

El mineral laterítico, fuente potencial de materia prima para la industria de componentes electrónicos



The lateritic ore as potential source of matter prevails for the industry of electronic components

<https://cu-id.com/2144/v15e02>

Ramón Eddie Peña Abreu*, Miladys Aróstegui, Maricela Ortiz Paradelo

RESUMEN: El aprovechamiento racional de los recursos mineros, la búsqueda de nuevas formas de empleo de los residuales en las empresas mineras cubanas, es una tarea inconclusa. En la industria del níquel los materiales ameníferos, se acumulan en escombreras, se debe encontrar un modo de aprovecharlos que permita fomentar nuevos productos a partir de ellos. Es posible encontrar en los yacimientos lateríticos materia prima para el desarrollo de nuevos materiales y en específico para la electrónica. Lo anterior se enmarca en los programas que buscan la soberanía tecnológica, el cambio de la matriz energética del país y el empleo de fuentes renovables de energía. En la última década se han intensificado las investigaciones, para determinar la presencia de tierras raras y elementos del grupo del platino en estos yacimientos, lo que le añadiría valor a los productos de nuestra industria extractiva. Las investigaciones apuntan a que los óxidos de Fe, Mn y otros componentes del perfil laterítico contienen dichos elementos, por lo que son atractivos para el desarrollo de materiales para la electrónica, entre ellos, electrodos híbridos compuestos de la combinación de óxidos metálicos. Sin embargo, no se conoce con precisión cuales de los óxidos que componen el perfil laterítico, dopados de tierras raras o de platinoides, pueden ser empleado para estos fines. Se propone investigar, a partir del conocimiento existente, las posibles aplicaciones del mineral laterítico en la producción de materiales especiales que puedan servir para la industria electrónica u en otras aplicaciones.

Palabras clave: Mineral laterítico, industria de componentes electrónicos.

ABSTRACT: The rational use of mining resources, the search for new forms of employment for residual materials in Cuban mining companies, is an unfinished task. In the nickel industry, non meniferous materials accumulate in artificial deposits, a way must be found to take advantage of them that allows promoting new products from them. It is possible to find raw material for the development of new materials and specifically for electronics in lateritic deposits. This is part of the programs that seek technological sovereignty, the change in the country's energy matrix and the use of renewable energy sources. In the last decade, research has intensified to determine the presence of rare earths and elements of the platinum group in these deposits, which would add value to the products of our extractive industry. Research indicates that the oxides of Fe, Mn and other components of the lateritic profile contain these elements, which is why they are attractive for the development of materials for electronics, including hybrid electrodes made from the combination of metal oxides. However, it is not known precisely which of the oxides that make up the lateritic profile, doped with rare earths or platinoids, can be used for these purposes. It is proposed to investigate, based on existing knowledge, the possible applications of the lateritic mineral in the production of special materials that can be used for the electronics industry or in other applications.

Keywords: Lateritic ore, industry of electronic components.

INTRODUCCIÓN

El producto residual de la meteorización (PRM) presente en los yacimientos del oriente cubano, es una amalgama de minerales (Rojas, Orozco, Vera *et al.* 2005; Freyssinet, Butt & Morris, 2005). Se conoce su composición por las investigaciones mineralógicas, fundamentalmente realizadas para la industria

extractiva de Ni y Co (Ageyi, Beyris, Rojas *et al.*, 2010; Ageyi y Beyris, 2011). Esta emplea un modelo de clasificación simple del PRM, porque solo incluye una de las variables que explican la génesis de estos yacimientos (Fe, SiO₂, MgO y Al₂O₃), este se construye sobre criterios tecnológicos (hierro y el níquel), se le denomina clasificación tecnológica de las menas (CTM).

Recibido: 11/12/2022

Aprobado en su forma original: 05/04/2023

Centro de Investigaciones para la Industria Minero-Metalúrgica, Carretera Varona No. 12028, km 1½, Boyeros, La Habana, Cuba. E-mail: miladys@cipimm.minem.cu, maricela@cipimm.minem.cu

*Correo electrónico: ramoneddiepena@gmail.com

Conflicto de Intereses: Los autores de este trabajo declaran que no existe conflicto de intereses.

Contribuciones de los autores: **Gestión de Proyecto:** Ramón Eddie Peña Abreu, Maricela Ortiz Paradelo. **Metodología:** Ramón Eddie Peña Abreu. **Investigación:** Ramón Eddie Peña Abreu, Miladys Aróstegui. **Redacción:** primera redacción: Ramón Eddie Peña Abreu. **Análisis formal:** Ramón Eddie Peña Abreu, Miladys Aróstegui

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

La complejidad del producto residual generado por la meteorización (PRM), se profundiza en varias investigaciones, en concuerdan en la gran dispersión geoquímica y mineralógica (Rojas Purón, 2001; Lewis *et al.*, 2006; Proenza, Galí, Labrador *et al.*, 2011; Llanes Castro, 2009). Según Vera Sardiñas *et al.* (2001) la mayor complejidad se manifiesta en la vertical, lo que genera diferentes zonas en el perfil. En la dirección horizontal se observan variaciones menores, desde la perspectiva de los modelos Kriging, los modelos probabilísticos expresan otro criterio, consideran ambas variaciones del mismo orden, lo que es sencillo notar cuando se analiza la proporción de las dimensiones en que se producen (Peña, 2015 y 2016).

Más de la mitad del PRM no es mena para ninguna de las tecnologías extractivas instaladas en Cuba, este material se acumula en escombreras, aún no se ha encontrado como emplearlas, entre otras causas porque no se conocen todas sus propiedades, ni se ha estudiado la posibilidad de sustituir o producir con ellos los materiales empleados en diversas aplicaciones industriales. Son minerales polimetálicos con un alto contenido de óxidos e hidróxidos de Fe, Mn, Cr y Al (Proenza, Roque, Labrador *et al.* 2011). Se ha determinado en estos óxidos la presencia de elementos de las tierras raras (ETR) y del grupo del platino (EGP) (Roque, Proenza, Mosselmans *et al.*, 2008; Peña, 2016; Peña, Cala, Capote *et al.*, 2017; Legrá y Cala, 2019). Este hecho los vuelve atractivos para su empleo en la industria electrónica.

La relación de la granulometría con la composición química y mineralógica armoniza con la génesis del PRM en estos yacimientos, por lo que es necesario analizar detenidamente su génesis, los procesos químicos que sucedieron en ellos, sus componentes y propiedades (Ortoleva, Merino, Moore *et al.* 1987 a y b; Putzolu, Santoro, Porto *et al.*, 2021).

Se ha planteado el objetivo de establecer, a partir del estado del arte, la posibilidad de emplear los minerales presentes en el PRM, con fines diferentes a la producción de níquel y cobalto, orientado a la producción de materiales especiales para la industria de las nuevas tecnologías. Se estima que si analiza la bibliografía desde una perspectiva multidisciplinaria, entonces se podrá conocer si es viable realizar investigaciones con estos minerales para obtener materiales especiales.

Se traza como estrategia, la búsqueda en las principales revistas y compilaciones de eventos, tesis doctorales, de maestría y trabajos de fin de carrera, todo lo que se relacionan con la génesis del PRM, composición, mineralogía, sus propiedades físicas, de los ETR y los EGP asociados a sus materiales, así como, la producción de nanomateriales (Il-Hwan, Jae-Hong, Young-Ho y Kwang-Bum, 2005) y materiales especiales para la industria electrónica.

Tabla 1. Elementos de las tierras raras

Nº	ETR	Clarke	Nº	ETR	Clarke
1	Ce Cerio	66,5	10	La Lantano	39
2	Dy Disproso	5,2	11	Lu Lutecio	0,8
3	Er Erblio	3,5	12	Nd Neodimio	41,5
4	Sc Escandio	22	13	Pr Praseodimio	9,2
5	Eu Europio	2	14	Pm Prometeo	-
6	Gd Gadolinio	6,2	15	Sm Samario	7,05
7	Ho Holmio	1,3	16	Tb Terbio	1,2
8	Yb Iterbio	3,2	17	Tm Tulio	0,52
9	Y Itrio	33			

MATERIALES Y MÉTODOS

Análisis del contexto para el empleo de las lateritas en materiales de la industria electrónica

Los componentes eléctricos y electrónicos de las máquinas modernas están compuestos por materiales de procedencia mineral, la mayoría se obtienen bajo síntesis o procesamiento industriales a partir de minerales, por ello el conocimiento del contexto sobre la producción de estos materiales, debe ser investigado desde una perspectiva multidisciplinaria.

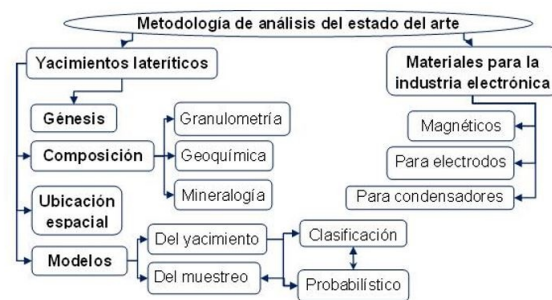


Figura 1. Relación entre las disciplinas que se involucran en el análisis del contexto.

