

Determinación de las mejores condiciones para la lixiviación ácida de la dolomita

Determining the best conditions for acid leaching of dolomite

Lisandra Guevara-Orozco^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-9940-9425>

Néstor Ley-Chong¹ <https://orcid.org/0000-0001-5575-246X>

Erenio González-Suárez¹ <https://orcid.org/0000-0001-5741-8959>

Mixary Enríquez-García¹ <https://orcid.org/0000-0002-0644-1160>

Ángel Mollineda-Trujillo² <https://orcid.org/0000-0002-5057-4411>

¹Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química y Farmacia.

Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas; Santa Clara, Villa Clara, Cuba

²Centro de Investigaciones agropecuarias (CIAP), Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba

*Autor para correspondencia. Correo electrónico: igorozco@uclv.cu

RESUMEN

La lixiviación ácida de la dolomita con ácido sulfúrico es un proceso químico para obtener sulfato de magnesio, donde el ácido disuelve el carbonato de magnesio y puede precipitar sulfato de calcio a partir del carbonato de calcio. La concentración de ácido, el tiempo, la temperatura y velocidad de agitación son las variables clave para el estudio de este proceso. El objetivo de este trabajo es determinar las mejores condiciones para la lixiviación ácida de la dolomita. Se aplicó un diseño experimental Plackett-Burman para identificar las variables más influyentes, seguido de un diseño Box-Hunter para encontrar las mejores condiciones de reacción. El modelo identificó que el tiempo, la velocidad de agitación y la interacción concentración-temperatura-tiempo son los factores significativos para la lixiviación de dolomita, mientras que la concentración de ácido sulfúrico y la temperatura pueden mantenerse constantes. La amplia variación en la concentración de magnesio (780-4,257-4,257 mg/L) confirma la sensibilidad del proceso. El modelo permite predecir y optimizar la extracción, determinando que las condiciones óptimas son 300 rpm

durante 30 min con alta concentración de ácido y temperatura, maximizando así el rendimiento.

Palabras clave: lixiviación ácida; dolomita; sulfato de magnesio, diseño experimental.

ABSTRACT

Acid leaching of dolomite with sulfuric acid is a chemical process to obtain magnesium sulfate, where the acid dissolves magnesium carbonate and can precipitate calcium sulfate from calcium carbonate. Acid concentration, time, temperature, and stirring speed are the key variables for the study of this process. The objective of this work is to determine the optimal conditions for the acid leaching of dolomite. A Plackett-Burman experimental design was applied to identify the most influential variables, followed by a Box-Hunter design to find the optimal reaction conditions. The model identified that time, stirring speed, and the concentration-temperature-time interaction are the significant factors for dolomite leaching, while sulfuric acid concentration and temperature can be kept constant. The wide variation in magnesium concentration (780– 4 257 mg/L) confirms the sensitivity of the process. The model allows predicting and optimizing the extraction, determining that the optimal conditions are 300 rpm for 30 minutes with high acid concentration and temperature, thus maximizing the yield.

Keywords: acid leaching; dolomite; magnesium sulfate; experimental design.

Recibido: 22/8/2025

Aceptado: 08/12/2025

Introducción

Las reacciones químicas constituyen la base fundamental de numerosos procesos industriales y tecnológicos. Su estudio y control son esenciales para optimizar la transformación de materias primas en productos de alto valor añadido, mejorar la eficiencia energética y minimizar el impacto ambiental ⁽¹⁾ La lixiviación ácida de los minerales de magnesio con ácido sulfúrico es un método eficiente para la obtención de sulfato de magnesio, ^(2,3) insumo importante en sectores como el farmacéutico y agrícola. ⁽⁴⁾ En dicha lixiviación, los óxidos, hidróxidos o carbonatos de magnesio reaccionan con el ácido sulfúrico en condiciones controladas para obtener el sulfato en solución. ⁽⁵⁾ La

