mongelli, G., Oggiano, G., Dinelli, E., (2007). Geological, geochemical and mineralogical features of some bauxite deposits from Nurra (Western Sardinia, Italy): insights on conditions of formation and parental affinity. *International Journal of Earth Sciences*, v. 96, p. 887–902.
- Maurasse, F.J. M., G., Husler, J., Georges, G., Schmitt, R., Diamond, P., (1979), Upraised Caribbean sea-floor below acoustic reflector B'' and the Southern Peninsula of Haiti. *Geologie en Mijnbouw*, v. 8, p. 71-83.
- MacLean, W.H., Bonavia, F.F., Sanna, G., (1997), Argillite debris converted to bauxite during karst weathering: evidence from immobile element geoche-

- mistry at the Olmedo Deposit, Sardinia. *Mineralium Deposita*, v. 32, p. 607–616.
- Meschede, M., 1986, A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. *Chemical Geology*, v. 56, p. 207–218.
- Mordberg, L.E., Stanley, C.J., Germann, K., (2000), Rare earth element anomalies in crandallite group minerals from the Schugorsk bauxite deposit, Timan, Russia: *European Journal of Mineralogy*, v. 12, p. 1229–1243.
- Nesbitt, H.W., (1979), Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering of a granodiorite. *Nature*, v. 279, p. 206–210.
- Nelson, C.E., Proenza, J.A., Lewis, J.F., Lopez-Kramer, J., (2011), The metallogenic Evolution of the 409 Greater Antilles: *Geologica Acta*, v. 9, p. 229–264.
- Ordóñez S., (1987), Investigación de menas aluminosas del Noreste de España. ITGE, Madrid (inédito).
- Oti, M. N., (1987), Geochemical and textural characterization of laterites of Southeastern Nigeria. *Chem. Geol.*, v. 60, p. 63–72.
- Öztürk, H., Hein, J.R., Hanilçi, N., (2002). Genesis of the Doğankuzu and Mortaş bauxite deposits, Taurides, Turkey: separation of Al, Fe, and Mn and implications for passive margin metallogeny. *Economic Geology*, v. 97, p. 1063–1077.
- Patino, L.C., Velbel, M.A., Price, J.R., Wade, J.A., (2003), Trace element mobility during spheroidal weathering of basalts and andesites in Hawaii and Guatemala. *Chemical Geology*, v. 202, p. 343–364.
- Pearce, J.A., (1996), A user's guide to basalt discrimination diagrams. In: Wyman, D. A.

- (Eds.), Trace element geochemistry of volcanic rocks; applications for massive sulphide exploration. Geological Association of Canada, Short Course Notes, v. 12, p. 79-113.
- Pérez-Valera, F., Abad, M., (2010). Informe Estratigráfico y Sedimentológico. Proyecto De Cartografía Geotemática de la República Dominicana. Programa SYSMIN, Proyect 1B. Consorcio IGME-BRGM-INYPSA. Dirección General de Minería, Santo Domingo (168 pp.).
- Pindell J.L., Draper G., (1991), Stratigraphy and geological history of the Puerto Plata area, northern Dominican Republic. In: Geologic and tectonic development of the North America-Caribbean plate boundary in Hispaniola (Mann P., Draper G., Lewis J.F. Eds.), Geological Society of America Special Paper, v. 262, p. 97-114.
- Price, G.D., Valdes, P.J., Sellwood, B.W., (1997), Prediction of modern bauxite occurrence: implications for climate reconstruction. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 131, p. 1 - 13.
- Schellman, W., (1986,) A new definition of laterite. In: Banerji, P.K. (Ed.), *Lateritisation Processes*. Geological Survey of India Memoir, v. 120, p. 11-17.
- Tuo, B., Wang, J.L., Qin, Z., (2007), Occurrence and utilization of rare earth element in bauxite: Chinese Rare Earths, v. 28, p. 117-119.
- Van Den Berghe, B., (1983), Evolution sédimentaire et structurale depuis le Paléocène du secteur "Massif de la Selle-Barouco-Nord de la Rive de Beata" dans l'orogène nord Caraïbe (Hispaniola Grandes Antilles). Thèse de doctorat, Université Marie y Pierre Curie, Paris, p. 205.

- Wagh, A.S., Pinnock, W.R., (1987), Occurrence of scandium and rare earth elements in Jamaican bauxite waste: *Economic Geology* v. 82: p. 757–761.
- Wang, Y.X., Li, H.M., Yang, J.D., Qiu, L.W., Chai, D.H., Chen, P., (2000,) Discovery of palaeoweathering type rare and rare earth element deposits in Northern China and its significance *Geological: Journal of China Universities*, v. 6, p. 605–607.
- Winchester, J.A., and Floyd, P.A., (1977), Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements: *Chemical Geology*, v. 20, p. 325–343.
- Wood, D. A., (1980), The application of a Th-Hf- Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal Planetary Science Letters, v. 50, p. 11–30.
- Yang, J.C., Wang, F.L., Li, D.S., Fei, Y.C., Wang, L., (2004), Investigation on occurrence and trend of rare and rare-earth elements associated in bauxite: *Mining and Metallurgy*, v. 13, p. 9–92.
- Ye, X., Paroo, Z., Liu, Q. (2007). Functional anatomy of the *Drosophila* MicroRNA-generating enzyme: *J. Biol. Chem*, v. 282(39), p. 28373–28378.
- Zaihui Li, Jun Din, Jinsha Xu, Chaogui Liao, Fuguang Yin, Tao Lu, Li Cheng, Junmin Li., (2013), Discovery of the REE minerals in the Wulong–Nanchuan bauxite deposits, Chongqing, China: Insights on conditions of formation and processes. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 133, p. 88–102.
- Zuk-Pocutov, K. A.; Serdobova, L. J.; Kataeva, Z. T.; Andraeva, J. P.; Rjabova, T. V., Y Lagunova, E. V., (1986), REE in anhydrites of the Kacharskaye iron-ore deposit *Geochimija*, v. 5, p. 630–635.