EVALUACIÓN DEL POTENCIAL GEOTECNOLÓGICO DE LOS PRINCIPALES YACIMIENTOS Y MANIFESTACIONES DE MAGNESITA EN CUBA PARA LA DIVERSIFICACIÓN DE LA INDUSTRIA NACIONAL

GEOTECHNOLOGICAL POTENTIAL EVALUATION OF THE MAIN DEPOSITES AND MANIFESTATIONS OF MAGNESITE IN CUBA FOR THE DIVERSIFICATION OF THE NATIONAL INDUSTRY

Rolando Batista González [(1)], José Antonio Alonso Pérez [(2)], Alejandra Naida Hernández Martínez [(3)], Rodnie Cárdenas Meralla [(3)]

Se exponen resultados de la evaluación del potencial geotecnológico de los yacimientos de magnesita que presentan mejores posibilidades de explotación y factibilidad tecnológica en el archipiélago cubano para la obtención de productos de magnesio, a fin de preparar formulaciones de ecocementos (SOREL, NOVACEM, Eco-Cement) que permitan como contribución al desarrollo sostenible de la industria nacional y con una vocación exportadora, la producción de paneles ligeros ignífugos a mediano y/o corto plazo. La materia prima mineral que presenta mejores condiciones de infraestructura minero-civil y recursos geológicos disponibles -según balance de la ONRM del 2016-, además presentan buena perspectividad tecnológica para la producción de tales productos a partir de magnesitas, lo constituyen las menas del yacimiento “Redención” de la provincia Camagüey. Para último, se indican las acciones geotecnológicas que deben ejecutarse durante el periodo (2018 - 2020), a fin de que se elabore un nuevo proyecto conjunto entre el Instituto de Geología y Paleontología (IGP), el Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM) del MINEM y el Centro Técnico para el Desarrollo de los Materiales de Construcción (CTDMC) del MICONS respectivamente, que incluye la elaboración del proyecto correspondiente que tribute al Programa Nacional de la Geología a fin de obtener carbonato-básico y óxido de magnesio para la preparación de formulaciones de conglomerantes que permitan realizar nuevas pruebas a escala piloto que culminen en la elaboración de paneles ligeros con propiedades ignífugas y su posterior introducción en la industria de materiales de la construcción.

Palabras clave: Magnesita, carbonato básico, oxido de magnesio, paneles ligeros, materiales de construcción

It is expose the results of the geotechnological potential evaluation of the magnesite deposits with better possibilities of exploitation and technological feasibility in the Cuban archipelago to obtain magnesium products, in order to prepare Eco cement formulations (SOREL, NOVACEM, Eco-Cement) that contribute with an export inclination to the sustainable development of the national industry, the production of fireproof lightweight panels in the medium and / or short term. The ores of "Redemption” deposit in the Camagüey province are the mineral raw material that presents the best conditions of mining-civil infrastructure and available geological resources -according to the 2016 ONRM balance-, it also presents good technological perspectives for the products production from magnesites. Finally, the geotechnical actions that must be executed during the period (2018 - 2020) are shown, so that a new joint project between the Institute of Geology and Paleontology (IGP), the Research Center for the Metallurgical Mining Industry (CIPIMM) from MINEM and the Technical Center for the Development of Construction Materials (CTDMC) of the MICONS respectively, which includes the elaboration of the corresponding project that contribute to the National Geology Program in order to obtain carbonate-basic and magnesium oxide for the preparation of conglomerates formulations that allow to realize new tests at pilot scale that culminate in the elaboration of light panels with fireproof properties and their later introduction in the industry of building materials.

Keywords: Magnesite, basic carbonate, magnesium oxide, lightweight panels, building materials

Recibido: 29 de abril del 2017
Aprobado en su forma original: 23 de noviembre de 2017

(1) Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas, MICONS; e-mail: rolando@enia.co.cu
(2) Instituto de Geología y Paleontología (IGP)/ Servicio Geológico de Cuba, MINEM, San Miguel del Padrón, La Habana, Cuba, josea@igp.minem.cu
(3) Centro Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica, CIPIMM, Carretera Varona No.12028, km 1½, Boyeros, La Habana, Cuba, CP 10800, nayda@cipimm.minem.cu

INTRODUCCIÓN

El magnesio es un metal ligero y uno de los elementos químicos más abundantes en la corteza terrestre y el agua de mar. Sus compuestos se utilizan en diferentes industrias, como la metalúrgica (refractarios), química (vidrio, plásticos, fertilizantes, neutralizantes de licores ácidos, aditivos y dispersantes), la de materiales de construcción (cementos, materiales ignífugos) y la de medicamentos, por lo que a nivel mundial -entre ellos la Unión Europea- consideran al magnesio y algunas de sus menas (magnesita) como uno de los metales y materias primas críticas o estratégicas (MC, MPC), dado por el hecho de que resultan imprescindibles para el desarrollo de la industria moderna y por ello demandan un mayor protagonismo ya sea en forma metálica (Mg) o de sus compuestos (MgO, $Mg(OH)_2$, $MgCl_2$, $MgCO_3$, $MgSO_4$ y organometálicos como el reactivo Grignard, citrato, etc.) , (Schmidt M.,2012; Argiz et al, 2012; Muñoz et al, 2014).

Los mayores productores de magnesio son China con más de 500.000 t/año seguida de Canadá, Rusia y E.U.A. El precio del magnesio metálico ha alcanzado en los últimos años valores que oscilan alrededor de los 3000 USD/t (U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 2015).

Entre los usos actuales del magnesio sobresale la fabricación de aleaciones ligeras para el transporte aéreo, terrestre y marítimo, así como de equipos electrónicos y la fabricación de acumuladores de energía -baterías- pues el magnesio resulta más abundante y barato que el litio. Es de destacar que el Mg metálico se valora además como combustible espacial, (Observatorio Tecnológico del Metal, 2007; Muñoz et al, 2014).

Otro campo muy prometedor lo constituye la preparación de formulaciones de cementos ecológicos (SOREL, NOVACEM, Eco-Cement) con el fin de reducir los consumos de energía y la emisión de gases de efecto invernadero (CO_2) que tributan al desarrollo sostenible de la industria de materiales para la construcción (Argiz et al, 2012).

El uso de los compuestos de Mg como material conglomerante o cementante para diferentes industrias, principalmente en la construcción, se valora desde finales del siglo XIX, pero en la actualidad ha tomado gran auge como material electivo al cemento Portland a partir de sus implicaciones en la reducción de los consumos energéticos y la reducción de la huella de carbono (kg de emisión de CO_2 por cada kg de metal producido), convirtiéndolo en una alternativa más ecológica o verde. También los cementos a base de magnesio entran en las nuevas tecnologías de la construcción donde la industrialización prevalece, las edificaciones prefabricadas y personalizadas, listas para armar, ganan mercado por su gran versatilidad, menor costo económico -un 30% menor con respecto a las tradicionales- y bajos consumos energéticos.