eficiencia del proceso y la calidad del $MgSO_4$ dependen de factores operativos y de la pureza del mineral.⁽⁶⁾ Las principales variables a controlar durante la lixiviación son la concentración de ácido, la temperatura, el tiempo de reacción, la relación sólido-líquido y el tamaño de partícula.⁽⁷⁾ Varias investigaciones han estudiado estas variables en aras de maximizar la conversión y pureza del producto y se han obtenido valores de recuperación de sulfato de magnesio del 97 % aproximadamente con un tamaño de partícula 100% -150 μm , temperatura 60 °C, tiempo de reacción 50 min y relación líquido/sólido 4:1 g/ml con el mineral dolomita del Abu-Tartur.⁽⁸⁾ Otros autores han estudiado la disolución de magnesita en ácido sulfúrico y se ha determinado que la reacción alcanza condiciones óptimas para a 65° C, una velocidad de agitación de 750 rpm y un tiempo de reacción de 60 minutos.⁽⁹⁾

En Cuba, el principal mineral de magnesio es la dolomita, con concentraciones de óxido de magnesio que superan el 30% ⁽¹⁰⁾, lo que ha motivado investigaciones nacionales sobre su lixiviación ácida. No obstante, estos estudios previos se han centrado predominantemente en el análisis del equilibrio químico, la caracterización mineralógica y la evaluación a escala de laboratorio mediante el método de "una variable a la vez", sin aplicar diseños experimentales estadísticos que permitan una optimización sistemática, cuantificar interacciones entre variables y generar modelos predictivos robustos.

Esta brecha metodológica limita la capacidad para identificar de manera eficiente y precisa el punto óptimo operativo del proceso con la dolomita cubana. Para abordar esta necesidad, la presente investigación propone la aplicación secuencial de metodologías estadísticas. Inicialmente, el diseño experimental Plackett-Burman permitirá seleccionar las variables más relevantes evaluando múltiples condiciones con un número reducido de experimentos.⁽¹¹⁾ Posteriormente, el diseño Box-Hunter explorará en profundidad los efectos de esas variables y sus interacciones para modelar y optimizar la respuesta del sistema.⁽¹²⁾ El empleo de esta estrategia constituye el camino más eficaz para determinar las mejores condiciones para la lixiviación ácida de la dolomita cubana aplicando diseños experimentales.

Materiales y métodos

La dolomita empleada en el estudio corresponde a las minas ubicadas en el municipio de Remedios, en la provincia de Villa Clara ⁽¹⁰⁾, se ubica en la categoría de medidos y su composición química se muestra en la tabla 1.

Tabla 1- Composición del mineral dolomita

Especies presentes	%
MgO	18,01
CaO	33,98
Fe ₂ O ₃	0,04
Al ₂ O ₃	0,07
SiO ₂	0,24

El ácido sulfúrico (H_2SO_4) es el reactivo principal en la obtención de sulfato de magnesio heptahidratado. En este proceso, se emplea ácido sulfúrico concentrado al 98 %, con una densidad de 1,83 g/mL, aportando aproximadamente un 20 % en la reacción global y constituyendo la principal fuente de azufre mientras que se emplea como medio para mezclar ácido con dolomita facilitando la disolución de sus componentes. ⁽¹³⁾

Para la identificación preliminar de los factores más influyentes en el proceso se aplicó el diseño multifactorial de Plackett-Burman ^(14, 15) para configurar una matriz experimental de ocho corridas, considerando siete variables, de las cuales cuatro son reales y tres son ficticias. Las variables reales que se tuvieron en cuenta en el estudio fueron: concentración de ácido sulfúrico, temperatura, tiempo de reacción y velocidad de agitación.

