

Caracterización química y mineralógica del pasivo ambiental generado por la minería del mármol en Namibe, Angola

Chemical and mineralogical characterization of the environmental liabilities generated by marble mining in Namibe, Angola

David Massuela-Calenga¹, José Alberto Pons-Herrera^{2*}, María Caridad Ramírez-Pérez², Mayda Ulloa Carcasses², Agostino Cachapa³

¹Gabinete Provincial de Minería y Geología de la Provincia de Namibe, Angola.

²Universidad de Moa, Holguín, Cuba.

³Universidad de Namibe, Angola.

*Autor para la correspondencia: jpons@ismm.edu.cu

Resumen

La extracción de mármol de la mina Rokáfrica ha generado un pasivo ambiental minero, objeto de una caracterización química y mineralógica a fin de determinar posibles usos de estos residuos. Para el análisis se conformaron cinco muestras experimentales a partir de una muestra compósito de 5 000 kg. Los ensayos químicos se realizaron por espectrometría de absorción atómica; los mineralógicos, por difracción de rayos X, utilizando el método de polvo. Se encontraron importantes contenidos de CaO, SiO₂, MgO, Al₂O₃, Fe₂O₃, K₂O e Na₂O en estos residuos, siendo los contenidos promedio de CaO y NPK de 38,99 % y 4 %, respectivamente. Se detectó cuarzo, feldespato, micas y carbonatos como fases mineralógicas principales. Estos resultados apuntan a que este pasivo ambiental minero tiene perspectivas de uso como material de construcción y para la agricultura.

Palabras clave: pasivo ambiental minero; minería del mármol; mina Rokafrica; gestión de residuos; Namibe.

Abstract

The extraction of marble from the Rokáfrica mine has generated a mining environmental liability, which is the subject of a chemical and mineralogical characterization in order to determine possible uses of these wastes. For the analysis, five experimental samples were made from a 5,000 kg composite sample. Chemical tests were performed by atomic absorption spectrometry; mineralogical tests were performed by X-ray diffractometry, using the powder method. Significant contents of CaO, SiO₂, MgO, Al₂O₃, Fe₂O₃, K₂O and Na₂O were found in these residues, with average CaO and NPK contents of 38.99 % and 4 %, respectively. Quartz, feldspar, micas and carbonates were detected as main mineralogical phases. These results suggest that this mining environmental liability has prospects for use as construction material and for agriculture.

Keywords: mining environmental liabilities; marble mining; Rokafrica mine; waste management; Namibe.

1. INTRODUCCIÓN

La República de Angola posee importantes recursos minerales, entre los que destacan las formaciones ferríferas bandeadas conocidas como BIF (*Banded Iron Formation*), compuestas por óxidos de hierro: magnetita, hematita, carbonatos, comúnmente, dolomita-ankerita (Olimpio-Gonçalvez, Rojas-Purón, y Caliaata 2021), hasta ahora escasamente investigadas, así como grandes cantidades de residuos sólidos de los procesos de extracción y transformación de mármol.

Los marmoles ornamentales son rocas metamorfoseadas y recristalizadas de composición carbonatada, sedimentarias, con minerales de calcita (CaCO₃) y dolomita (CaMg)CO₃, de granulometría gruesa (Diba da Silva 2009).

Los depósitos minerales de mármol y granito de Angola se ubican en su mayoría en la Provincia de Namibe, principalmente en las Sierras de Luna, Uimba, Hapa, Picona y Chitovânguael. Los yacimientos cuentan con recursos importantes y de excelente calidad que motivan la aplicación de una metodología para la Evaluación Ambiental Estratégica (EAE) para la explotación de estos yacimientos de forma racional y eficiente (Massuela-Calenga, Montes de Oca y Ulloa-Carcasses 2019).

Los residuos de la minería del mármol constituyen una fuente de contaminación del suelo debido a la acumulación de polvo sobre la superficie donde se deposita el residuo, por la ocupación parcial de la superficie por

escombros. De esta manera, el suelo absorbe el óxido de calcio (CaO) del residuo que con el tiempo provoca que el suelo se vuelva infértil y no permita el crecimiento de vegetación (Rodríguez 2012).