A continuación se presenta un breve resumen de las principales propiedades físico-químicas de estos conglomerantes:

Cemento Sorel Este conglomerante fue patentado por el ingeniero francés Stanislas Sorel en el año de 1867 -de ahí deriva su nombre-. Su composición se basa en una mezcla de MgO y $MgCl_2$ al 20%, dando lugar a oxicloruros de magnesio hidratados, según las siguientes formulas globales en función del tiempo de fraguado del conglomerante:*(1) $MgO{\cdot}MgCl_2{\cdot}16H_2O$; (2)$10MgO{\cdot}MgCl_2{\cdot}18H_2O$; (3) $5\ MgO{\cdot}MgCl_2{\cdot}15H_2O$; (4) $3\ MgO{\cdot}MgCl_2{\cdot}x\ H_2O$; (5) $4\ Mg(OH)_2\ MgCl_2{\cdot}8\ H_2O$.*

El fraguado produce la cristalización del oxicloruro de Mg, en forma de finas agujas, dando lugar a un producto duro y resistente pero no hidráulico (630 kg/cm^2 en un día; 778 kg/cm^2 en 3 días; 791 kg/cm^2 7 días y 828 km/cm^2 a los 28 días). La superficie hay que protegerla del agua con un barniz de cera disuelta en trementina. Este conglomerante es usado principalmente en la construcción de pavimentos continuos, muelas abrasivas, madera artificial (Xilolita) y papelería ligera tipo emparedado. Este cemento brinda una apariencia marmórea y los morteros elaborados con el presentan excelentes

propiedades como aislante térmico y acústico, además son elásticos por lo que se emplean en solados y decoración interna.

La composición química promedio del cemento Sorel obtenida por Fluorescencia de rayos- X (FRX) es la siguiente: *MgO 41,19%; Cl 6,21%; Br 4,56%; CaO 1,98%; SiO_2 1,36%; Fe_2O_3 1,19%; Na_2O y SO_3 <1%, el %H_2O* es de 48,8 a una temperatura de secado de 100-110ºC.

Las materias primas para la formulación del cemento Sorel son la: magnesia (MgO), obtenida a partir del $MgCO_3$, $Mg(OH)_2$ ó $MgCO_3.CaCO_3$ por calcinación entre 800ºC-1000ºC. La presencia de Fe_2O_3 da lugar a diferentes proporciones de MgO inerte/ MgO activo. El cloruro de magnesio se obtiene fundamentalmente del mineral carnalita $KCl.MgCl_2.6H_2O$, presente en el agua de mar y lagos salinos (García Merlot, 1977).

El cemento Sorel presenta dos limitantes; ser poco resistente al agua y tener un costo superior al del cemento Portland y el yeso. No obstante a nivel mundial la fabricación y utilización de los paneles ligeros que tienen como conglomerante al cemento Sorel se encuentra en ascenso, principalmente en la región asiática e introduciéndose en América con tendencia creciente, esto se ve reflejado en varios estudios de mercado y la divulgación ofrecida por diversas compañías productoras y constructoras, dado por otras ventajas como son el bajo peso volumétrico que propicia la productividad constructiva, son ignífugos, impermeables, resistentes al ataque biológico, aislante acústico y térmico.

Estos paneles tipo “emparedado” consisten en un núcleo central de poliestireno expandido (poliesmuma), revestido por dos tableros solidos conformados por fibras vegetales o de vidrio, agregados minerales (áridos) y cemento Sorel como conglomerante.

Conglomerantes de TecEco (Argiz et al, 2012). Estos conglomerantes denominados Eco-Cement han sido desarrollados por la empresa TecEco Pty. Ltd. de Tasmania. Los principios de su fabricación son iguales a los del cemento Portland pero se reemplaza parcialmente al $CaCO_3$ por $MgCO_3$, aportando la ventaja de requerir menor energía ya que el $MgCO_3$ se disocia a menor temperatura 650-750ºC que el $CaCO_3$ 900-950ºC, por lo que se reducen los costosy se emite menos CO_2 a la atmósfera, además este Eco-Cement es más poroso por lo que permite la absorción de más CO_2 durante el fraguado.

Las resistencias mecánicas y químicas son similares a las del cemento gris, su durabilidad en ambientes con cloruros y sulfatos es aceptable, presenta menor retracción. Este conglomerante se puede fabricar en una cementera convencional. No está clara su implementación y cómo funcionan los compuestos de magnesio en el fraguado.

Conglomerante NOVACEM (Argiz et al, 2012). Este cementante ha sido desarrollado por Novacem desde el año 2007, como compañía asociada al Imperial College de Londres y tienen como base el empleo de silicatos de magnesio presentes en las rocas ultrabásicas ricas en el mineral de olivino (forsterita) como las dunitas y harzburgitas. El MgO más los carbonatos de magnesio “especial” dan lugar al Novacem.

Entre los residuos de esta producción está el silico-aluminato, que podría utilizarse en la industria del vidrio y cerámica o como puzolanas en los cementos mezclados. Otros residuos de interés lo constituyen los metales: Ni, Cr, Pt, Au, Co, Fe, Tierras Raras y otros de gran valor tecnológico y monetario.

La composición del Novacem es una mezcla única de MgO (50%-80%) y de carbonatos de magnesio hidratados Ej. $4MgCO_3$ $Mg(OH)_2.4H_2O$, que desarrollan resistencias en ambientes sin CO_2, por ejemplo bajo el agua. Aunque todavía se encuentra en fase de desarrollo dicha tecnología, la misma se puede emplear en aplicaciones con pocas exigencias mecánicas/durabilidad como albañilería y otras no estructurales, su visión-misión es la de fabricar productos estructurales al igual que el cemento Portland.

La adición de carbonatos de magnesio especiales (con cristales más grandes) presenta dos ventajas importantes: (1) Aporta

una mayor resistencia mecánica al sistema ya que modifica la química de la hidratación del cemento (fraguado); (2) Los carbonatos son sumideros netos del CO_2, por lo que se podría alcanzar una huella de carbono negativa.

La presencia de información en la Internet sobre el Novacem, desaparece después del año 2010, dejando una incertidumbre sobre su desarrollo. En la figura 1 se presenta un ejemplo de la fabricación de estos paneles ligeros producidos por la firma comercializadora Innova-House S.A.



Figura 1. Paneles ligeros ignífugos construidos por la firma Innova-House S.A.