Identificados los factores significativos, se procedió a aplicar un diseño experimental de Box-Hunter. Este diseño permite explorar de manera más detallada el comportamiento de los factores seleccionados y sus posibles interacciones, facilitando la determinación de las mejores condiciones de la reacción. ⁽¹²⁾

Resultados y discusión

Los niveles de cada variable real fueron seleccionados con base a los estudios realizados por ^(7, 12) como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2 - Niveles de las variables seleccionadas en el diseño experimental

Variables	Nivel bajo	Nivel alto
X ₁ (Concentración H ₂ SO ₄) (%)	78	98
X ₂ (Temperatura) (°C)	30	60
X ₄ (Tiempo de reacción) (min)	30	60
X ₆ (Velocidad de agitación) (rpm)	300	400

La matriz experimental resultante se presenta en la tabla 3, donde se detallan las combinaciones de los factores evaluados en cada corrida.

Tabla 3 - Matriz experimental de Plackett-Burman

N	X ₁	X ₂	X ₃ (X _{f1})	X ₄	X ₅ (X _{f2})	X ₆	X ₇ (X _{f3})
1	+	+	+	-	+	-	-
2	+	+	-	+	-	-	+
3	+	-	+	-	-	+	+
4	-	+	-	-	+	+	+
5	+	-	-	+	+	+	-
6	-	-	+	+	+	-	+
7	-	+	+	+	-	+	-
8	-	-	-	-	-	-	-

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo bajo las condiciones establecidas, obteniéndose los resultados que se muestran en la tabla 4.

Tabla 4 - Resultados de las pruebas experimentales

N	X ₁	X ₂	X ₃ (X _{f1})	X ₄	X ₅ (X _{f2})	X ₆	X ₇ (X _{f3})	Concentración de Mg (mg/L)
1	+	+	+	-	+	-	-	871,5
2	+	+	-	+	-	-	+	878
3	+	-	+	-	-	+	+	987,5
4	-	+	-	-	+	+	+	680,5
5	+	-	-	+	+	+	-	947,5
6	-	-	+	+	+	-	+	905,5
7	-	+	+	+	-	+	-	880
8	-	-	-	-	-	-	-	804,5

Para evaluar la influencia de cada factor sobre la concentración de magnesio en la solución, se aplicó un modelo de regresión lineal de acuerdo a la ecuación 1, cuyos coeficientes fueron estimados mediante el método de los

mínimos cuadrados. Los resultados de estos coeficientes se presentan en la tabla 5.

$$Y = b_0 + b_1 * X_1 + b_2 * X_2 + b_3 * X_3 + b_4 * X_4 + b_5 * X_5 + b_6 * X_6 + b_7 * X_7 \quad (1)$$

Tabla 5 - Coeficientes estimados por mínimos cuadrados

Coeficientes	Valor	t-student calculada
<u>b₀</u>	869,37	0,068
b ₁	16,75	0,902
b ₂	219,5	0,068
b ₃	16,75	-1,722
b ₄	-419	0,068
b ₅	16,75	-1,722
b ₆	-419	-1,729
b ₇	-420,62	0,068

La significancia estadística de cada variable se determinó aplicando la prueba t de Student, calculando el estadístico correspondiente para cada coeficiente (Ecuación 2). Los valores obtenidos se muestran en la tabla 6.

$$t \text{ calculada} = \frac{b_j}{\text{Error estándar}} \quad (2)$$

Tabla 6 - Estadísticos de prueba t para cada coeficiente

Coeficientes	t-student calculada
<u>b₀</u>	0,068
b ₁	0,902
b ₂	0,068
b ₃	-1,722
b ₄	0,068
b ₅	-1,722
b ₆	-1,729
b ₇	0,068

Finalmente, se compararon estos valores con los valores críticos para niveles de confianza del 80%, 85% y 90% (tabla 7), determinando así qué factores son significativos en el intervalo de estudio.

Tabla 7 - Valores críticos del estadístico t

Probabilidad	80	85	90
t-student crítica	237,88	304,04	398,41

El análisis reveló que, dentro del rango de variación considerado, las variables tiempo, velocidad de agitación y la interacción concentración-temperatura-tiempo son las más significativas para la reacción.