Al mismo tiempo de ser un contaminante para el aire y los suelos, esta contaminación puede ocasionar enfermedades como la neumoconiosis, principal causa de muerte entre los trabajadores de la industria del mármol (Cuervo *et. al.* 2001). Para reducir esos efectos negativos sobre la salud humana, varios estudios proponen la utilización de los residuos del proceso de beneficio de rocas ornamentales para la fabricación de tejas, bloques, ladrillos y otros, de amplia aplicación en la construcción civil.

Sin embargo, muchas de estas investigaciones no cuentan con estudios de caracterización química de lamas residuales, a pesar de conocerse que los residuos de rocas ornamentales producen un enorme impacto ambiental, pues grandes volúmenes de ese material son generados diariamente como resultado de las operaciones de corte de los bloques rocosos (García de Freitas, Raymundo y Coutinho de Jesús 2012). Según Freitas (2008) es evidente que el gerenciamiento de los residuos y su caracterización constituye una de las etapas más importantes y necesarias para la toma de decisiones sobre el destino final de estos.

Los residuos de la industria extractiva y transformadora del mármol han sido utilizados como material para la construcción civil (Ribeiro 2013; Toncelli 2015), así como para el control de la acidez de los suelos en la agricultura (Souza, Ribeiro y Carrisso 2009), en la industria siderúrgica (Nylo, Silveira y Soares 2011) e incluso incorporados o a una matriz de resina epoxi para la producción de rocas artificiales como alternativa técnico-económica y ecológicamente viable para reducir la cantidad de contaminantes y agregar valor comercial a los residuos sólidos de mármol (Souza-Silva 2016).

Las principales rocas carbonatadas contienen apreciables contenidos de materiales calcáreos y dolomitas, que constituyen rocas sedimentarias compuestas, principalmente, de dolomita, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, y calcita, CaCO_3 . Este tipo de roca representa el 50 % promedio de los minerales (Chiodi 2009).

Los residuos sólidos generados por las empresas de mármol constituyen pasivos ambientales mineros que pueden ser tratados y reaprovechados, tomando en cuenta sus características físico-químicas y las experiencias internacionales con el uso industrial de muchos de estos desechos industriales, que son una necesidad para el desarrollo socio-económico de un país (Pons- Herrera, Ramírez-Pérez y Ortiz-Bárceñas 2020).

En este sentido, la provincia de Namibe, en los municipios de Bibala y Virei, posee una de las mayores reservas de rocas ornamentales de Angola, particularmente mármol y granito, en las sierras de Luna, de Hapa, de Uimba, de Picona y Chitovângua (Massuela-Calenga, Pons-Herrera y Perez 2021). En este entorno, una de las principales industrias dedicadas exclusivamente a la extracción de bloques de mármol en la mina Rokafrica, es la Empresa Megastone, localizada en la provincia de Namibe.

La presente investigación tiene como objetivo caracterizar, desde el punto de vista químico y mineralógico, y evaluar las perspectivas de uso de los pasivos ambientales mineros sólidos (PAM), generados durante los procesos de extracción de mármol de la mina Rokafrica, pertenecientes a la Empresa Megastone de la provincia de Namibe en Angola.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Selección y preparación de las muestras de investigación

Se conformó una muestra compósito de 5 000 kg, representativa de los residuos sólidos de la extracción de mármol de la mina Rokafrica, a partir de los bloques que constituyen rechazos de los procesos de extracción, al no cumplir con los requisitos de calidad para su comercialización. Estos PAM conforman entre el 90 % y el 95 % de la producción diaria, de esta empresa, lo que significa alrededor de 1 400 toneladas anuales.

2.2. Equipos y técnicas utilizados

Los residuos de mármol de la empresa Megastone poseen tamaños promedio superiores a 500 mm, de ahí la necesidad de reducir sus dimensiones para su caracterización, como se muestra en la Figura 1. A partir de la muestra compósito se conformaron cinco muestras experimentales para los análisis químicos y granulométricos.



Figura 1. Preparación mecánica de las muestras de PAM. Fuente: Autoría propia.