Por lo anterior y teniendo en cuenta que las menas de magnesio constituyen una materia prima mineral crítica para el desarrollo de las nuevas tecnologías constructivas, principalmente en Cuba como conglomerante o cemento (ecológico, verde o con baja huella de carbono), y a pesar de que el país cuenta con recursos potenciales de minerales magnesiales se plantea como problema a resolver por esta investigación la siguiente: *¿Son capaces dichos recursos de soportar una producción del orden de las 150-200 mil t/año para la fabricación de este tipo de ecocementos que permita el desarrollo de tecnologías para la elaboración de paneles ligeros?.*

Atendiendo a lo antes expuesto el objetivo principal del trabajo es: *Valorar las potencialidades geotecnológicas que presenta el territorio cubano para localizar y explotar menas de magnesita. De lo cual se desprende: Delimitar los sectores o depósitos de menas de magnesita que resulten más perspectivas para efectuar trabajos de prospección, exploración y pruebas tecnológicas.*

Teniendo en cuenta la problemática se plantea como hipótesis de investigación la siguiente: *"Si se evalúa el potencial del territorio cubano para localizar y explotar menas de magnesita, se posibilitará de que se realicen investigaciones geotecnológicas que permitan la diversificación de la industria nacional.*

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La magnesita. Potencialidades geológicas (Martínez Salcedo et al. 1994).

La magnesita es una roca sedimentaria, tipo evaporita, compuesta principalmente por $MgCO_3$, formada de manera natural por la precipitación de este mineral por desecación de aguas saturadas en Mg. Los depósitos de magnesita también se forman por procesos residuales y de infiltración, a partir de la

meteorización de rocas ricas en magnesio, principalmente las ultrabásicas como dunitas y harzburgitas, las cuales se destruyen y liberan el Mg el cual se combina con el CO_2 atmosférico. Como compuestos base MgO, la magnesita se usa preferentemente para refractarios y como fuente de Mg para aleaciones, los recursos mundiales identificados ascienden a 12 mil millones de toneladas (U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 2015).

Tipos genéticos de yacimientos (Martínez Salcedo et al. 1994).

Magnesita cristalina (hidrotermal-metasomático). A expensas de dolomita, calizas, esquistos arcillosos, arenosos, y grafito, por tanto formaciones antiguas que sufrieron orogenia y magmatismo (100-200^{0}C) e intrusiones ácidas a medias.

Magnesita compacta (hidrotermal). A expensas de la extracción del Mg con dióxido de carbono hidrotermal que se desprende producto de las reacciones de serpentinitización a partir de ultrabasitas. Depósitos en grietas. Temperaturas bajas, por tanto profundidades no mayores de 200m y zonas tectonizadas. Otras (meteorización-infiltración) a expensas de la extracción del Mg con dióxido de carbono atmosférico de serpentinitas. Depósitos cerca de superficie como películas.

Magnesita sedimentaria (en lagunas marinas o lagos salobres). A expensas del aporte de magnesio al depósito. En lagos dulces a expensas de aporte de magnesio de serpentinitas meteorizadas o de soluciones calientes volcánicas.

En la figura 2 se presenta la ubicación geográfica de los principales yacimientos y manifestaciones de magnesita en Cuba.



Figura 2. Principales yacimientos y manifestaciones de magnesita de mayor interés en el país.

Mineragenia de los yacimientos cubanos de magnesita (Martínez Salcedo et al. 1994).

Los yacimientos de magnesita en Cuba se vinculan a dos Zonas-Estructuro-Mineragénicas (ZEM) principales: (1) la Cobertura del Plioceno-Cuaternario. Esta se corresponde a su vez con dos Sub-zonas Estructuro Mineragénicas (SZEM) a saber: (1) la areno-arcilloso-conglomerática (Fm. Cauto) y (2) la areno-arcillosa-ocrosa (eluvio sobre ofiolita). Por último se menciona la ZEM de la Cobertura del Paleógeno Medio al Neógeno Tardío que se asocia a la SZEM carbonatado-arcillosa de la Fm. Vázquez.

Los depósitos de magnesitas para el tipo genético residual se distribuyen en los mantos eluviales que se formaron a expensas de la meteorización de rocas ultrabásicas serpentinizadas. Aparecen en la zona basal de la corteza de meteorización por infiltraciones causadas por procesos de alteración de la serpentinita. La magnesita es de color blanco a

gris y forma cuerpos regulares, lentes, nidos, vetas y nódulos de tamaños variables. La materia prima es compacta de aspecto aporcelanado, blanda y a la vez porosa. Generalmente tiene alta pureza pero tiene contenidos variables de óxidos de hierro a medida que aumentan los procesos de meteorización en su posición hacia la superficie. La composición química porcentual promedio para la magnesita es la siguiente: CO_2: 51,74-52,2%; MgO: 47,09-47,8%; FeO: 0,60%; MnO: 0,67 y CaO: 0,07%.

Los yacimientos y manifestaciones de magnesita en el país presentan una distribución restringida a las regiones del norte de Camagüey, cerca de Minas, siendo mucho menos abundante en el macizo ultrabásico del centro de Cuba y en las provincias orientales.

Los objetos geológicos de magnesita en Cuba representan el 0.5 % del volumen total de las materias primas minerales no-metálicas del país. Por sus características, los tipos genéticos representativos son el residual y sedimentario, siendo el primero el que mayor cantidad de objetos agrupa. El contenido de MgO se considera relativamente bajo, producto de la desintegración y la redeposición de la magnesita y su incipiente transformación en arcilla magnesítica blanca. Los valores de $MgCO_3$ son altos, pero también lo son los de SiO_2 (12.79%), lo que hace necesario el beneficio de las menas.

Ocurrencias tipo y regularidades geólogo-estructurales de las magnesita (Martínez Salcedo et al. 1994).

Tipo genético: Sedimentario; Zona- Estructuro-Formacional: Cobertura del Paleógeno Medio al Neógeno Tardío (P_2-N_2); formación geológica: Carbonatado-arcillosa (Complejo terrígeno-lagunar hasta el terrígeno-evaporítico) (P_2-N_2); formación litoestratigráfica**:** Vázquez (N_1^{1-2}); Facies: Calizas órgano-detríticas, margas y arcillas (asociación de magnesitas clásticas de grano fino con arcillas bentoníticas y capas de paligorskita sedimentaria) ($N1^{1-2}$).