En la *fig. 1* se ha esquematizado la forma en que se relacionan las disciplinas que se involucraron en la investigación. Se estableció a partir del análisis de las fuentes primarias y secundarias, las relaciones entre las diferentes disciplinas que aportan conocimientos para el entendimiento de la composición de los materiales y las propiedades que lo hacen útiles a las aplicaciones. Se analizó la aplicación de los minerales lateríticos como materiales para producir componentes de la industria electrónica, se describen las particularidades de los yacimientos y las propiedades conocidas de sus minerales.

Se examina el estado del conocimiento acerca de los materiales que se emplean en la industria electrónica, para determinar cuáles pueden estar presentes en el producto residual de la meteorización, de los yacimientos lateríticos cubanos.

El esquema empleado para análisis del estado del conocimiento que determina la posibilidad de investigar el empleo del PRM en los yacimientos lateríticos para producir materiales especiales en la industria electrónica se expone en la fig. 2.

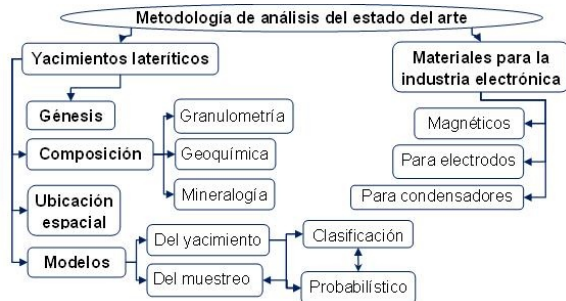


Figura 2. Metodología para establecer el estado del arte.

ANÁLISIS AL ESTADO DEL ARTE

Los yacimientos cubanos de níquel presentan una composición variada de óxidos e hidróxidos de Fe, así como, materiales silicatados y otras combinaciones de óxidos de Al, Cr y Mg, en formas cristalinas y otras amorfas, a todas ellas se asocian los EGP y ETR (Gaudin, Grauby, Noack *et al.* 2004; Galí, Proenza, Labrador *et al.*, 2006; Gallardo, Tauler, Proenza *et al.*, 2010). Por esta razón es necesario el conocimiento de los modelos que describen y clasifican su composición. Los modelos aportan las propiedades resumidas de los yacimientos y sirven para establecer la ubicación y concentración de los materiales.

Modelos más comunes del perfil de meteorización

Las clasificaciones que se realizan a los minerales constituyen modelos, cuando se especifican criterios para un tipo de yacimiento el modelo describe las propiedades desde la perspectiva de los criterios elegidos. Dos clasificaciones del perfil laterítico se encuentran con frecuencia en la literatura, la primera la exponen Mike y Elias (2001 a y b), se fundamenta en criterios geoquímicos y mineralógicos en específico el Hierro y el Magnesio, propone de cuatro zonas que yacen sobre la roca madre. La segunda asume la existencia de seis zonas, tiene en cuenta además la génesis, la morfología, las propiedades

estructurales y propiedades físicas, como la masa volumétrica, la humedad natural, la granulometría, la resistencia a la compresión, la estabilidad de sus taludes bajo carga y en estado libre, se expone en Lavaut (2005), de ella se ha introducido una actualización (Lavaut, 2018), ambas se exponen en la tabla 2. Se simplifica a dos zonas, de lateritas y de saprolitas. Otros modelos se han desarrollado por Muñoz, Rodríguez y Martínez (2009) y Muñoz, Rodríguez y Barea (2015).

La actualización de Lavaut (2018) en un Sistema Jerárquico de Clasificación de las Rocas de la Meteorización, es consenso con otros sistemas de clasificación adoptados por la Unión Internacional de Ciencias Geológicas, según Lavaut (2018) es el primero en Cuba y en el mundo para establecer un sistema lexicográfico de las rocas meteorizadas. Consta de cinco niveles que contienen las regularidades litológicas, geoquímicas y mineralógicas del surgimiento de las intemperitas. Tiene una convergencia con el anterior, por lo que permite relacionarlas y realizar las interpretaciones necesarias, esta relación se puede encontrar en el tercer campo de la tabla 2.

Peña y Vera (2013) han introducido un modelo de clasificación multivariada del PRM, empleado en algunos trabajos (Fernández y Peña 2019; Fernández, 2021; Peña y Fernández, 2021), se le ha denominado tipos del comportamiento geoquímico (TCG), se fundamenta en la geoquímica y se han caracterizado las propiedades físicas y las mineralógicas de cada tipo, también su comportamiento metalúrgico a escala de banco y piloto.

Análisis de la zona de Laterita

Existen numerosos trabajos que abordan la geoquímica y la mineralogía del perfil laterítico (Eliás, 2001; Lavaut, 2018). La fig. 3 resume la composición química de las zonas del perfil laterítico del oriente cubano (PLOC). Según Rojas (2001) la goethita y la hidrogoethita constituyen las fases más abundantes en el perfil laterítico, se le imputa el mayor aporte de Ni. Expresa que se concentra en la fracción menor de 45 μk , la que representa más del 50 % de la masa y que la fracción menor que 74 μk solo representa cerca del 6 % y aporta espinelas con altos valores de Ni, mientras que las fases no

Tabla 2. Clasificación de las lateritas cubanas Según Lavaut, 2005 -2018.

Zonas	Descripción (Lavaut, 2005)	Código	Lavaut, (2018)
1	Ocres inestructurales con perdigones.	OICP	Laterita nodular
2	Ocres inestructurales.	OI	Laterita no nodular
3	Ocres estructurales finales.	OEF	Saprolita fina limonítica
4	Ocres estructurales Iniciales.	OEI	Saprolita fina arcillosa
5	Roca madre lixiviada.	RML	Saprolita gruesa
6	Roca madre alterada.	RMA	Saproca

portadoras de este elemento son las hematitas y las gibbsitas. Pérez, Proenza y Lavaut (2007) profundizaron en el estudio mineralógico de la zona laterítica, definieron además de la goethita, a la maghemita y la Litioforita como portadoras, no solo de NiO, sino también de CoO, esta última fase de Mn es la principal en contenido de Ni y Co. Otros autores incluyen en esta zona a la willemseita, las cloritas y las asbolanas, confirman además que esta última es la mayor aportadora de Co y se pueden encontrar otros minerales de manganeso como la pirolusita y el psilomelano (Muñoz, Orozco, Rojas *et al.* 2005; Labrador *et al.*, 2006; Pérez, Proenza y Lavaut, 2007; Proenza, Roque, Labrador *et al.*, 2011; Pérez Sánchez, 2013).

Agyei, Rojas y Hernández (2010) afirman que en las lateritas hay más de un tipo de goethita, que se diferencian por su grado de cristalinidad, lo que es producto del proceso de alteración de los óxidos de Fe propios del PRM laterítico, que se refleja en la paragénesis de la goethita-hematita. Otros autores informan que en la goethita aparece un elevado contenido de Al, debido a la sustitución del Fe por este elemento en su red cristalina, se considera un fenómeno común entre los óxidos de Fe en un ambiente oxidante, en presencia de silicatos e hidróxidos de Al (Schwertmann *et al.*, 2000 a y b).

En (Peña, Cala, Capote *et al.*, 2017) se estudia la composición mineralógica del PRM desde otra perspectiva, en la zona de lateritas se confirma la presencia de Goethita. La gibbsita fue detectada en todas las clases que corresponden con la zona de lateritas en los análisis de difracción de DRX, según Galí, Proenza, Labrador *et al.* (2007) es un producto de la alteración de los cuerpos de gabro, de la plagioclasa menos soluble en la roca madre.

Aiglsperger (2015) aporta sobre esta zona una información similar a la expuesta por Rojas (2001), añade que localmente algunos granos de goethita muestran reemplazo por hematites, que la maghemita es ligeramente más abundante hacia la parte más baja de esta, mientras que la hematita es dominante en la parte superior. Explica que en el nivel inferior de esta zona aparecen vetas y revestimientos o concreciones, a lo largo de las fracturas, acumulaciones de óxidos de Mn, Co y Ni, principalmente minerales intermedios de litioforita, asbolana rica en Al, litioforita y asbolana. Afirma que la espinela cromífera es una fase mineral menos abundante en zona superior. informa que los elementos de las tierras raras (ETR), del grupo del platino (EGP) y el Sc, a los que denomina minerales críticos, se concentran hacia la superficie en zonas específicas, los ETR en minerales enriquecidos sobre horizontes arcillosos y dentro de zonas compuestas de óxidos secundarios de Mn; el Sc dentro de zonas ricas en óxidos de Fe y Mn. Los EGP en los niveles superiores del perfil laterítico, en zonas con altas

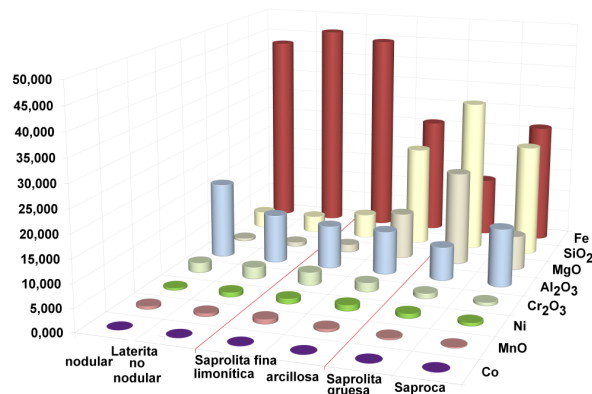


Figura 3. Composición química en la zona laterítica del perfil según la exploración detallada.

concentraciones de espinela cromífera y óxidos de Fe y Mn. Explica que el enriquecimiento de estos metales se debe a una meteorización intensa, a los fenómenos de transporte en condiciones de variación de Eh y pH que favorecen las condiciones químicas para la precipitación y por la interacción entre la biosfera y los suelos limoníticos donde ocurren procesos de neoformación.