2.3. Caracterización granulométrica

La selección del tamaño de las fracciones granulométricas se basó en resultados de investigaciones similares, en las que se proponen usos a diferentes diámetros de partículas (Ribeiro 2013; Souza-Silva 2016). De este modo se escogieron las fracciones: -500+100 mm; -100+70 mm; -70+30 mm; -30+10 mm; y -10 mm, obtenidas una vez triturada la muestra compósito, empleando el triturador de mandíbula (Figura 2.)



Figura 2. Trituradores de mandíbula y sistema de clasificación empleados para la obtención de las fracciones granulométricas estudiadas. Fuente: cortesía Empresa Megastone.

2.4. Análisis químico

Las muestras para análisis químico fueron pulverizadas y procesadas en los laboratorios del Instituto de Geología (IGEO), en la ciudad de Lubango. Para la caracterización química se utilizó un espectrofotómetro de absorción atómica como el que se muestra en la Figura 3. Los análisis químicos se realizaron a cuatro muestras representativas de las fracciones granulométricas seleccionadas: - 100 + 70 mm; - 70 + 30 mm; - 30 + 10 mm; -10 mm.



Figura 3. Espectrofotómetro de absorción atómica utilizado para los análisis químicos. Fuente: Cortesía Laboratorio de Geología (IGEO 2021).

2.5. Análisis mineralógicos

Las principales fases mineralógicas fueron determinadas empleando el difractómetro Rigaku-Termoflex – Modelo 2013, con contador proporcional, voltaje de 40 kV, amperaje de 30 mA, tubo de cobre de 1,5 kW, filtro de níquel y velocidad de 1°C/min. Se utilizó el método del polvo, depositando la muestra en una lámina de vidrio de forma desorientada (Figura 4).



Figura 4. Diffractómetro de rayos X utilizado para el análisis mineralógico. Fuente: Cortesía Laboratorio de Geología (IGEO 2021).

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1. Características químicas

Los residuos de la minería del mármol en Namibe se caracterizan por el predominio de compuestos de CaO , SiO_2 , MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O e Na_2O , cuya variabilidad es semejante a materias primas estudiadas por otros investigadores que han demostrado la utilidad de estos residuos para la fabricación de cerámica roja, concreto, cemento y mezclas para la fabricación de diversos materiales de construcción. Los resultados de la composición

química de las diferentes fracciones granulométricas analizadas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química (en %) de las muestras

Muestras	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Otros	PPI	CaO/SiO ₂	NPK
1 (- 100 + 70 mm)	36,56	10,07	10,04	22,34	13,65	3,45	1,89	0,86	0,36	0,13	0,65	0,39	0,61	5,70
2 (- 70 + 30 mm)	31,61	7,65	2,33	42,53	11,38	2,21	1,27	0,36	0,16	0,16	0,34	0,70	1,35	3,64
3 (- 30 + 10 mm)	34,28	7,01	2,82	39,82	10,39	3,11	1,21	0,47	0,22	0,26	0,41	0,87	1,16	4,54
4 (-10 mm)	25,42	5,46	2,2	51,25	12,44	1,39	0,69	0,69	0,08	0,06	0,32	0,85	2,02	2,16
Promedio Residuos sólidos mármol	31,97	7,55	4,35	38,99	11,97	2,54	1,27	0,60	0,21	0,15	0,43	0,70	1,28	4,01

Los contenidos promedio de CaO y NPK, de 38,99 % y 4,0 %, respectivamente, avalan la utilización de estos pasivos en la industria siderúrgica, para la eliminación de impurezas como fósforo y azufre. También pudieran ser empleados en la agricultura, principalmente para el control de la acidez de los suelos y aporte de nutrientes naturales, entre otros posibles usos.

3.2. Características mineralógicas

Las principales fases mineralógicas son cuarzo, feldespato, micas y carbonatos, (Figura 5), en plena correspondencia con los principales compuestos químicos que poseen estos residuos.