Litología. Se compone por magnesita, compacta, masiva, color blanco, blanco-verdoso o amarillento, mezclada con dolomita, paligorskita y esmectita. Presenta mucha variabilidad litofacial tanto vertical como horizontal, los sedimentos magnesianos se hallan mezclados con sedimentos terrígenos formando capas y lentes. Las rocas útiles están encajadas en sedimentos paligorskítico-monmorilloníticos de estratificados a masivos. Acumulación típica: Redención; ubicación geográfica: CUBA SUR X: 420800-422600 Y: 305600-307500 (Camagüey); ubicación geológica: Mioceno Temprano – Transgresivo. Cuencas poco profundas que cubren rocas preoligocénicas. Durante el Mioceno Inferior Medio predominó la subsidencia y en el Superior la emersión, por tanto la cuenca Samaraguacán hereda su configuración del plano estructural del Eoceno Medio Tardío (después de haberse depositado las formaciones Maraguán y Samaraguacán).

Constitución geológica y estructuro-formacional del depósito Redención (Martínez Salcedo et al. 1994).

Local. La Fm. Vázquez es portadora de mineralización magnesítica, Mbro. arcilloso-magnesiano (N_1^{1-2}).

La Fm. Vázquez yace hacia el sur transgresiva y discordante sobre las Fms. Maraguán y Samaraguacán, de Edad Eoceno Medio-Superior, al norte yace similarmente sobre las ofiolitas y sobre la Fm. Piragua, por ello la cuenca Samaraguacán (contenedora de la Fm. Vázquez) desde el Eoceno Superior emerge todo el Oligoceno para a principios del Mioceno subsidir y depositarse durante el Mioceno Inferior Medio la secuencia Vázquez en aguas de baja salinidad.

Se infiere que la cuenca Samaraguacán debe tener profundidad mayor de 700m, pero por datos reales (pozos) a los 447m aún no se había cortado su fondo, por geofísica no se pudo identificar las curvas pero la mineralización magnesial como horizontes se hallan intercalados con las arcillas verdoso-grisáceas y en menor grado con las pardo-rojizas con potencias pequeñas de lentes

areno-gravosos- serpentiníticos hasta la profundidad de 210m. En general la Fm. Vázquez por su granulometría y composición química se divide en dos miembros: 1. Arcilloso-magnesiano y 2. Arenoso-gravoso.

Miembro arcilloso-magnesiano (N_1^{1-2}). Constituye el 70% del volumen del corte y en él se distinguen 3 grupos: (1) arcillosos, (2) carbonatados y (3) magnesianos. Los arcillosos lo componen arcillas de colores que van del pardo al rojo, el gris verde-verde azuloso, abigarrado y las arcillas magnesianas. Por su parte en el grupo de los carbonatados predominan las margas, lentes de poca potencia con aproximadamente el 3% del volumen del corte apareciendo a partir de los 392m de profundidad. A su vez en el grupo de los magnesianos yacen entre las arcillas existiendo intercomunicación entre las capas superficiales y profundas. Las magnesitas tienden a acercarse a la línea de las rocas magnesianas-arcillas mientras que los cortes que no tienen o si trazas que se agrupan en la línea arcillas-clastitas indicando que la mineralización magnesítica se relacionó en la cuenca a los lugares donde se depositaban arcillas.

Miembro areno-gravoso (N_1^{1-2}). Lo constituye el 30% del corte que se subdivide en 5 grupos: (1) limo; (2) arcilla arenosa-arena; (3) arcillosa-arena; (4) grava-guijarros y (5) arena-grava-guijarros. La composición es generalmente serpentinítica y también gabroides, rocas silíceas y quizás otros tipos rocosos, con colores verdoso, gris oscuro a casi negro, miembro friable y poco cementado.

El techo general del cuerpo del depósito tiene cierta inclinación hacia el NE, existiendo entre este y el sur oeste -más levantado- una diferencia de 60-70m que se hace más potente en el piso del yacimiento, lo que indica una configuración heredada del Eoceno. Se considera que no es un yacimiento isotrópico y no presenta actividad volcánica, ni alteraciones secundarias o efectos tectónicos que compliquen los cuerpos, alta variabilidad litológica y facial en área y corte, el espesor de intercalaciones es mayor al SW que al NE, dando gran variabilidad a los espesores útiles.

Se considera como un yacimiento de complejo a muy complejo por la variabilidad facial horizontal y vertical de interstratificaciones muy complicadas de sedimentos magnesiales con otros no-magnesiales, intercrecimiento con otros minerales (la masa rocosa útil), por geofísica de superficie no se pudieron seguir estructuras sedimentarias determinadas (SEV), tecnológicamente varía mucho la calidad (mezclas de carbonatos, magnesita + dolomita, de aluminosilicatos hidratados complejos del tipo paligorskita y esmectitas) entre otros, por dicho motivo resulta imposible delimitar un lente o capa del tipo natural (I) ni en planta, ni en perfil; todo es grupo (II).

Criterios e índices de búsqueda y pronóstico (Martínez Salcedo et al. 1994).

Criterios de primer orden: estructural, litológico y estratigráfico.

Estructural: Yacimiento en cuenca tipo graben (Saramaguacán), de amplia subsidencia, colectora de sedimentos terrígenos y carbonatados provenientes de serpentinitas, calizas y margas.

Litológico: Sedimentos terrígenos – carbonatados representados en la Fm. Vázquez contenedora-portadora de capas y lentes interdigitados de sedimentos magnesiales provenientes de la meteorización de las ofiolitas.

Estratigráfico: Capas productivas asociadas a las facies arcillosa-magnesial de la Fm. Vázquez (N_1^{1-2}) no sobrepasando la mineralización la profundidad de los 220m.

Criterio de segundo orden: Paleogeográfico. Durante la época de formación de la cuenca (Eoceno Medio Tardío) de amplia subsidencia, existió un ambiente lagunar epicontinental asociado a una zona de relieve colinoso a semi-llano que corresponde a rocas serpentiníticas y terrígeno-carbonatadas hasta carbonatadas, surcándose el terreno por abundantes corrientes fluviales, vías de transporte para el material meteorizado y/o lixiviado de los macizos colinosos, redepositándose en dicha laguna

epicontinental, no lejos de la fuente de suministro.

Índices directos: Canteras grandes y pequeñas desde la década del 40, testigos de perforación y documentación que datan del año 1963.

Índices indirectos: Trabajos geofísicos de potencial espontáneo (mínimos bien definidos), resistividad que corresponden con mínimos de resistividad en las áreas con magnesitas.

Aspectos hidrogeológicos (Martínez Salcedo et al. 1994).

Desde este punto de vista el estrato acuífero comprende lentes con arenas, gravas, arcillas, magnesitas y rocas con mezclas en proporciones variables de arcillas, limos, arena y gravas, como todo está relacionado en mayor o menor grado horizontal y verticalmente éste es un acuífero único de baja permeabilidad (alto contenido de arcillas) y a presión, existe relación entre el movimiento de las aguas subterráneas y la morfología de la zona, las condiciones hidrogeológicas simples. Los valores de transmisibilidad coeficiente de filtración y caudales son bajos.
La composición química de las aguas es clorurada-bicarbonatada-magnésico-sódica, bicarbonatada - clorurada- magnésico-sódica y clorurada-bicarbonatada-sódica-magnésica.