Análisis de la zona de saprolitas

En la fig. 3 se resume la composición química de las zonas del PLOC, desde la perspectiva de los horizontes de Lavaut (2018). Muñoz, Orozco, Rojas *et al.* (2005) y Galí *et al.* (2006) valoraron la migración geoquímica de los elementos en las menas lateríticas, determinaron que la mineralización de Mn, Co y Ni, se concentra predominantemente en la parte inferior de la zona limonítica y en la zona de transición entre la zona saprolítica y limonítica. En esta zona aparecen minerales primarios que portan Ni y que aún no han concluido todas las transformaciones del proceso de meteorización.

A partir de la composición geoquímica, desde la perspectiva multivariada y en relación directa con la mineralogía, las clasificaciones relacionadas en párrafos anteriores se subdividen, para aumentar la capacidad de visualizar fenómenos, relaciones entre las variables y procesos (Peña *et al.*, 2013; 2015; Peña, Cala, Capote *et al.*, 2017).

Los resultados e hipótesis sobre los procesos que concentran en la zona de saprolitas a los ETR (tabla 1) y EGP se exponen en numerosos trabajos (Marchesi, 2006. Galí, Proenza, Labrador *et al.* 2007; Pérez, Proenza y Lavaut, 2007; Tauler, Buen, Proenza *et al.* 2007; Roque, Proenza, Mosselmans *et al.*, 2008; Proenza, Roque, Labrador *et al.*, 2011; Zaccarini, Garuti, Proenza *et al.*, 2011), se considera menos rica que la laterítica en estos elementos, lo que se confirma en trabajos recientes (Pérez Sánchez, 2013; Aiglsperger, 2015; Aiglsperger, Proenza, Lewis *et al.*, 2016; Sam y Legrá, 2016; Tobón, Weber, Proenza *et al.*, 2020).

En (Proenza *et al.*, 2007) determinaron en esta zona del PLOC, que la fase mineral predominante es la lizardita, la cual en algunos casos puede coexistir con la goethita, expresan que los mayores contenidos de Ni y Co se han encontrado en fases hidratadas de Mn, litioforita y asbolanas. Según (Rojas *et al.*, 2012) estudia varios perfiles del yacimiento Punta Gorda y determina la existencia en esta zona de lizardita $[(\text{Mg}, \text{Ni})_6(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8]$, enstatita $[\text{Mg}_2(\text{Si}_2\text{O}_6)]$, antigorita $[\text{Mg}_3(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8]$ y goethita. En (Tauler *et al.*, 2007), diferenciaron tres tipos de serpentinas en el PLOC. Asocian las variaciones en la composición con la formación de un tipo de serpentina en condiciones supergénicas, que en este proceso la lizardita primaria se transforma en una segunda generación rica en Ni, que la movilización en soluciones ricas en Ni pueden precipitar garnierita y estas luego son remplazadas por asbolanas ricas en Ni y Co. Las investigaciones desarrolladas por (Peña, Cala, Capote *et al.*, 2017), profundizan en la clasificación del PLOC por vía multivariada y analiza la composición y mineralogía de cada clase, esto se expone en el acápite siguiente.

Modelo multivariado del perfil laterítico del oriente cubano

La clasificación del PRM propuesta en Peña y Vera (2013) se obtuvo de un análisis multivariado, donde se procesaron aproximadamente medio millón de testigos de la exploración de yacimientos de Ni en la zona oriental cubana y los obtenidos en las pruebas tecnológicas, realizadas desde el año 2005 hasta la fecha. Muchos de los primeros solo contaban con análisis de Fe, Ni y Co, por lo que se necesitó emplear varias técnicas de reconocimiento de patrones y recurrir a los criterios de expertos, recogidos en las descripciones geológicas de cada testigo y en consulta a geólogos exploradores y de la producción. Este proceso de investigación arrojó once tipos de materiales presentes en todos los yacimientos, distribuidos de forma diferentes en cada uno de ellos e incluso localmente. Cada tipo se subdividió en dos, según el criterio de la industria (cut off), de los 22 tipos del comportamiento geoquímico obtenidos, once son menas y los otros ameníferos, que no se emplean en la industria cubana del Ni.

De los 22 TCG, 14 no tienen una frecuencia significativa en el PLOC (fig. 4) ($< 5\%$), sin embargo, se diseminan aleatoriamente en el yacimiento y pueden acumularse en áreas específicas. Este modelo no se expone en forma de un perfil ideal ya que estos no existen en la naturaleza (Muñoz, Rodríguez, Vera *et al.*, 2009; Muñoz *et al.*, 2015).

Este modelo descompone cada zona de Lavaut (2018) en un conjunto de TCG (fig. 5), aunque no

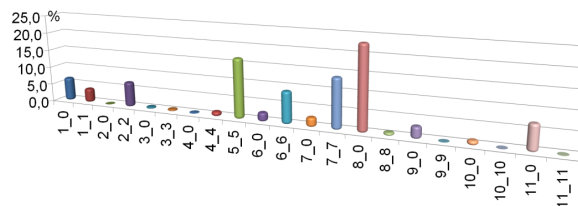


Figura 4. Distribución de los tipos del comportamiento en PLOC.

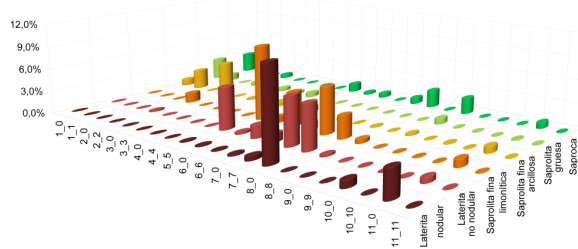
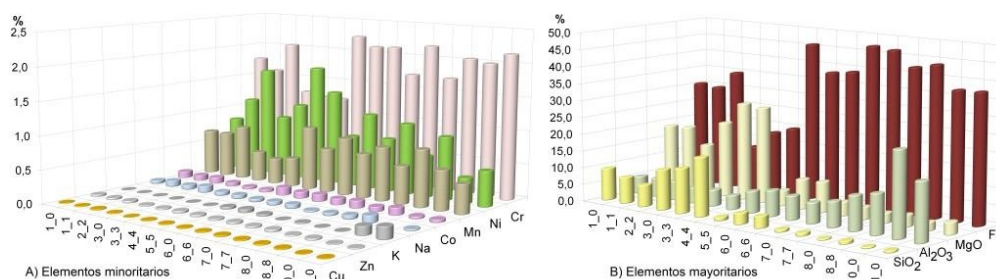


Figura 5. Modelo de Lavaut (2018) vs el multivariado de Peña y Vera (2013)

exacta, existe una correspondencia entre este sistema de clases con los otros modelos. Los TCG no constituyen zonas, si no, comportamientos geoquímicos y mineralógicos del PLOC, son mutuamente excluyentes y cumplen las propiedades de un espacio muestral, en las condiciones del muestreo de exploración, donde la aparición de uno de ellos es un evento, en el cual se puede establecer la distribución de probabilidad de cada TCG en función de las coordenadas (Peña, 2015), el modelo multivariado pasa de ser únicamente descriptivo a cuantificar la frecuencia de los eventos, es capaz de predecir la ubicación de los TCG y se ha empleado para obtener testigos representativos del PRM de los yacimientos del oriente cubano (Peña y Sam, 2013).

Un resumen de la composición química de los TCG se expone en la fig. 6, se presentan 12 elementos en dos gráficas del compendio de 834 testigos tomados en la extracción de tres pruebas pilotos, lo que ha permitido aumentar la información de los TCG (Peña y Vera, 2013). Los yacimientos y sus sectores se diferencian por la forma en que se distribuyen en ellos los TCG, lo que es un reflejo de lo caótico de la composición generada por la meteorización y las mezclas polimetálicas que aparecen en estos yacimientos (Peña y Fernández, 2021). Por ello es necesario conocer sus propiedades más allá de los intereses de la actual industria del níquel, de tal forma que puedan aportar nuevas riquezas.

De los 22 TCG estuvieron presentes en 15 en estas muestras, su composición elemental tiene correspondencia con la clasificación de Lavaut (2018), esto se deduce de las figs. 5 y 6, lo cual muestra lo robusto del modelo. El análisis mineralógico de los TCG se exponen en (Peña, Cala, Capote *et al.*, 2017).