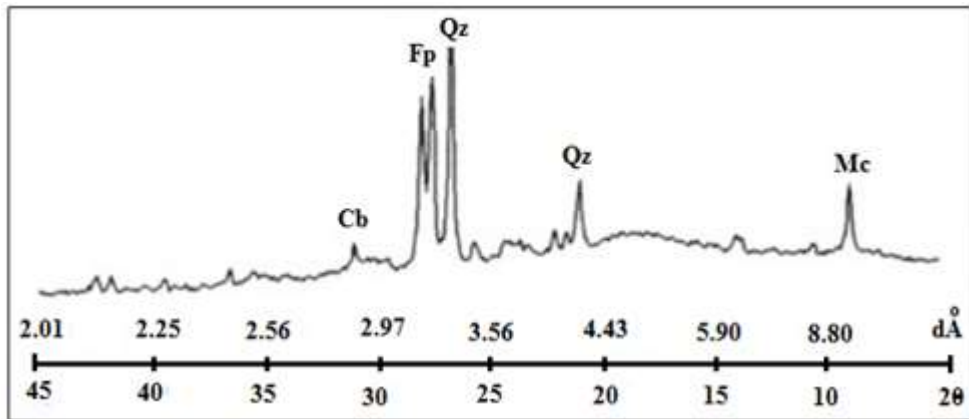


Figura 5. Difractograma de los residuos sólidos de las rocas de mármol de la empresa Megastone en Namibe. Cb= Carbonato; Fp= Feldespato; Qz= Cuarzo, Mc= Mica.

3.3. Perspectivas de utilización de los residuos de mármol

La caracterización realizada en esta investigación confirma que los PAM generados durante la extracción de mármol en Namibe pueden constituir materia prima para la industria cerámica, de materiales de construcción y para la agricultura, teniendo en cuenta sus particularidades químicas y mineralógicas.

La utilización final de los residuos sólidos estudiados, en función de las cantidades generadas, deben ser antecedidas de una evaluación técnico-económica, que permita reducir o minimizar el impacto ambiental que actualmente provocan sobre el medio ambiente de la provincia de Namibe.

El proceso tecnológico empleado para el tratamiento de los PAM de la minería de rocas ornamentales de mármol en Namibe, ha sido condicionado por las aplicaciones y demandas de los clientes de la región. En este sentido, fueron definidos y obtenidos los productos de uso en la industria de materiales de construcción y la agricultura que se muestran en la Figura 6.



Figura 6. Principales productos obtenidos a partir del tratamiento de los PAM en la empresa Megastone, Namibe, Angola.

Como resultado de esta investigación, se evidencia que la evaluación tecnológica representa un papel fundamental en el reaprovechamiento de los

residuos sólidos de las plantas extractoras de mármol desde el inicio de los proyectos de exploración y extracción, pues además de los indicadores tradicionales utilizados durante los estudios de evaluación ambiental como: económica, social, cultural, la dimensión tecnológica define el tratamiento más eficiente, en dependencia del uso industrial que tendrán los PAM en Angola.

4. CONCLUSIONES

- Los pasivos ambientales sólidos generados por los procesos de extracción de mármol en Namibe, Angola, son de tipo calcáreo, con significativos contenidos de CaO, SiO₂, MgO, Al₂O₃, Fe₂O₃, K₂O e Na₂O, que justifican su utilización perspectiva como material de construcción y en la agricultura, considerando las experiencias internacionales con el uso de estos residuales.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Empresa Megastone y a la mina Rokafrica las facilidades para el acceso a las instalaciones y a las informaciones necesarias para el desarrollo de esta investigación