Las aguas se consideran agresivas hasta llegar a la zona mineral ya que dentro de ésta no lo son. Afluencia subterránea al yacimiento 304 m^3/día.

Alteraciones secundarias. No existen alteraciones secundarias visibles.

Evaluación cualitativa de la materia prima.

En las tablas 1 y 2, se presentan los componentes químicos mayoritarios para las menas de magnesita del yacimiento Redención y los que caracterizan los diferentes tipos litotecnológicos

Tabla 1. Composición química promedio (en %) de los cuerpos minerales de magnesita "Redención" (Martínez Salcedo et al., 1994; Batista González y otros, 2016).

Muestra	MgO	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	Na_2O	K_2O	PPI
C. Superficial	33.94	2.26	15.96	1.68	1.44	0.89	0.15	39.69
C. Principal	36.13	4.26	12.23	1.29	1.08	-	-	41.39
C. Principal	38.46	4.35	9.26	1.19	1.04	-	-	43.40

Tabla 2. Intervalos de composición química por tipos tecnológicos de menas del yacimiento "Redención" (Martínez Salcedo et al. 1994; Batista González y otros, 2016).

Tipo litotecnológico	MgO (%)	PPI (%)	CaO (%)	SiO_2 (%)	Fe_2O_3 (%)
Tipo I	> 40,0	> 47,00	< 2,99	< 6,00	-
Tipo II	39, 99 - 35,00	45,00 - 46,99	4,49 - 3,00	6,00 - 8,00	-
Tipo III	34, 99 - 30,00	40,00 - 44,99	5,49 - 4,50	8,00 - 10,00	-
Tipo IV	29, 99 - 19,00	35,00 - 34,99	7,00 - 5,50	10,00 - 12,00	-
Tipo V	< 18, 99	< 35,00	> 7,00	>12,00	-
Todo el yacimiento	37,31	-	4,85	9,94	-

Dada la composición química que se observa en la tabla anterior, existe predominio en el yacimiento del tipo tecnológico (II), alcanzándose buenos tenores de MgO y PPI en el producto beneficiado por calcinación previa del mineral.

Composición mineralógica. (1) Magnesita (fase mayoritaria); dolomita y calcita (menor cuantía); (2) mezcla de arcillas (paligorskita, montmorillonita y clorita). Otros (cuarzo, óxidos de hierro tipo goethita y hematita).

En la figura 3 se presenta el termograma CDB de una muestra tecnológica tipo (I) de la magnesita de este yacimiento. Se distingue en primer lugar, el intenso efecto endotérmico característico de la disociación del carbonato en CO_2 de la estructura del mineral magnesita a una temperatura de 600^0C. Se aprecian además efectos térmicos -de menor intensidad- asociados a impurezas arcillosas (paligorskita, montmorillonita, clorita), así como a carbonatos (dolomita y calcita en menores contenidos.

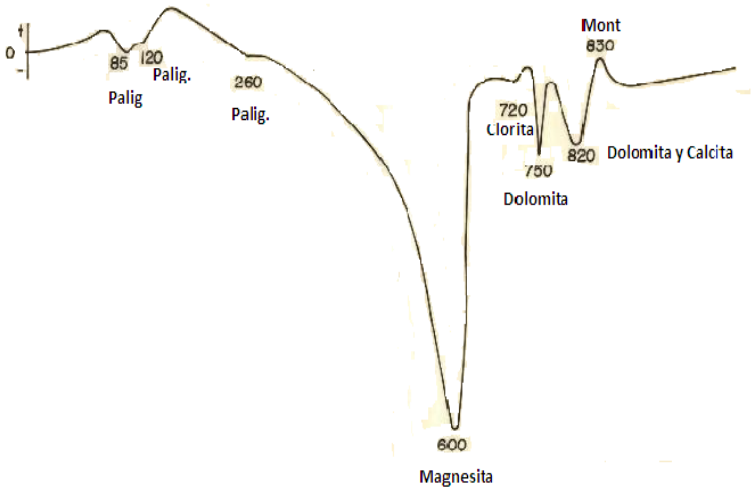


Figura 3. Termograma de Calorimetría Diferencial de Barrido (CDB) de la muestra tecnológica tipo (I) de magnesita del yacimiento "Redención" ***(Tomado de: Hernández-Martínez y Cárdenas-Meralla, 2016)***

Nota: Los valores de temperaturas pico de los efectos térmicos se expresan en grados celcius; Convenio de signos: (+) exotérmico, (-) endotérmico.

Aspectos técnico-mineros (Martínez Salcedo et al. 1994).

Espesor útil mínimo: 1 metro/pozo; 2 metros/bloque, sin relación de cubierta útil por la profundidad de la mineralización en los diferentes cuerpos que oscila entre 36-73m y de 143-156m, además se consideran como estériles aquellos que no cumplen con el quimismo. El contenido de borde se fija en la clase II (límite inferior). El yacimiento comprende el Cuerpo Principal, Superficial y la Cantera respectivamente.

Grado de estudio (Martínez Salcedo et al., 1994).

En el área se realizaron levantamientos geológicos a escalas 1:250 000 y 1:50 000, además se han ejecutado diferentes estadios y exploraciones geológicas.

Por otra parte, sobre las magnesitas de "Redención" se conocen varias investigaciones tecnológicas, con el fin de beneficiar dicha materia mineral e incrementar su valor agregado (añadido).
En general las potencialidades de localizar otros yacimientos similares son limitadas, se

han efectuado varias prospecciones en distintas localidades de Cuba con resultados poco alentadores.

Otras ocurrencias de manifestaciones y yacimientos de magnesita en Cuba de génesis infiltración- residual formados sobre peridotitas (Martínez Salcedo et al. 1994).

Zona Estructuro- Formacional: Cobertura del Plioceno Cuaternario (N_2-Q_{IV})

Formación Geológica: areno-arcilloso-ocrosa (Complejo terrrígeno-continental) (N_2-Q_{III})

Facies: arcillas, arenas arcillosas y ocres, a veces harpan, eluviales, sobre rocas ofiolíticas (asociación de cortezas lateríticas sobre ofiolitas de la ZEF. Oceánico con mineralizaciones de cuerpos irregulares de magnesita densa) (N_2-Q_p).

Eluvios lateríticos con infiltraciones de magnesitas en su base (N_2-Q_p)

Acumulaciones típicas (Martínez Salcedo et al. 1994).