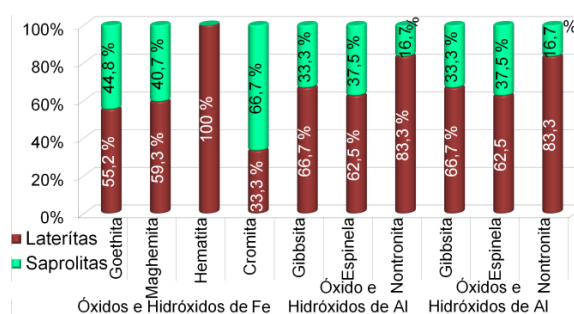


Los minerales del perfil de meteorización del oriente cubano

Las aplicaciones de los óxidos de Fe van desde los pigmentos para diferentes pinturas hasta la fabricación de imanes permanentes. El empleo de materiales naturales se ha relegado a un segundo plano y hoy se emplean óxidos de Fe sintéticos que se elaboran con características adecuadas a productos específicos, entre ellos los nanotecnológicos. Como pigmentos, responden a colores desde blanco (Akaganeíta) hasta el negro intenso (magnetita), con tonalidades naranjas (Lepidocrocita), rojos (Hematita), marrones (Goethita) y verdes (Wustita). Se presentan también como oxihidróxidos e hidróxidos, en estado ferroso o férrico, con una amplia gama de propiedades físicas, se utilizan en conductores, semiconductores y como aislantes. Se emplean como materiales antiferromagnéticos (Dorantes, 2003), paramagnéticos o ferromagnéticos. Todo en correspondencia a las formas de cristalización en cada fase, la Ferroxihíta (hexagonal desordenado), la Goethita y la Lepidocrocita (ortorrómbico) y las espinelas invertidas, magnetita y maghemita (cúbico) (Castaño y Arroyave, 1998).

Se han desarrollado vías de síntesis de los óxidos que permiten obtener productos específicos, a partir de precursores oxálicos; a través de la hidrólisis de las sales de hierro; por la descomposición de quelatos y otras metodologías (Pereira, Oliveira y Murad, 2012; Schwertmann y Cornell, 2000 a y b). Para obtener hematita, magnetita y maghemita se ha empleado comúnmente la hidrólisis, actualmente también se emplea la técnica de sol-gel, con ella se obtienen productos puros y homogéneos en su composición, forma y distribución de tamaño de las partículas, estas características se exigen para el desarrollo de las nuevas tecnologías (Jansen y Guenther, 1995; Zenitagoya, Davalos y Estrada *et al.*, 1996).

Los tipos de óxidos que se han mencionado están presentes en el perfil laterítico. Los más frecuentes se exponen en la fig. 7, la hematita se encuentra en la zona de lateritas (Rojas, 2005; Peña *et al.*, 2017). Esta fase es de amplio uso como pigmento en su forma natural, las diferentes tonalidades se logran de acuerdo al contenido de SiO_2 y MgO (Castaño y



Arroyave, 1998), estos últimos también presentes en todo el perfil laterítico en diferentes formas, ya sea como filosilicatos, cuarzo y diferentes óxidos de Mg. En Cuba se emplean para pigmentos, la mezcla de minerales del perfil laterítico, los residuales sólidos del proceso de lixiviación ácida a presión (Lobaina y Prieto, 2017).

La hematita natural beneficiada se emplea en: el vidrio para pulimento, colorante y para mejorar sus características; en metales preciosos y diamantes, como pulimento (Klein y Hurlbut, 1997). Es un catalizador en procesos químicos (Cebolla, Diack, Oberson *et al.* 1991; Múka y Miik, 1991), su acción catalítica se relaciona con los parámetros de la estructura y la composición, determinadas por las condiciones en las que se formó. A esta fase se le atribuye un buen comportamiento como adsorbente de algunos metales preciosos y sustancias orgánicas (Enzweiler y Joekes, 1991; Lee y Somasundaran, 1991; Turner y Kramer, 1992). La capacidad adsorbente y los cambios de las propiedades físicas cuando adsorbe vapores de diferentes sustancias, han hecho de la hematita y otros óxidos de Fe un material para sensores, fundamentalmente a altas temperaturas (Vasiliev y Malyshev, 2013; Shaposhnik, Moskalev, Chegereva *et al.*, 2021). La hematita y la Goethita se emplean en el tratamiento de aguas residuales para aumentar la oxidación y mejorar la sedimentación (Piao, Ming, Lian *et al.*, 2012). Otras fases mineralógicas presentes en las lateritas son objeto de investigación con vistas a conocer su transformación ante los procesos biológicos y su influencia en los cultivos (Shein, Verkhovtseva, Milanovsky *et al.* 2016).

En la industria electrónica se obtienen imanes de hexaferritas en cerámicas, en las que se emplea polvo de hematita, sintética o procedente de minerales y residuos de la industria siderúrgica (Dufour, Negro, Latorre *et al.*, 1995). En cátodos para baterías recargables de litio se adiciona hematita a los vidrios de pentóxido de vanadio, para aumentar el coeficiente de difusión química (Machida, Fuchida y Minami, 1990).

La magnetita y la hematita en la fabricación de sensores de gases, como catalizador (Esraa, Shahid, Hadi *et al.*, 2017) y en biotecnología para inmovilizar enzimas (Castaño y Arroyave, 1998). En la industria electrónica, es fundamental para la producción de imanes permanentes y cerámicas con propiedades magnéticas. Acompañada de cobalto y hematita sirve para dispositivos de grabaciones de alta densidad. Se fabrican fibras y barbas cerámicas de magnetita para obtener biomateriales compuestos, para aplicaciones médicas e industriales, un ejemplo de ello son los dispositivos para hornos de microondas (Bucin y Lawton, 2021). Se emplea además en la eliminación de colorantes en medios acuosos (Abdelrahman, Ezzat, Faruq *et al.* 2022). La maghemita $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ tiene estructura octogonal lo que le imprime la propiedad de semiconductor, aislante y ferromagnética, esto la hace atractiva para la fabricación de dispositivos de interferencia electromagnética y absorción de microondas (Nguyen, Díaz, Dementev *et al.* 1993; Da Costa; 1996; Cordis Europa, 2022).

La goethita es la más abundante en el PRM tiene las mismas aplicaciones descritas en las fases mineralógicas anteriores, con la diferencia de los efectos (P. ej. el color en los pigmentos) y la aplicación específica de cada propiedad (Francis, Dodge, Gillow *et al.*, 1991; Terán y Álvarez, 2011). Todos estos óxidos se encuentran en el PRM de los yacimientos del oriente cubano y pueden diferenciarse en fracciones granulométrica (Ageyi *et al.*, 2010; Ageyi y Beyris, 2011; Ageyi, Hernández y Rojas, 2009 b).

Los óxidos de Al poseen propiedades adsorbentes y refractarias, así como, otras eléctricas que pueden ser empleadas en materiales especiales para la optoelectrónica y cerámicas especiales (Gil Hernández, 2006; Luengo, Ferullo y Castellani, 2014). Los filosilicatos encuentran mayor aplicación en la cerámica y como aislantes térmicos y eléctricos (García y Suárez *et al.*, 2022).

El empleo de cada fase explicadas en los párrafos anteriores se supone de forma aislada, pero una porción de PRM en el oriente cubano puede contener todas estas fases en mayor o menor proporción, cuestión que puede ser perjudicial para unas aplicaciones (Dorantes, 2003), pero en otras pudiera potenciarlas (Estébanez, 2017). Es por ello que el estudio de las propiedades se debe dirigir a determinadas fracciones de tamaño que pueden ser

separadas por vía mecánica (Ageyi y Beyris, 2011). Los análisis químicos y mineralógicos se deben orientar a la determinación de elementos (EGP y ETR) que dotarán a los óxidos de las propiedades útiles en aplicaciones de la electrónica. Así se vislumbra que las principales aplicaciones estarán orientadas a la fabricación de materiales magnéticos, aislantes ferromagnéticos, sensores para gases y electrodos de baterías y superconductores.

Materiales para componentes electrónicos

Muchos de los materiales que se emplean en la fabricación de celdas fotoeléctricas, electrodos para pilas (Cabrera, Benavente, Vargas *et al.* 2012), condensadores (Calvo, Menéndez, González *et al.*, 2009) se componen de óxidos, muy cercanos a los materiales que aparecen de forma natural en yacimientos metálicos algunos en la forma $\text{NdMe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_3$ donde $\text{Me} = \text{Co}, \text{Ni}, \text{Cu}$ (Mosqueda, 2005; Gil Rebaza, 2013).

Algunos investigadores han profundizado en el empleo de materiales naturales para la fabricación de Hidroxiapatita y grafenos dopados con minerales de transición como el Fe, Co, Ni, Cu, para obtener nanomateriales con propiedades de uso en la industria electrónica por vías sencillas menos abrasivas al medioambiente (Quijano, 2019). Una de las posibles aplicaciones de estos materiales es en los electrodos de los condensadores electroquímicos (también denominados supercondensadores), la elección de los materiales para su fabricación, influye en las características finales del dispositivo electroquímico (Calvo, Menéndez, González *et al.*, 2009). Entre los materiales se incluyen los porosos basados en carbón, los óxidos de metales de transición y los polímeros conductores. Cada familia de materiales presenta ventajas e inconvenientes, por ello la tendencia es el uso de electrodos híbridos, constituidos por materiales de distinta naturaleza que combinan los aspectos beneficiosos y compensan las limitaciones de cada uno de los materiales por separado.