El diseño experimental de Box-Hunter permitió explorar de manera más detallada el comportamiento de los factores seleccionados y sus posibles interacciones, facilitando la determinación de las mejores condiciones de la reacción. En la tabla 8 se muestra la matriz experimental resultante para este diseño.

Tabla 8 - Diseño experimental Box-Hunter aplicado a los factores significativos

N	X1	X2	X4	X6	X124
1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	-1	1
3	1	1	-1	1	-1
4	1	1	-1	-1	-1
5	1	-1	1	1	-1
6	1	-1	1	-1	-1
7	1	-1	-1	1	1
8	1	-1	-1	-1	1
9	-1	1	1	1	-1
10	-1	1	1	-1	-1
11	-1	1	-1	1	1
12	-1	1	-1	-1	1
13	-1	-1	1	1	1
14	-1	-1	1	-1	1
15	-1	-1	-1	1	-1
16	-1	-1	-1	-1	-1

A partir de esta matriz experimental se evaluó el efecto individual y combinado de los factores significativos sobre la respuesta del sistema, utilizando los datos obtenidos se ajustó el modelo de regresión el cual se expresa mediante la ecuación 3.

$$Y = 1738,5 - 839 * X_4 - 839 * X_6 - 841,25 * X_{124} \quad (3)$$

En este modelo las variables X_1 y X_2 no se incluyen ya que no resultaron significativas en el rango de variación estudiado. La ecuación obtenida permite predecir el valor de la variable respuesta (Y) para cada combinación experimental de los valores X_4 , X_6 y la interacción X_{124} . Los valores calculados para cada experimento se muestran en la última columna de la tabla 9 y se evidencian en la figura 1.

Tabla 9 - Valores de concentración del magnesio por el modelo

Experimentos	X_1	X_2	X_4	X_6	X_{124}	Y (Concentración de Mg)
1	1	1	1	1	1	780,75
2	1	1	1	-1	1	897,25
3	1	1	-1	1	-1	2579,75
4	1	1	-1	-1	-1	4257,75
5	1	-1	1	1	-1	901,75
6	1	-1	1	-1	-1	2579,75
7	1	-1	-1	1	1	897,25
8	1	-1	-1	-1	1	2575,25
9	-1	1	1	1	-1	901,75
10	-1	1	1	-1	-1	2579,75
11	-1	1	-1	1	1	897,25
12	-1	1	-1	-1	1	2575,25
13	-1	-1	1	1	1	780,75
14	-1	-1	1	-1	1	897,25
15	-1	-1	-1	1	-1	2579,75
16	-1	-1	-1	-1	-1	4257,75