Depósito Olalla (Camagüey). Presenta aspecto aporcelanado en forma de nódulos y vetas de tamaño pequeño. La magnesita es de alta pureza a pesar que de sus recursos son pequeños, pudiera emplearse en usos especiales (farmacéuticos, refinación de azúcar) dado por la factibilidad de su extracción minera. Se estimaron 27.000t en Categoría Pronóstico. En la tabla 3 se presenta la composición química de este depósito de magnesita.

Tabla 3. Composición química promedio (% en peso) del depósito "Olalla" (tipo genético de infiltración- residual) formados sobre peridotitas (Martínez Salcedo et al. 1994; Batista González y otros, 2016).

Lugar de muestreo	No.	MgO	CaO	$MgCO_3$	$CaCO_3$
Borde Este de la cantera	1001	46.81	0.73	98.30	1.30
Borde Oeste de la cantera	1002	46.42	1.10	97.50	1.96
Nódulo en la trinchera No. 4	1003	45.90	0.98	96.40	1.76
Pozo criollo No.1	9776	45.65	2.51	95.41	4.46
Pozo criollo No.2	9777	46.28	1.67	96.73	2.97
Pozo criollo No.3	9778	44.61	3.59	93.23	6.39
Promedio	-	45.94	1.76	96.26	3,14

Depósito "Sin Reposo" (provincia de Camagüey). La magnesita presenta aspecto aporcelanado, de color blanco, es blanda y porosa o de color sucio hasta arena. El valor relativamente bajo de MgO se origina en la desintegración y redeposición de la magnesita cuya transformación incipiente lo constituye una arcilla magnesítica blanca. El valor alto de la sílice impide la utilización del material para usos exigentes sin previo beneficio. Se estimaron 25.500t en Categoría Pronóstico. En la tabla 4 se presenta la composición química de este depósito de magnesita. En este depósito se reporta (año 1963) una extracción de 1500t para la industria azucarera, con 35,15-42,41% MgO [(7)].

Tabla 4. Composición química promedio del depósito "Sin Reposo" (Martínez Salcedo et al. 1994; Batista González y otros, 2016).

Lugar de muestreo	Intervalo (metros)	% MgO	% CaO	% SiO_2	% Al_2O_3	% Fe_2O_3
Pozo criollo No.21	0.5 - 1.5	41.05	1.18	9.32	1.05	2.36
Pozo criollo No.19	0.5 - 1.5	39.84	1.34	11.85	1.33	2.99
Pozo criollo No.18	0.5 - 1.4	39.20	1.47	14.10	0.87	1.66
Pozo criollo No.17	0.5 – 1.0	39.87	1.36	12.26	1.50	1.53
Pozo criollo No.15	0.3 – 0.9	42.41	1.36	8.01	0.60	1.16
Pozo criollo No.12	0.5 – 0.9	41.88	1.34	7.94	0.44	1.31
Pozo criollo No.9	0.5 – 1.0	39.20	1.35	13.14	1.15	2.73
Pozo criollo No.8	0.2 – 1.4	39.50	1.17	12.40	1.39	2.53
Pozo criollo No.6	0.2 - 1.3	38.95	1.18	13.96	1.04	2.50
Pozo criollo No.4	0.5 – 1.4	36.50	0.52	19.05	1.22	2.60
Pozo criollo No.3	0.5 – 1.8	35.15	0.71	21.40	1.48	3.33
Pozo criollo No.2	0.3 – 1.3	37.95	0.79	17.40	0.70	2.13
Pozo criollo No 1	0.3 – 1.3	41.57	0.59	9.40	0.59	2.53
Pozo criollo No 1	1.3 – 1.9	42.24	0.59	6.35	0.58	2.00
Promedio	**-**	**39,40**	**1.11**	**12.79**	**1.10**	**2.24**

Yacimiento "Las Minas" (Villa Clara). Se ubica en las cercanías de la ciudad Santa Clara, provincia Villa Clara. Esta materia prima mineral es una magnesita de color blanco-amarillento, aspecto terroso que aflora en forma de concreciones muy irregulares. A veces se presenta amorfa, compacta, dura y aporcelanada. Yace en forma de bolsón dentro de las serpentinitas. Se explotó en el pasado, sus posibilidades de explotación actual están muy comprometidas, el área esta urbanizada. En la tabla 5 se presenta la tabla resumen de la composición química de este depósito de magnesita.

Tabla 5. Composición química promedio del depósito de magnesita "Las Minas" del tipo genético de infiltración-residual formado sobre peridotitas (Batista González y otros, 2016).

Depósito	% MgO	% PPI	% CaO	% SiO_2	% Al_2O_3	% Fe_2O_3
Las Minas	40,80	43,90	2,57	8,46	2,02	1,46

Manifestación "Finca Dr. Artiles" (Villa Clara). En el macizo serpentinítico del sur de Villa Clara, en lugares cubiertos por vegetación y suelo, se localiza esta manifestación, la cual consiste en pequeños cuerpos de magnesita que fueron explotados en pequeñas excavaciones de forma artesanal por los antiguos propietarios. La magnesita es de la variedad amorfa y forma concreciones arriñonadas que dan lugar a lentes y pequeños

cuerpos irregulares. Los cuerpos de magnesita fueron prácticamente extraídos en su totalidad dentro del área de la manifestación, siendo muy difícil encontrar buenas muestras en los restos de las cavas aquí existentes. No tiene estudio geológico.

Manifestación "La Paloma" (Villa Clara). Los restos de excavaciones dentro de las serpentinitas del macizo al sur de Santa Clara, son los únicos testigos de esta manifestación de magnesita. Por algunos fragmentos y datos de informes antiguos se sabe que la magnesita es de la variedad amorfa que forma cuerpos en forma de mantos, lentes o cuerpos irregulares que seguían la línea del contacto entre diques ígneos y las serpentinitas. Por lo general se observan fragmentos de dos tipos tecnológicos de magnesitas; una variedad muy pura superficial y otra mezclada con serpentinita que se encuentra a una mayor profundidad. La manifestación fue explotada casi totalmente y abandonada. No tiene estudio geológico.

Manifestación "La Yagruma" (Villa Clara). Es del tipo similar a las dos anteriores, es decir, son pequeños cuerpos de magnesita arriñonada y mezclada con serpentinita que forma mantos, lentes y cuerpos irregulares en las serpentinitas del macizo del sur de Santa Clara. Fueron explotadas y abandonadas. Actualmente es imposible encontrar el lugar donde se extrajo tal o más cual tipo de magnesita o precisar su cantidad por el tamaño del afloramiento.