Según Calvo *et al.* 2009, los óxidos binarios de Co-Ni hidratados, cuya fórmula es $\alpha\text{-(Co+Ni)(OH)}_2\text{NH}_2\text{O}$, preparados por métodos sol-gel o técnicas electroquímicas se han propuesto como materiales para condensadores electroquímicos. Han logrado valores de capacidad de 730 F/g empleando una disolución 1 M de NaOH, aunque la ventana de potencial aplicado para el almacenamiento de energía es relativamente estrecha (aproximadamente 0,5 V). Los óxidos de metales de transición son los materiales de electrodos más apropiados para su aplicación en supercondensadores Redox, entre ellos el óxido de rutenio (RuO_2) es el material más idóneo, pero es escaso y costoso, se hace necesario orientar las investigaciones a obtener las mismas prestaciones con otros óxidos de metales de transición, encauzarlas

a: la obtención de óxidos de metales nobles con una elevada área superficial (Suvorov *et al.*, 1990; Machida *et al.*, 1990); la sustitución parcial del metal noble formando perovskitas o hacia la formación de otros compuestos metálicos como los nitruros; sustitución del metal noble (Ru e Ir) por otros metales de transición (Ni, Co, Fe, V, Mo), más económicos y medioambientalmente viables; fabricación de electrodos híbridos por la combinación de óxidos metálicos con polímeros conductores y materiales de carbono porosos (Estrada, 2016; Burcin, Lawton y Orbey, 2021). Los mesoporos ofrecen las rutas adecuadas para el movimiento de los iones de los electrolitos. Por su parte, los microporos aumentan el área del material disponible y elevan la capacidad para mantener la carga eléctrica.

Son numerosas las investigaciones encaminadas a la síntesis de nuevos materiales para resolver los aspectos mencionados, muchos proponen otros métodos de síntesis (Hwan *et al.*, 2005; Gil, 2006; catalizadores en la producción de combustibles fósiles y biocombustibles Nathan, Aziz, Noor *et al.* 2008; López Blanco, 2011; Gil Rebaza, 2013; Peltzer, Blancá, Cappelletti *et al.*, 2019). Los materiales sintéticos se emplean además como (Sieben, Duarte y Mayer, 2008; Terán Sáenz, 2011; Cabello, Rincón y Zepeda, 2017), incluso en la transformación del CO₂ en material combustible (Ju, Tan, Mao *et al.*, 2021).

En Cuba el Instituto de Materiales y Reactivos de la Universidad de la Habana ha desarrollado algunas investigaciones encaminadas a la búsqueda de nuevos productos para electrodos de baterías y supercondensadores. Mosqueda (2005) expone la obtención sintética de un compuesto de tipo LiNi_{0,8}Co_{0,2}O₂/PANI para cátodos, en baterías secundarias de Li. Danguillecourt Alvarez (2017) propone la síntesis de nuevos materiales a partir del

carbono para baterías y condensadores electroquímicos.

En el contexto cubano actual, se necesita reducir el consumo de combustibles fósiles hasta cambiar por completo la matriz energética, es de importancia estratégica la búsqueda de materiales nacionales para la fabricación de componentes electrónicos, que permitan sustituir las materias primas conocidas o que sirvan en su estado natural, o con tratamientos de beneficio, físico o químico (Hernández, Falcón, Trujillo *et al.*, 2000).

En párrafos anteriores se ha detallado la composición química y mineralógica de los yacimientos lateríticos cubanos ubicados en el norte de Holguín, se explica que la mayor parte de este material son los óxidos e hidróxidos de Fe, Mg y Al. Otra parte está compuesta de silicatos de Fe, Mn y Al, en menor proporción los óxidos de cromo, Ni y Co. En el próximo acápite se profundiza en la importancia que estos óxidos tienen por su empleo.

RESULTADOS DEL ANÁLISIS AL ESTADO DEL ARTE

De las contribuciones revisadas se concluye que, los compuestos más empleados en la fabricación de materiales para dispositivos de altas tecnologías tienen las formas siguientes: Fe_xO_y (x=1, 2; y=1, 2, 3); NdMe_{0,5}Mn_{0,5}O₃ donde Me = Co, Ni, Cu; γ-Fe₂O₃α-(Co+Ni)(OH)₂ NH₂O (óxidos binarios de Co-Ni); Fe(OH)_x, (x=1, 2, 3); RuO₂; FeO(OH)·nH₂O; IrO₂; γ-Fe³⁺O(OH); V₂O₅. Se consideran ideales, el Ru, el Ir y el V, pero son metales caros y difíciles de obtener. Los metales de transición como Co y Ni los sustituyen, o se emplean los primeros dopados con ETR (tabla 1) o EGP. Los ETR se exponen en la tabla 1 y su empleo en la tabla 3.

Tabla 3. Empleos frecuentes de los ETR

Nº	Empleos	Nº del ETR
1	Aditivo en la fabricación de lámparas	4, 5, 16, 17
2	Aditivo en vidrio de didimio y granates de alto índice de refracción	6, 12, 13
3	Aditivos para el acero	9
4	Agentes oxidantes y reductores químicos (bengalas)	1, 8
5	Agentes de rastreo radioactivo	4
6	Aleaciones ligeras para componentes aeroespaciales	4
7	Almacenamiento de hidrógeno	10
8	Baterías nucleares	15
9	Barras de control nuclear (absorbente de neutrones)	Todos
10	Bombillas de bajo consumo, tubos de lámparas fluorescentes y de vapor de mercurio, bujías, camisas incandescentes, material fosforescente, LED.	5, 9, 11
11	Catalizador (Craqueo de petróleo, deshidrogenación y en hornos autolimpiables)	1, 15, 10, 11
12	Colorantes de vidrio y cerámica	1, 12, 13
13	Condensadores de cerámica	12
14	Discos compactos y duros	2, 4
15	Electrodos de batería	10
16	Fonocaptos	12

N°	Empleos	N° del ETR
17	Imán permanente de alta potencia	2, 7, 12, 13, 15, 16
18	Lámparas de arco de carbono	13, 15
19	Laser	2, 3, 5, 6, 8, 9, 12, 13, 15, 16, 17
20	Lentes de cámara	10
21	Materiales fosforescentes ante la excitación por electrones (en la televisión)	5, 9, 15, 16
22	Motores de automóviles eléctricos	12
23	Pedernales de ferrocerio para encendedores (Metal de Misch)	1
24	Polvo para pulir	1
25	Producir rubíes sintéticos	2, 12
26	Radiación infrarroja	2, 12
27	Radioterapia	11, 15, 9
28	Superconductores de alta temperatura	9
29	Tubos de rayos X	6
30	Vidrio de alto índice de refracción y resistente a álcalis	10, 11
31	Vidrios de absorción de Infrarrojo	Todos
32	Amplificador de microondas por la emisión estimulada de radiación (MASER)	15
33	En resonancia magnética nuclear (RMN) (agentes de relajación, agentes de contraste)	5, 6
34	Electrónica (Memorias de computadora, Sistemas de sonar navales, fibra óptica, sensores)	3, 6, 11, 16
35	Aleaciones magnetostrictivas (galfenol, terfenol-D)	2, 6, 16
36	Aditivo para aceros	3, 6, 8
37	Estabilizador de pilas de combustible	16

CONCLUSIONES

Existen las condiciones tecnológicas y de conocimiento, así como, la necesidad social que induce a realizar investigaciones, en busca de nuevas aplicaciones de los actuales yacimientos de Ni y Co, entre las que se pueden encontrar materiales para la fabricación de elementos y dispositivos para la electrónica, entre todas las aplicaciones hasta ahora conocidas de estos minerales

RECOMENDACIONES

Emprender investigaciones que reafirmen la presencia de los ETR y los EGP en los óxidos de Fe, Mn, Al y Cr, en las lateritas del oriente cubano; estudiar la forma de beneficiar estas menas; obtener materiales especiales a partir de ellas y determinar la aplicación de cada material separado.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdelrahman O., Ezzat A. M., Faruq Mohammad T. & Al-Lohedan H. A. 2022. Modification of magnetite nanoparticles surface with multifunctional ionic liquids for coomassie brilliant blue R-250 dye removal from aqueous solutions. *Journal of Molecular Liquids*. Vol. 358. ISSN 0167-7322, DOI: doi.org/10.1016/j.molliq.2022.119195. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167732222007334>, [Consulted: May 5, 2022]
- Ageyi G., Hernández Flores A. & Rojas Puron A. 2009 a. *Caracterización de la Mena Niquelífera del Yacimiento Punta Gorda Mediante Técnicas Analíticas de Difracción de Rayos-X y Análisis Térmico Diferencial*. MIN4-P24. III Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, Cuba: Palacio de las Convenciones de La Habana, ISBN: 978-959-7117-19-3.
- Ageyi G., Hernández Flores A. & Rojas Puron A. 2009. Contribución a la Mineralogía Tecnológica de la Mena Niquelífera del Yacimiento Punta GordaMin4-P31. CD de Memorias de la III Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, Cuba: Palacio de las Convenciones de La Habana, ISBN: 978-959-7117-19-3.
- Ageyi G., P. Beyris Mazar E., Rojas Purón A. & Hernández Flores A. 2010. “Distribución fraccional de metales y minerales en la laterita de balance del yacimiento Punta Gorda, Moa, Cuba”. *Minería y Geología*. Vol. 26 (No. 4): 36-52. ISSN: 1993 8012.
- Ageyi G. P. & Beyris Mazar E. 2011. “Modelación de la distribución fraccional magnética de la mena oxidada niquelífera de Cuba”. *Minería y Geología*. Vol. 27(No. 4): 40-63, ISSN: 1993 8012.
- Aiglsperger T. H. 2015. *Mineralogy and Geochemistry of the platinum Group elements (PGE), rare earth elements (REE) and scandium in Nickel laterites*. Tesis doctoral, Universidad de Barcelona, Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Depósitos Minerales. Facultad de Geología.