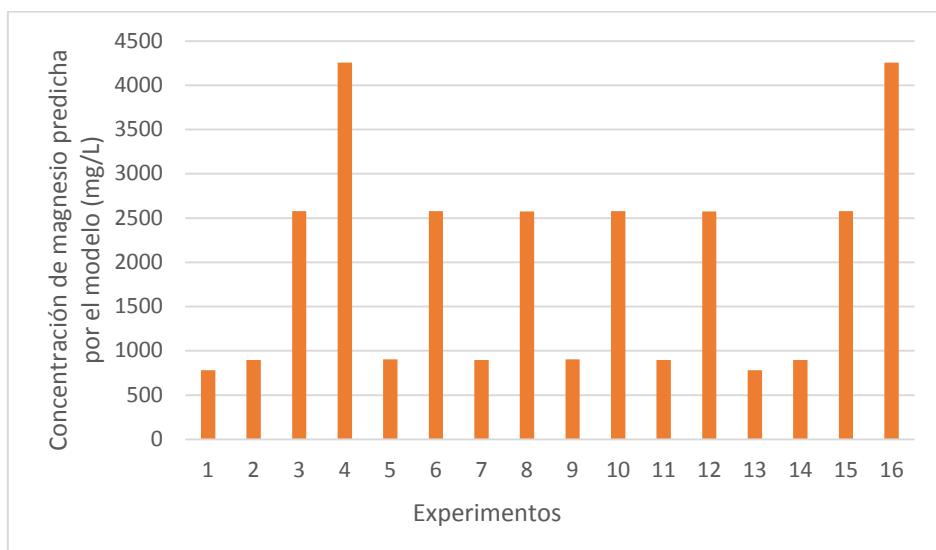


Fig. 1 - Valores de concentración del magnesio predichos por el modelo

Conclusiones

1. En el estudio experimental se demuestra que las variables tiempo, velocidad de agitación y la interacción concentración – temperatura – tiempo son significativas mientras que la concentración de ácido sulfúrico y la temperatura no lo son, por lo que se deben considerar constantes para la optimización en el rango estudiado.
2. Los valores experimentales de la concentración de Magnesio varían en un rango amplio de 780 a 4 257 mg/L, lo que indica una sensibilidad considerable del sistema a los factores significativos y sus interacciones.
3. El modelo ajustado permite predecir la concentración de magnesio para cualquier combinación de los niveles de las variables: tiempo, velocidad de agitación e interacción concentración – temperatura – tiempo dentro del rango experimental; convirtiéndolo en una herramienta útil para optimizar el proceso.
4. La máxima concentración de magnesio de 4 257 mg/L se alcanza con una velocidad de agitación de 300 rpm durante 30 minutos, empleándose ácido sulfúrico al 98 % a 60°C y ácido sulfúrico al 78% a 30°C.

Referencias bibliográficas

1. GARCÍA, M.I. Química: su importancia en la humanidad. *Con-Ciencia Boletín Científico De La Escuela Preparatoria No. 3 2024*, **11** (22). 8–12. [Consultado 13 julio 2025]. ISSN 2007-7653. <https://doi.org/10.29057/prepa3.v11i22.12642>
2. ROJAS, A., GARLOBO. C.L., SALAZAR I.P., TRUJILLO, N.M.E. Factores que inciden en la lixiviación del magnesio en soluciones carbonato-amoniacales (I). *Tecnología Química*. [en línea]. 2006, **26** (2). 70-75. [Consultado 15 julio 2025]. ISSN: 2224-6185. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/4455/445543750009.pdf>
3. ROJAS-VARGAS, A., TRUJILLO-NIEVES, M.E., SALAZAR-INFANTE, Y., CHAPMAN-GONZALEZ, L. Lixiviación del magnesio en solución carbonato amoniacial. *Tecnología Química* [en línea]. 2020, **40** (1). 169-182 [Consultado 15 julio 2025]. ISSN: 2224-6185. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v40n1/2224-6185-rtq-40-01-169.pdf>
4. FERNÁNDEZ-LEIVA, R., SERRANO-CASTILLO, J., LEY-CHONG, N., GONZÁLEZ-SUÁREZ, E., GUEVARA-OROZCO, L. Evaluar la factibilidad económica de una planta multipropósito para la producción de sulfatos. *Tecnología Química* [en línea]. 2022, **42** (3). 474-486. [Consultado 7 agosto 2025]. ISSN: 2224-6185. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2224-61852022000300474&lng=es&nrm=iso&tlang=es
5. XU, J., QIN, S., ZHENG, C., SUN, H., YANG, B., LIU, S., QIU, G., NORTHWOOD, DO., WATERS, KE., HAO, M. Study on Column Leaching Behavior of Low-Grade High Calcium and Magnesium Copper Ore. *Minerals*. 2024, **14** (8). 822. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/min14080822>
6. FERNÁNDEZ LEIVA, R. Diseño de una Planta Multipropósito de sulfatos en la provincia de Villa Clara. Trabajo de diploma para graduarse de Ingeniero Químico. Universidad central “Marta Abreu” de Las Villas. Santa Clara, 2020. Disponible en: <https://dspace.uclv.edu.cu/entities/publication/642880b2-1b6d-4e20-9c70-ce3bcfee27b3>
7. LOMBANA, L.M., SAAVEDRA., A.D., CORREA, F., Variables influyentes en el proceso de lixiviación para la recuperación de metales contenidos en lodos galvánicos. *Revista Semilleros: Formación Investigativa* [en línea]. 2018, **4** (1). Disponible en:

- <https://repository.uamerica.edu.co/server/api/core/bitstreams/b7da6210-9dac-42f6-ab2c-85e4b73693ca/content>
8. RASHAD, M., BAIOMY, H. Chemical processing of dolomite associated with the phosphorites for production of magnesium sulfate heptahydrate. *European Journal of Mineral Processing and Environmental Protection*. 2005, **5** (2). 174-183 [Consultado 15 julio 2025]. ISSN: 1303-0868.
9. GARCÍA PINEDA, V. Diseño de una planta de producción de $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ mediante cristalización. Trabajo de diploma para graduarse de Ingeniero Químico. Universidad de Sevilla, 2021. Disponible en: <https://hdl.handle.net/11441/126959>
10. LINARES, L. Aspectos fundamentales necesarios para la elaboración del Proyecto de Ingeniería Básica de la demanda de dolomita para vidrios Mariel. Empresa Geominera del Centro, Villa Clara, 2022.
11. CHÁVEZ GAMARRA, R. Evaluation Of Variables Through the Plackett-Burman Design in The Flotation Process of Copper Sulphide Minerals from The San Rafael De Belén Deposit. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinaria* [en línea]. 2024, **7**(6), 5945–5954 [consultado el 15 de agosto de 2025]. ISSN 2707-2215. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9481784.pdf>
12. RUIZ-GONZÁLEZ, A., GUERRA-BUSTILLO, C. W., MOREJÓN-MENA, Y., MACHADO-AGUIAR, M. Metodología de Superficie de Respuesta como alternativa en la búsqueda de condiciones óptimas. *Revista Ciencia Universitaria* [en línea]. 2018, **15** (1) [consultado el 15 de agosto de 2025]. ISSN: 2954-4769. Disponible en: <https://revistas.unah.edu.cu/index.php/cu/article/view/989>
13. ALVITES, R., CERNA, J. Optimización del proceso productivo de sulfato de magnesio heptahidratado mediante el diseño e implementación de una planta piloto de producción de fertilizantes solubles. Trabajo de diploma para graduarse de Ingeniero Químico. Universidad Nacional de Trujillo, 2013. Disponible en: <https://dspace.unitru.edu.pe/server/api/core/bitstreams/43131bfd-148a-4fb3-8d3a-37914db01e6c/content>
14. PLACKETT, R.L., BURMAN, J.P. The Design of Optimum Multifactorial Experiments. *Biometrika* [en línea]. 1946, **33** (4). 305-325 [consultado el 15 de

agosto de 2025]. ISSN:00063444. Disponible en:

<https://doi.org/10.2307/2332195>

15. AUCAPÍÑA ESPINOSA, R.S., Sacoto Aguilera, N.D. Aplicación de diseño experimental y métodos multicriterio para optimización de cervezas elaboradas a partir de trigo y cebada que se cultivan en la provincia del Cañar. Trabajo de grado Universidad del Azuay, 2025. Disponible en:
<https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/15966/1/21481.pdf>

Contribución de los autores

Lisandra Guevara Orozco: realizó el trabajo de recopilación experimental de datos, su procesamiento: escribió la versión inicial del informe de investigación que sirvió de base al artículo científico.

Néstor Ley Chong: contribuyó en el análisis de los resultados y en la estructura del artículo.

Erenio González Suarez: contribuyó en la metodología de investigación y asesoró la realización de la investigación.

Mixary Enríquez García: colaboró en los análisis experimentales.

Ángel Mollineda Trujillo: colaboró en los análisis experimentales.