Manifestación "Los Grillos" (Villa Clara). En esta localidad, ubicada dentro del macizo serpentinítico del sur de Santa Clara, existen restos de pequeñas canteritas de poca profundidad, donde hace mucho tiempo se explotó magnesita y luego fueron abandonadas (10 lugares en total).

La magnesita se presenta en forma de pequeños lentes de 1,0-1,5m de espesor y varios metros de largo dentro de las serpentinitas. Respecto a las manifestaciones de magnesita reseñadas anteriormente, cabe plantear algunas consideraciones de carácter general, como son el hecho de que en los años 1939-1940 fueron explotadas varias manifestaciones de magnesita en las fincas Las Palmas, Dr. Artiles, La Yagruma y otras, las cuales llegaron hasta la profundidad de 3m como máximo, extrayéndose un total aproximado de 20.000t de magnesita de buena calidad.

Todos los cuerpos explotados eran pequeños, de forma irregular y con una distribución bastante irregular dentro de las serpentinitas, aunque a veces parecían seguir el contacto de las serpentinitas con los diques que la atraviesan. Prácticamente fueron extraídos todos los cuerpos localizados.

Las perspectivas de la formación de cuerpos mayores con la profundidad no están claras. Precisar este aspecto por medios geofísicos sería posible aunque dependería de muchos factores, por ejemplo, su génesis. Al respecto, al parecer se debe a los procesos de la infiltración del magnesio producto de los procesos de lixiviación de dicho elemento a partir de las serpentinitas y su acumulación en las partes inferiores del manto de meteorización. Es precisamente por este aspecto genético por lo que sus posibilidades hacia la profundidad se consideran muy limitadas.

En general, para este tipo genético de depósitos las potencialidades son muy restringidas, es decir, sus recursos solo se consideran con limitado interés industrial, pues constituyen pequeños bolsones dentro de las serpentinitas, sin embargo estos se pudieran utilizarse en aquellos usos en que no se demanden grandes volúmenes de materia prima magnesita. Se destaca que el mineral es de muy buena calidad -sobre todo la del depósito "Olalla"- tal como lo demuestran los altos contenidos porcentuales de MgO (tabla V). Con relación a su posible uso la magnesita de este yacimiento se utilizó en la refinación de azúcar en los centrales y para aglutinar el crisol de los hornos en la metalurgia, reportándose una extracción de 2000t con 45,95% MgO [(10)].

Provincias orientales.

Se mencionan 5 localidades con mineralización de magnesita, las cuales representan dos tipos genéticos bien

diferenciados; el exógeno y el típico sedimentario.

Fm. Cauto: Puntos de interés; Cayo Rey y El Guayabo. Se corresponden al tipo genético sedimentario redepositado, a partir de acumulaciones pre-existentes. No presentan interés para la búsqueda de yacimientos industriales de esta materia prima.

Eluvios (infiltración-residual) sobre ofiolitas (peridotitas). Puntos Trocha, Piedra Gorda y Río Sojo. Representados por vetillas de magnesita amorfa, de algunos centímetros de espesor, desarrolladas en las serpentinitas trituradas del macizo Ofiolítica. En general, este tipo genético no da lugar a concentraciones industriales de consideración, conociéndose hasta el momento en otras regiones del país, solo pequeños cuerpos de magnesita muy pura, de forma de nidos, bolsones y cuerpos irregulares dentro de las serpentinitas.

Tecnología disponible en Cuba para el procesamiento de la magnesita (Granda, 1982; Hernández, et al. 1991; Hernández y Cárdenas, 2016)

Para las menas de magnesita, la tecnología por vía química mediante la lixiviación de mineral con ácido carbónico a presión (en autoclave), propuesta con sus adecuaciones pertinentes por Hernández-Martínez y Cárdenas-Meralla (2016) y desarrolladas en el CIPIMM durante diferentes períodos investigativos que van desde el año 1982 hasta el 2016 para el tratamiento de las menas del yacimiento "Redención", a fin de obtener como producto intermedio carbonato-básico de magnesio y como producto final óxido de magnesio por calcinación finalmente, se considera como adecuada tanto desde el punto de vista económico, técnico como ambiental para el procesamiento de menas de magnesita de este tipo.

En la figuras 4 y 5 se presentan el flujograma de la tecnología propuesta por Hernández-Martínez N y Cárdenas-Merralla R (2016). En la tabla 6 se exponen además los resultados de la evaluación económica y ambiental respectivamente.

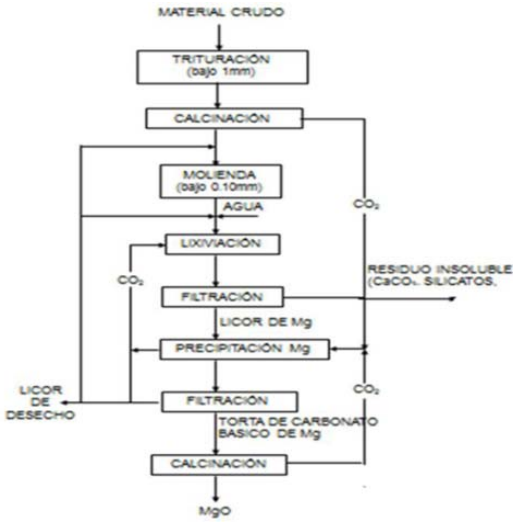


Figura 4. Flujograma de la tecnología de lixiviación a presión con ácido carbónico (LAPMAG) para el procesamiento de la magnesita del yacimiento "Redención" (Fuente: Hernández-Martínez et al. 1991; Hernández-Martínez y Cárdenas-Merralla 2016)

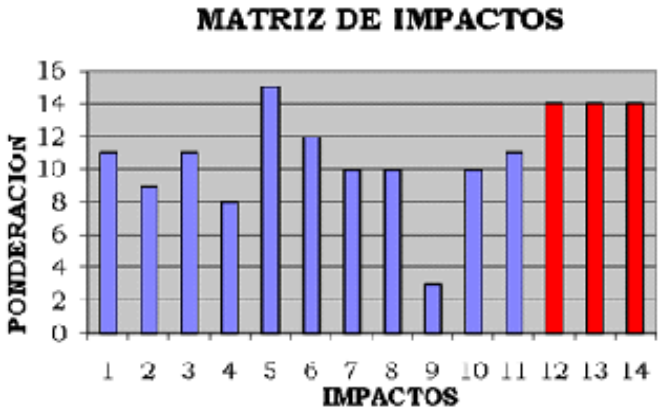


Figura 5. Resultados de la evaluación de impacto ambiental de la magnesita "Redención"; (en color rojo los positivos, negativos color azul) (Fuente: Hernández-Martínez y Cárdenas-Merralla 2016).