- Aiglsperger T., Proenza J. A., Lewis J. F., Labrador M., Svojtka M., Rojas Purón A., Longo F. & Đurišová J. 2016. Critical metals (REE, Sc, PGE) in Ni laterites from Cuba and the Dominican Republic. *Ore Geology Reviews*. 73 (2016), 127-147. Available: <www.elsevier.com/locate/oregeorev>, [Consulted: May 5, 2022]
- Burcin I, Lawton C. W. & Orbey N. 2021. Poly (para-phenylene) fibers - Characterization and preliminary data for conversion to carbon fiber. *Polymer*, Volume 228, ISSN: 0032-3861, Available: <<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2021.123945>>, [Consulted: May 5, 2022]
- Cabrera S, Benavente F., Vargas M., Luis Flores J., Ortega M., Villca J., Mamani R., Leiva N., Luna M., Yapua W., Blanco M., Palenque E. R. & Balanzad R. 2012. "Perspectivas en el procesamiento de materiales - electrodos para baterías de ion litio en Bolivia". *Revista Boliviana de Química*. Vol. 29, No.1. Available: <<http://www.bolivianchemistryjournal.org>>, [Consulted: May 5, 2022]
- Calvo, E. G, Menéndez J. A, González M & Viera J. C. 2009. Propiedades, ventajas e inconvenientes de los materiales utilizados en supercondensadores. *Afinidad* LXVI, 543, Septiembre-Octubre.
- Castaño J. G. & Arroyave C. 1998. La funcionalidad de los óxidos de hierro. *Revista de Metalurgia*. Vol. 34 No. 3. <<https://revistademetalurgia.a.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/view/794/805>>[Consulted: March 7, 2022]
- Cabello C., Rincón S. & Zepeda A. 2017. Catalizadores heterogéneos utilizados para la obtención de biodiesel. *Afinidad* Vol. LXXIV, N° 577 January - March. Available:<<https://raco.cat/index.php/afinidad/article/download/320756/411247#:~:text=Los%20catalizadores%20b%C3%A1sicos%20como%20hidr%C3%B3xido,para%20la%20producci%C3%B3n%20de%20biodiesel>> [Consulted: March 7, 2022].
- Cebolla V. L., Diack M., Oberson M., Bacaud R. & Cagniant D. 1991. "Effect of various catalysts on the chemical structure of oils and asphaltenes obtained from the hydrolification of a highly volatile bituminous coal". *Fuel Processing Technology*. Vol. 28. (N°2): 183-201, ISSN: 0378-3820, DOI: [https://doi.org/10.1016/0378-3820\(91\)90049-I](https://doi.org/10.1016/0378-3820(91)90049-I).
- Da Costa, G. M. 1996. Mössbauer spectroscopy and X-ray diffraction studies of maghemite { γ -Fe γ -Al γ }_2O γ _3} with 0.0 $\leq$ y $\leq$ 0.66. Tesis doctoral. Univ. de Gante Bélgica, 1, 103 y 104. Available: <<https://books.google.com/cu/books?id=ZM5XcgAACAAJ>>[Consulted: March 7, 2022].
- Cordis Europa. Tecnología de absorción de microondas mejorada. Recubrimientos magnéticos nanoestructurados por pulverización térmica para aplicaciones de absorción de microondas. Available: <<https://cordis.europa.eu/article/id/88303-improved-microwave-absorption-technology/es>> [Consulted: July 7, 2022].
- Danguillecourt Alvarez E. 2017. Nuevos materiales carbonosos para baterías de iones litio y condensadores electroquímicos. Tesis doctoral. Instituto de Ciencia y Tecnología de Materiales.Cuba: División de Materiales para la Energía. Universidad de la Habana.
- Dorantes Dávila J. 2003. Materiales magnéticos: una revolución tecnológica. Vol. 54 (No. 1). Enero - marzo. Available: <https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/54_1/materiales_magneticos.pdf> [Consulted: July 7, 2022].
- Dufour J., Negro C., Latorre R., López Mateos F. & Formoso A. 1995. Procesos de obtención de ferritas hexagonales tipo M. *Revista de metalurgia*, Vol. 31 (N° 2): 111-119:ISSN 0034-8570. Available: <<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7707329>> [Consulted: July 7, 2022].
- Elias, M. 2001. Nickel laterite deposits - geological overview, resources and exploitation. In: Giant ore deposits: Characteristic, genesis an exploitation. CDES Special Publication 4, Center for ore deposits research, University of Tasmania, 205-220p. Available: <<http://www.csaau.com/documents/public/publications/godpaper.pdf>> [Consulted: July 7, 2022].
- Estébanez Santos I. 2017. Multicapas magnéticas. Trabajo Fin de Grado. Universidad de Oviedo. Facultad de Ciencias. Available: <<https://digital.csic.es/handle/10261/173816>> [Consulted: July 7, 2022].
- Enzweiler J. & Joeke I. 1991. "Adsorption of colloidal gold on colloidal iron oxides. *Journal of Geochemical Exploration*" Vol. 40 (1-3):133-142, ISSN: 0375-6742. Available: <[https://doi.org/10.1016/0375-6742\(91\)90035-S](https://doi.org/10.1016/0375-6742(91)90035-S)> [Consulted: July 9, 2022].
- Esraa M. B., Shahid Ali K., Hadi M. M., Ekram Y. D., Abdullah M. A. & Sher B. K. 2017. "Performance of cellulose acetate-ferric oxide nanocomposite supported metal catalysts toward the reduction of environmental pollutants. International". *Journal of Biological Macromolecules*. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2017.09.034
- Estrada de la Vega A. 2016. Nanoestructuras híbridas basadas en clústeres de nanopartículas de óxidos magnéticos y carboximetil-celulosa. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Nuevo León Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Available: <<http://eprints.uanl.mx/id/eprint/15701>> [Consulted: July 9, 2022].
- Fernández Martínez L. F; Peña Abreu R. E & Puentes A. 2019. "Modelación de indicadores para el control de la dilución interna en yacimientos de níquel y cobalto cubanos". *Revista Minería y Geología*. Vol. 34 (No.2), ISSN: 1993 8012.

- Galí S., Proenza J. A., Labrador M., Melgarejo J. C., Auler E. T., Muñoz Gómez N., Rojas Purón A. & Orozco Melgar G. 2006. Caracterización mineralógica de los perfiles laterítico tipo óxido: yacimiento Punta Gorda (Cuba Oriental). XXVI REUNIÓN (SEM) / XX REUNIÓN (SEA).
- Galí S., Proenza, J.A., Labrador, M., Tauler, E. & Melgarejo, J.C. 2007. "Numerical modelling of oxide-type Ni laterite deposits: preliminary results. In: Andrew, C.J. *et al.* (Eds.), Digging Deeper, Irish Association of Economic Geology: 1385-1388.
- Gallardo T, Tauler E, Proenza J. A. , Lewis J. F, Galí S Labrador M, Longo F.& Bloise G. 2010. "Geology, Mineralogy and Geochemistry of the Loma Ortega Ni Laterite Deposit, Dominican Republic". Macla Revista de la Sociedad Española de Mineralogía, N° 13 (Septiembre 10).
- Gaudin A, Grauby O, Noack Y, Decarreau A. & Petit S. 2004. "Accurate crystal chemistry of ferric smectites from the lateritic nickel ore of Murrin Murrin (Western Australia). I. XRD and multi-scale chemical approaches". Clay Minerals. 39: 301-315.
- Gil Hernández V. 2006. Preparación y caracterización de materiales cerámicos para su uso como componentes: electrolito, ánodo y cátodo, en pilas de combustible de óxido sólido de temperatura intermedia. Estudio de sus compatibilidades. Tesis Doctoral. Departamento de Química Física Aplicada. Facultad de Ciencias. Instituto de Cerámica y Vidrio Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid. Available: <<https://books.google.com/cu/books?id=rfkmywEACAAJ>>[Consulted: July 1, 2022].
- Gil Rebaza A. V. 2013. Estudio sobre las propiedades estructurales, electrónicas y magnéticas de materiales de interés tecnológico por medio de cálculos cuánticos. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Exactas. Departamento de Física. Universidad Nacional de La Plata. La Plata.
- Hernández Flores A., Agyei G. & Rojas Purón L. A. 2017. "Estudio fraccional densométrico de la mena laterítica: evaluación del enriquecimiento". Minería y Geología, Vol. 33 (No. 3, julio-septiembre):293-311, E-ISSN: 1993-8012. Available: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223551846004>>[Consulted: July 1, 2022].
- Hernández Flores A, Falcón Hernández J. F, Trujillo Codorniux R. A, Almaguer Furnaguera A. & Toirac Suárez M. 2000. "Análisis teórico del beneficio de la mena laterítica". Minería y Geología. Vol. XVII, No. 3-4.
- Kirk, R. E. & Othmer, D. F. 1962. Enciclopedia de Tecnología Química. Tomo IX. Ed. UTEHA. México: 327-329 p.
- Klein C. & Hurlbut C. S. Jr. 1997. Manual de Mineralogía (Basado en la obra de J. D. Dana). Cuarta Edición, Vol 2. Reverté, Barcelona. 679 p.
- Francis, A. J., Dodge, C. J., Gillow, J. B. & Cline, J. E. 1991. "Microbial transformation of uranium in wastes." Radiochimica Acta 52-53, 311316.
- Il-Hwan Kim, Jae-Hong Kim, Young-Ho Lee & Kwang-Bum Kima. 2005. "Synthesis and Characterization of Electrochemically Prepared Ruthenium Oxide on Carbon Nanotube Film Substrate for Supercapacitor Applications". Journal of The Electrochemical Society, 152 (11): A2170-A2178. 0013-4651. Available: <<https://www.academia.edu/download/49997824/A2170.full.pdf>>[Consulted: February 13, 2021].
- Jansen M. & Guenther E. 1995. Oxide Gels and Ceramics Prepared by a Nonhydrolytic Sol-Gel Process. Chemistry of Materials., 7, 11, 2110-2114. © American Chemical Society. Available: <<https://doi.org/10.1021/cm00059a019>>. [Consulted: February 13, 2021].
- Ju L., Tan X. , Mao X. , Gu Y. , Smith S. , Du A. , Chen Z. , Chen C. & Kou L. 2021. "Controllable CO₂ electrocatalytic reduction via ferroelectric switching on single atom anchored In₂Se₃ monolayer". NATURE COMMUNICATIONS, 12:5128, <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25426-5>,
- Labrador, M., Proenza, J. A., Galí, S., Melgarejo, J. C., Tauler, E., Rojas Purón, A., Muñoz Gómez, N. & Rodríguez Vega, A. 2006. "Minerales de Mn-Co-Ni en las Lateritas de Cuba Oriental: resultados preliminares". Macla, 9, 281-284.
- Lavaut Copa W. 1998. "Tendencias geológicas del intemperismo de las rocas ultramáficas en Cuba Oriental". Minería y Geología No. 15: 9-16.
- Lavaut Copa W. 2003. La Meteorización de la Ofiolita de Cuba Oriental. Modelos Geológicos y Terminología Cubana. V Congreso de Geología y Minería de la Sociedad Cubana de Geología, GEOMIN'2003. La Habana. TGMNI.03. [CD-ROM] ISBN: 959-7117-11-8.
- Lavaut Copa W. 2004. "Patrones de Meteorización de Rocas Ofiolíticas de Cuba Oriental: su Importancia para la Minería". Minería y Geología. Nos. 3-4, ISSN: 0258 5979.
- Lavaut Copa W. 2005. Clasificador para Modelación Litológica de Lateritas. Available: <http://www.ismm.edu.cu/R_Geociencias%20y%20Quimica/volumen1.htm>. [Consulted: February 13, 2021].
- Lavaut Copa W. A. 2018. "Geological Classification for the Rocks of Weathering". Petroleum Science and Engineering. Vol. 2 (No. 1):1-6. doi: 10.11648/j.pse.20180201.11. Available: <<http://www.sciencepublishinggroup.com/j/pse>>. [Consulted: July 15, 2022].