6. REFERENCIAS

- Chiodi, C. 2009: *Aspectos de Interesse sobre Rocas Ornamentales y de revestimiento*. Sao Paulo: Abirochas.
- Cuervo, V. J.; Eguidazu, J. L.; González, A.; Guzmán, A.; Hevia, J. R.; Isidro, I. et al. 2001: *Protocolo de vigilancia sanitaria específica para los/as trabajadores/as expuestos a silicosis y otras neumoconiosis*. Madrid: Ministerio de Sanidad y Consumo.
- Diba da Silva, F. 2009: *Estudio de la Recristalización de los Residuos Industriales de Marmol y Granito en la Industria Cerámica y en la Construcción Civil*. Recife: Universidad Federal de Pernambuco.
- Freitas, J. 2008: *Caracterización Química Inorgánica de Residuos del Proceso de Corte de Rocas Ornamentales de Espírito Santos*. Vitória: Universidad Federal de Espírito Santo.
- Garcia de Freitas, J.; Raymundo, V. y Coutinho de Jesus, H. 2012: Características Químicas de los Residuos del Proceso de Corte de Rocas Ornamentales del Estado de Espiritu Santos. *Brazilian Journal of Geology*, 42(3): 615-624.
- IGEO. 2021: *Caracterización Físico-Química de Muestras de Residuos Sólidos de la mina de Mármol Rokafrica, Província de Namibe*. Lubango: Laboratorio de Geologia.

- Massuela-Calenga, D.; Montes de Oca, A. y Ulloa-Carcasses, M. 2019: La Evaluación Ambiental Estratégica: Desde el Enfoque de su desarrollo Histórico hasta su Aplicabilidad en la Actualidad. *Holos*, 1-22.
- Massuela-Calenga, D.; Pons-Herrera, J. y Perez, R. 2021: *Caracterización Físico-Química de Pasivos Ambientales Mineros de las Empresas Productoras de Mármol y Granito de Namibe, Angola*. Moçamedes: Universidad de Namibe.
- Nylo, F.; Silveira, R. y Soares, J. 2011: Utilización de Caolín y Residuo de Mármol en la Desulfurización de Arrabio. *Tecnol. Metal. Mater. Miner.*, 8(1): 37-43.
- Olimpio-Gonçalves, A.; Rojas-Purón, A. L. y Calíata, L. 2021: Caracterización Mineralógica de Formaciones de Hierro Bandeadas en Vipongos, Provincia Namibe, Angola. *Minería y Geología*, 37(1): 1-29.
- Pons-Herrera, J.; Ramírez-Pérez, M. y Ortiz-Bárceñas, J. 2020: Uso Sustentable de los Pasivos Ambientales Minero Metalúrgicos sólidos, Generados por la Industria del Níquel en Moa, Cuba. *Revista Angolana de Geociências*, 2(1): 145-154.
- Ribeiro, S. 2013: *Reutilización de Residuos de Rocas Ornamentales en la Producción de Ladrillos de Suelo-Cemento*. Campos de Goytacazes: Universidad Estadual Norte Fluminense.
- Rodríguez, C. 2012: *Caracterización de los Sitios Destinados a Tiraderos de Residuos del Mármol en la Comarca Lagunera*. México: FICA-UJED.
- Souza-Silva, F. 2016: *Desarrollo y Caracterización de un Mármol Artificial a Partir del Aprovechamiento de Residuo de Mármol Calcítico y Resina Epoxídica*. Sao Paulo: Universidad de Sao Paulo.
- Souza, L.; Ribeiro, R. y Carrisso, R. 2009: *Aplicación de Residuos de Mármol en la Industria Polimérica*. Rio de Janeiro: Série Tecnologia Ambiental.
- Toncelli, M. 2015: Process for the Formation of Blocks of any Material by Means of the Contemporaneous Action of Vibrations, Compression and Vacuum Intended for Cutting into Slabs and Apparatus Adapted to Carry out the Said Process. Patente de Invención US nº 4698010 A. Whashington.

Información adicional

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores

DMC: Selección y preparación de las muestras, proceso de caracterización y procesamiento de los resultados. JAPH: Selección y preparación de las muestras, proceso de caracterización y Análisis e interpretación de los resultados. MCRP: Proceso de caracterización y Análisis e interpretación de los resultados. MUC: Análisis e interpretación de los resultados en Cuba AC: Procesamiento de los resultados en Angola.

ORCID

DMC, <http://orcid.org/0000-0002-0906-8760>

JAPH, <http://orcid.org/0000-0002-5265-2962>

MCRP, <http://orcid.org/0000-0003-1262-7057>

MUC, <http://orcid.org/0000-0003-2932-9785>

AC, <http://orcid.org/0000-0002-8671-1764>

Recibido: 18/07/2020

Aceptado: 09/09/2022