Tabla 6. Resultados del análisis de factibilidad económica de la tecnología de lixiviación con ácido carbónico para la magnesita "Redención" *(Fuente: Hernández-Martínez y Cárdenas-Merralla 2016)*.

Valor de la inversión (MT)	Período de recuperación de la inversión (años)	Rendimiento promedio inversión (%)	VAN (MT)	TIR (%)
18 372 566,4	3,2	31	4 283 461,8	29

Con relación a los impactos negativos dichos autores consideran que se pueden resolver mediante acciones sencillas de mitigación ambiental.

Por lo expuesto, se plantea incluir dicho objetivo en la cartera de oportunidades de negocios del Grupo GEOMINSAL dado por las posibilidades de su generalización para la obtención de ecocementos, la posible sustitución de importaciones y como fuente de futuras exportaciones.

CONCLUSIONES

1. En general las potencialidades para localizar nuevos depósitos de magnesita son limitadas, no obstante con los recursos identificados en el yacimiento "Redención" es suficiente satisfacer las necesidades nacionales actuales, las cuales han estado muy deprimidas durante los últimos lustros para los usos en los que tradicionalmente se utilizaron las magnesitas cubanas (refractarios y agricultura).

2. El óxido de magnesio reactivo y ligero se obtiene del carbonato básico de Mg que se produce a partir de la magnesita "Redención" (mineral portador de magnesio) semicalcinada y procesada por la tecnología de lixiviación con ácido carbónico a presión y calcinación final a 600^{0}C, tecnología que resulta factible desde el punto de vista económico, técnico como ambiental para el procesamiento de tales menas.

RECOMENDACIONES

1. Se propone elaborar un nuevo proyecto para la ejecución de un nuevo proyecto conjunto (I+D) para el período (2018-2020) entre las instituciones CIPIMM, IGP, CTDMC e ICIDCA, a través de financiamiento del Programa Nacional de la Geología, con el objetivo de obtener concentrados de carbonato básico de magnesio y MgO que se utilizarán en la preparación de formulaciones de conglomerantes (SOREL, NOVACEM), para ello se precisa se realicen algunas acciones complementarias previas:

    a. Toma de muestra tecnológica de magnesita (tipo I) y realizar pruebas a escala piloto con la tecnología LAPMAG, a fin de obtener carbonato-básico de magnesio y MgO con las calidades requeridas.

    b. Preparar diferentes formulaciones de cemento SOREL en el CTDMC, a fin de optimizar las dosificaciones de fraguado de las mezclas (MgO + $MgCl_2$).

    c. Confeccionar prototipos de paneles ligeros a escala experimental y piloto, con las dosificaciones óptimas de cementos magnesiales y agregados (proceden de los residuos o finos de las plantas procesadoras de minerales industriales) instaladas en el Grupo Geominsal y/o algunos de sus yacimientos: (1) “Tasajeras”, “San Andrés”, “San José del Chorrillo”; (2) vidrio volcánico (yacimiento “Guaramanao"); (3) carbonato de calcio de la planta Jaruco (calidad IV), ensayos que deben ejecutarse en instalaciones del CTDMC durante el desarrollo del nuevo proyecto.

De resultar positivas las acciones tecnológicas que se indican, se propone un nuevo proyecto geológico a ejecutarse por la Empresa GEOMINERA Camagüey en el período 2025-2030, destinado a la Exploración Complementaria del yacimiento “Redención”, con vistas a elevar de Categoría los Recursos Inferidos (del orden de los 25 millones de toneladas o más) a Indicados y Medidos respectivamente, cuestión importante dado por el posible incremento de la demanda de productos de magnesio para este uso que pudiera tributar a la industria de materiales de la construcción a mediano plazo

BIBLIOGRAFÍA

Argiz, C.; Menéndez, E.; Moragues, A.; Sanjuán, M.A. 2012. Análisis de nuevos conglomerantes para su utilización en infraestructuras civiles. Artículo Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 12(2) 245. España.

Batista González R. y otros. 2016. Sistema Informativo para los Recursos Minerales de Cuba. INFOYAC: Actualización 2016. Base de Datos. IGP

García Merlot, A. 1977. Tecnología de la sal marina. Ministerio de Minería y Geología. La Habana. 247-248p.

Granda O. 1982. Procedimiento hidrometalúrgico para la obtención de MgO a partir de materias primas de magnesita. Certificado de autor de Invención, No. 21037.

Hernández Martínez A.N.; Granda O; Infante G.; Alfonso R.; Hernández J. y otros. 1991. Estudio para la tecnología de obtención de óxido de magnesio refractario a partir de magnesita Redención. II Simposio Internacional de Minería y Metalurgia, MINEMETAL-91, Tomo I, Palacio de Convenciones, 20-22 Nov.

Hernández Martínez A.N; Cárdenas Meralla R. 2016. Materias primas, tecnología y productos de magnesio en Cuba. Memorias II Congreso Internacional de Minería y Metalurgia, MINEMETAL 2016, Sesión: Explotación Minera y Desarrollo de la Minería, PQM-P76A.

Martínez Salcedo J.; Pérez Nevot N.; Ponce Seoane N.; Batista González R.; González Rodríguez M.E.; Bravo Patterson F.; Delgado B. 1994. Pronóstico de materias primas no-metálicas no tradicionales de la República de Cuba. Informe Final. Tema 2013. IGP.

Martínez Salcedo J.; Pantaleón Quintero G.; Coutín Correa D.P.; Pérez Nevot N.; Torres Zafra J. L.; Batista González R.; Rueda López G.;

Sosa Sayas D. 1997. Reevaluación de las materias primas no-metálicas para la diversificación de la producción nacional. Informe final. Tema 206. IGP.

Muñoz, I.; Santos Akkari, A.C.; Santos, N.; Tomioka, J.; Santos, R.; Knupp, J.L.; Fukunaga, F.; Macedo, V.; Schiller, M.; Santos, T. 2014. Prospección Tecnológica de Baterías de Magnesio (en portugués).

Observatorio Tecnológico del metal, OTEA. Estado del arte de las aleaciones ligeras y sus aplicaciones 2007. Instituto Tecnológico Metalmecánico. Valencia. España. pág. 15-19.

Pons Herrera J.A.; Leyva Rodríguez C.A; Ramírez Pérez M.C.; Kulachkov L.V.; Salazar Moreno.; González Pontón R.; Alemán Trotman I. s.a. Perspectivas de Cuba en la producción de materiales refractarios básicos; [en línea] http//*www. monografías.com.* [consulta: 1 feb. 2017]

U.S. Geological Survey, Mineral commodity summaries 2015. Magnesium compounds, pag. 97 - 98. Schmidt M. 2012. Resource efficiency – what are critical metals and how scarce are they? Electronic Displays. Conference.