- Lee L.T, Somasundaran P. 1991. "Effects of inorganic and organic additives on the adsorption of nonionic polyacrylamide on hematite". *Journal of Colloid and Interface Science*. Volume 142 (Issue 2):470-479, ISSN 0021-9797, [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(91\)90076-K](https://doi.org/10.1016/0021-9797(91)90076-K).
- Legrá García I. & Cala Cardero Y. 2019. Evaluación mineralógica de las colas negras de Nicaro. Trabajo Temático Productivo 1711 (IGP). Proyecto 600202 (CEDINIQ). Biblioteca CEDINIQ Moa. Archivos IGP, Servicio Geológico Cubano.
- Luengo C. V.; Ferullo R. M. & Castellani N. J. 2014. Estudio de la adsorción de sulfato sobre gibbsita por cálculos DFT. III Reunión Argentina de Geoquímica de la superficie. Universidad Nacional de Mar del Plata. Mar del Plata. Argentina. Available: <https://www.conicet.gov.ar/new_scp/detalle.php?keywords=&id=21779&inst=yes&congresos=yes&detalles=yes&congr_id=2636411> [Consulted: July 15, 2022].
- Lobaina Oduardo. O. & Prieto M. 2017. Obtención de pigmentos. Proyecto 600300. Etapa 01. Actualización de la información sobre los pigmentos, forma de obtenerlos y su mercado. Informe técnico de cierre de etapa. Biblioteca del Centro de Investigaciones del Níquel. 39 p. Moa.
- López Blanco M. 2011. Síntesis, caracterización estructural y eléctrica de materiales tipo columbita y trirutilos $\text{ANb}_2\text{xTaxO}_6$ (A=Ni y Mn) y de algunos derivados sustituidos-Ti. Tesis doctoral. Universidad Carlos III. Departamento de ciencia e ingeniería de materiales e Ingeniería química. Available: <https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/11897/Tesis_Mar_Lopez_Blanco.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Consulted: July 20, 2022].
- Machida N. Fuchida R. & Minami T. 1990. " Fe_2O_3 - V_2O_5 Glasses as Cathode in Lithium Batteries". *Journal of The Electrochemical Society*. Vol. 137. (Nº. 4): 1315-1316. ISSN: 0013-4651-1945-7111. <http://dx.doi.org/10.1149/1.2086657>
- Marchesi C. (2006). Petrogenesis of the ultramafic and mafic rocks from the Mayarí-Baracoa Ophiolitic Belt and the spatially-related volcanism (eastern Cuba). Ph. D. Thesis. Universidad de Granada, Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Departamento de Mineralogía y Petrología Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra.
- Mosqueda Laffita Y. 2005. Obtención, caracterización y aplicación de un nuevo material catódico, $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2/\text{PANI}$, para baterías secundarias de Li. Tesis Doctoral. Instituto de Materiales y Reactivos. Laboratorio de Química de Materiales, La Habana. Universidad de la Habana.
- Muñoz Gómez J. N, Orozco Melgar G. A, Rojas Purón A. & Cruz Orosa I. (2005). Mineralogía de las menas lateríticas del yacimiento Punta Gorda. I Congreso de Minera (MINERIA'2005). II Simposio Geología, Exploración y Explotación de las Lateritas Niquelíferas. MIN2-6. I convención Cubana de Ciencias de la Tierra. La Habana, Cuba, 5-8 Abril. MIN3-3. ISBN 959-7117-03-7.
- Muñoz Gómez J. Rodríguez Infante, N., A., Vera Sardiñas, L. O & Martínez Vargas, A.. 2009. Modelo Genético Teórico de los Yacimientos Lateríticos Asociados al Macizo Ofiolítico de Moa-Baracoa: Implicaciones de la Exploración de Explotación. III Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. La Habana, Cuba, 16-20 de Marzo. MIN2-P27. ISBN: 978-959-7117-19-3.
- Muñoz Gómez J. N, Rodríguez Infante A. & Barea Pérez I. 2015. "Variabilidad de los perfiles lateríticos en los yacimientos ferroniquelíferos de Moa". M&G. Vol.31 (No. 2):21-33.
- Nguyen My. T., Diaz, A. F., Dement'ev V. V. & Pannell K. H. 1993. High molecular weight poly (ferrocenediyl-silanes): synthesis and electrochemistry of $[-(\text{C}_5\text{H}_4)\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_4)\text{SiR}_2-\text{n}]_n$, R = Me, Et, n-Bu, n-Hex. *Chemistry of Materials*. Vol. 5 (Nº 10):1389- 1394. ISSN: 0897-4756. American Chemical Society, DOI: [10.1021/cm00034a005](https://doi.org/10.1021/cm00034a005).
- Nathan T.; Aziz A.; Noor A. F. & Prabakaran S. R. S. 2008. "Nanostructured NiO for electrochemical capacitors: synthesis and electrochemical properties." *J. Solid State Electrochem*. 12:1003-1009. Springer. DOI [10.1007/s10008-007-0465-3](https://doi.org/10.1007/s10008-007-0465-3)
- Ortoleva P, Merino E, Moore C & Chadanm J. 1987. "Geochemical self-organization I: Reaction-transport feedbacks an modeling approach". *American Journal of Science*, Vol. 287 (December): 979-1007.
- Ortoleva P, Merino E, Moore C & Chadanm J. 1987 "Geochemical self-organization II: reactive-infiltration instability". *American Journal of Science*, Vol. 287(December): 1008-1040.
- Peltzer y Blancá Eitel L., Cappelletti Marcelo A., Cédola Ariel P. Napán & Maldonado R. P. 2019. Estudios sobre dispositivos electrónicos y materiales. Departamento de Electrotecnia. Grupo de Estudio de Materiales y Dispositivos Electrónicos. Facultad de Ingeniería, Universidad de La Plata. Available: < <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/17750> >[Consulted: January 7, 2022].
- Peña Abreu R.E. & Vera Sardiñas, L. O. 2013. Identificación de clases patrones para la modelación matemática en yacimientos de cubanos níquel. *Ciencias de la Tierra y Espacio*. Vol. 14. No. 2. ISSN: 1729-3790. Available: <<http://www.iga.cu/Publicaciones/revista/index.htm>>. [Consulted: January 7, 2022].

- Peña Abreu R.E. 2015. Modelación matemática para optimizar el diseño de las redes del muestreo de exploración y explotación en yacimientos lateríticos de Ni Y Co. Tesis doctoral. Dpto. de Geol. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- Peña Abreu R. E. 2016. Modelación matemática para optimizar el diseño de las redes del muestreo de exploración y explotación en yacimientos lateríticos de Ni y Co. Ciencias de la Tierra y Espacio, Vol. 17 (No. 1 / enero-junio), ISSN: 1729-3790.
- Peña Abreu R. E; Cala Cardero Y; Capote Flores N; Casanova Gómez A; Toledo Sánchez C. A; Milia González I. & Lisabet Sarracen E. 2017. "Caracterización mineralógica de tipologías del comportamiento geoquímico de las lateritas del oriente cubano". Revista Ciencias de la Tierra y el Espacio. La Habana. Vol.18. (Nº.1, enero-junio): 12-23. ISSN: 1729-3790
- Peña Abreu R. E., Polanco Almaguer P. L.& Cala Cardero Y. 2018. Caracterización de las propiedades efectivas del producto residual del intemperismo en tres yacimientos de Ni y Co. TTP1712. Informe técnico final. Archivo CEDINIQ e IGP. 142 p.
- Peña Abreu R. E & Fernández Martínez L. 2021. Comparación entre zonas por la composición de menas y complejidad minera. IX Convención de Ciencias de la Tierra, GEOCIENCIAS'2021. IX Congreso de Minería (MINERÍA 2021). IX Simposio Geología, Exploración y Explotación de las Lateritas Niquelíferas. La Habana, 5 al 9 de abril de 2021. MIN1-O2. Memorias de Geociencias, Trabajos y Resúmenes. Ed: SCG. ISSN 2307-499X
- Pereira M. C, Oliveira L. C. A. & Murad E. 2012. Iron oxide catalysts: Fenton and Fentonlike reactions - a review. Clay Minerals. Vol. 47 (No. 3): 285-302. Cambridge University Press. DOI: <https://doi.org/10.1180/claymin.2012.047.3.01>
- Pérez Sánchez M. R. 2013. Caracterización geoquímica mineralógica de las zonas litológicas que conforman el yacimiento Camarioca sur, macizo Moa Baracoa. V Congreso Cubano de Minería. VI Simposio Geología, Exploración y Explotación de las Lateritas Niquelíferas. V Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. MIN1-P7, (Resumen). ISSN 2307-499x.
- Proenza J, Roque Rosell J, Labrador M, Galí S. & Tauler E. 2011. Caracterización Composicional y Estructural de los Minerales de Mn-Ni-Co en los Perfiles Lateríticos de Níquel Tipo Óxido. GEO4-O8. IX Congreso Cubano de Geología. Depósitos Metálicos Mineralogía y Petrología. Cuarta Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. La Habana, 4 al 8 de abril. ISBN 978-959-7117-30-8.
- Piao X., Ming Zeng G., Lian Huang D., Ling Feng C., Shuang H., Hua Zhao M., Cui L., Wei Z., Huang C., Xin Xie G.& Feng Liu Z. 2012. "Use of iron oxide nanomaterials in wastewater treatment" A review. Science of the Total Environment. Vol. 424:1-10, ISSN: 0048-9697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.02.023>.
- Putzolu F., Santoro L., Porto C., Mondillo N., Machado M., Saar De Almeida B., Bastos A.&Herrington R. 2021). The Influence of the Magmatic to Postmagmatic Evolution of the Parent Rock on the Co Deportment in Lateritic Systems: The Example of the Santa Fé-Ni-Co Deposit (Brazil). Economic Geology, Vol. XXX, Nº. XX: 21-25. ISSN: 0361-0128; DOI:[10.5382/econgeo.4819](https://doi.org/10.5382/econgeo.4819); 25 p.
- Quijano Briones J. de J. 2019. Preparación de materiales nanoestructurados por método solvotermal y estudio de las propiedades electrónicas y estructurales del óxido de grafeno reducido dopado con Fe, Co, Ni y Cu. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas.
- Rojas Purón A. L. 2001. "Evidencias a Favor de que la Goethita es la Principal Portadora de Níquel en los Horizontes Lateríticos de las Cortezas Ferroniquelíferas". Minería y Geología. Vol. 18 (No. 3-4):21-31.
- Rojas Purón. A. L., Orozco Melgar G., Vera Sardinas O.& Arderí A. 2005. Caracterización mineralógica de los perfiles lateríticos del yacimiento Punta Gorda. I Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. (Memorias) la Habana, ISSN: 0258 5979.
- Roque J, Proenza J. A, Mosselmans F, Atkinson K, Quinn P, Labrador M. & Galí Salvador. 2008. Preliminary Studies on Ni in Laterite Deposits from Moa Bay (Cuba) by Means of μ XRF and μ XAS using Synchrotron Radiation. Macla 9. Septiembre '08, Revista de la Sociedad Española de Mineralogía.
- Sam Palanco C. M.& Legrá García I. 2016. Identificación mineralógica de elementos del grupo del platino en lateritas de Moa. Trabajo temático productivo 1423. Archivo CEINIQ e IGP, Servicio Geológico Cubano. 65p.
- Schwertmann, U., Joseffried L, Helgestanjek & Darrells Chulze. 2000. The effect of Al on Fe oxides; XIX, Formation of Al-substituted hematite from ferrihydrite at 25 degrees C and pH 4 to 7. G", Claysand Clay Minerals, 48(2):159-172.
- Schwertmann U. & Cornell R. M. 2000 Iron oxides in the laboratory. Preparation and Characterization. © WILEY-VCH Verlag GmbH, D-69469 Weinheim (Federal Republic of Germany), 2000. Second, Completely Revised and Extended Edition. ISBN 3-527-29669-7
- Shaposhnik A. V., Moskalev P. V., Chegereva K. L., Zviagin A. A. & Vasiliev A. A. 2021. Selective

- gas detection of H₂ and CO by a single MOX-sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*. Vol. 334, ISSN: 0925-4005. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.129376>.
- Sieben, J. M. I; Duarte, M. M. E. I; Mayer, C. E. I. 2008. Preparación electroquímica de electrodos bimetalicos PtRu soportados sobre sustratos carbonosos y su caracterización para la oxidación de metanol en medio ácido. *Revista Materia*, Vol. 13(No.2): 357 - 364, ISSN: 1517-7076. Available: <<http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10990>>. [Consulted: January 7, 2022].
- Shein E. V., Verkhovtseva N. V., Milanovsky E. Yu., Romanycheva A. A. (2016). Microbiological Modification of Kaolinite and Montmorillonite Surface. *Biogeosystem Technique*. Vol. 9(No. 3):229-234. DOI: [10.13187/bgt.2016.9.229](https://doi.org/10.13187/bgt.2016.9.229)
- Suvorov, B. V., Belova, N. A., Kan, I. I. & Rakhimova Y. M. A. 1990. "Vapor-phase oxidation and oxidizing ammonolysis of some alkylpyridines on a vanadium-iron catalyst". *Kinet. Catal. Engl. Tr.*, 31 (2):428-432.
- Tauler E., Buen H., Proenza J.A., Galí S., Melgarejo J. C, Labrador M. & Marrero Y N. 2007. *Tres generaciones de serpentina en el perfil laterítico niquelífero del NE de Cuba*. MACLA • 7. XXVII.
- Tobón M., Weber M., Proenza J. A., Aiglsperger T., Betancur S., Farré de Pablo J., Ramírez C. & Pujol Solà N. 2020. "Geochemistry of Platinum-Group Elements (PGE) in Cerro Matoso and Planeta Rica Ni-Laterite deposits, Northern Colombia". *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 72 (3):A201219. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2020v72n3a201219>
- Turner L. J. & Kramer J. R. 1992. Irreversibility of sulfate sorption on goethite and hematite. *Water, Air and Soil Pollution*. Vol: 63: 23 - 32. ISSN: 1573-2932. <https://doi.org/10.1007/BF00475619>. DOI: [10.1007/BF00475619](https://doi.org/10.1007/BF00475619)
- Vasiliev A. A. & Malyshev V. V. (2013). Sensors for the ultra-fast monitoring of explosive gas concentrations. *Sensors and Actuators B: Chemical*. Vol. 189: 260-267, ISSN: 0925-4005, <https://doi.org/10.1016/j.snb.2013.07.047>.
- Verkhovtseva N. V., Lebedeva N. A. & Kanevskaya L. I. 1989. "Use of oxide of iron (III) for an intensification of biochemical sewage treatment". *J. of Water Chemistry and Technology*. Allerton Press Inc. (U. S), T.11, 6: 98-100
- Wilson M. J. 2004. Weathering of the primary rock-forming minerals: processes products and rates. *Clay Minerals*. No 39: 233-266.
- Zaccarini, F.; Garuti, G.; Proenza, J. A.; Campos, L.; Thalhammer, O. A. R.; Aiglsperger, T. & Lewis, J. F. 2011. "Chromite and platinum group elements mineralization in the Santa Elena Ultramafic Nappe (Costa Rica): geodynamic implications". *Geologica Acta*, vol. 9(núm. 3-4, sept. - dic): 407-423, ISSN: 1695-6133.
- Zenitagoya Y., Davalos J., Estrada W. & Peña V. 1996. Electrochromism in iron- oxide- based coatings obtained by sol- gel process Fifth. *Latin American Conf. on Applications of The Mössbauer Effect*. Univ. Nacional Mayor de San Marcos. Cuzco (Perú): 59.
-