

Prefactibilidad económica para la síntesis de H_3PO_4 mediante roca fosfórica y ácido clorhídrico cubanos

Economic pre-feasibility study for the synthesis of H_3PO_4 using Cuban phosphate rock and hydrochloric acid

Yosviel Reyes-Delgado¹ <https://orcid.org/0000-0002-9344-2304>

Frank Daniel Rodríguez-Ballester¹ <https://orcid.org/0009-0007-5348-4845>

Laura Arancha Alejo-Calderón² <https://orcid.org/0009-0005-5741-8402>

Erenio González-Suárez^{1*} <https://orcid.org/0000-0001-5741-8959>

¹Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, Cuba

²Oficina Territorial de Normalización Villa Clara, Cuba

*Autor para la correspondencia. Correo electrónico: erenio@uclv.edu.cu

RESUMEN

En Cuba se encuentran importantes reservas de roca fosfórica, con una concentración media de 29,16 % de pentóxido de difósforo (P_2O_5). En esta investigación, se aplicó un procedimiento eficiente para la producción de ácido fosfórico mediante la lixiviación de roca fosfórica cubana con ácido clorhídrico al 5 % de producción nacional. El proceso, que incluyó etapas de neutralización con $\text{CaCO}_3/\text{Ca}(\text{OH})_2$, filtración, extracción con n-butanol y concentración por evaporación, logró una conversión del 93,6 % de P_2O_5 con una producción de 88,9 kg/h de ácido fosfórico al 80 % de pureza. Los balances de masa evidenciaron pérdidas del 6,4 % de P_2O_5 principalmente en las etapas de filtración, mientras que el diseño de equipos (reactores de 750 L, filtros de prensa y columnas de extracción de 2m) garantizó la operatividad del sistema. El análisis económico mostró indicadores favorables: VAN de \$7,87 millones, TIR del 76 % y período de recuperación de 3,5 años, considerando una producción anual de 704 toneladas y una inversión total de \$4,8 millones. Como subproducto, se generaron 113,48 kg/h de CaCl_2 , cuyo potencia aprovechamiento mejoraría la rentabilidad del proceso mejoraría la rentabilidad

del proceso. La investigación demostró la viabilidad técnica y económica de este método para la producción nacional de ácido fosfórico, optimizando el uso de recursos minerales locales.

Palabras clave: ácido fosfórico; extracción; fosforita; lixiviación ácida.

ABSTRACT

Cuba has significant reserves of phosphate rock, with an average concentration of 29, 16 % diphosphorus pentoxide (P_2O_5). In this research an efficient process was developed for the production of phosphoric acid by leaching Cuban phosphate rock (with 29, 16% P_2O_5) using 5 % national hydrochloric acid. The process, which included neutralization stages with $CaCO_3/Ca(OH)_2$, filtration, extraction with n-butanol and concentration by evaporation, achieved a conversion of 93,6 % of P_2O_5 with a production of 88.9 kg/h of phosphoric acid at 80 % purity. Mass balances evidenced losses of 6,4 % of P_2O_5 mainly in the filtration stages, while the equipment design (750 L reactors, filter presses and 2m extraction columns) ensured system operability. The economic analysis showed favorable indicators: NPV of \$7, 87 million, IRR of 76 % and payback period of 3,5 years, considering an annual production of 704 tons and a total investment of \$4,8 million. As a by-product, 113, 48 kg/h of $CaCl_2$ were generated, whose potential use would improve the profitability of the process. The research demonstrated the technical and economic feasibility of this method for the national production of phosphoric acid, optimizing the use of local mineral resources.

Keywords: phosphoric acid; extraction; phosphorite; acid leaching.

Recibido: 05/05/2025

Aceptado: 28/08/2025

Introducción

El ácido fosfórico (H_3PO_4) se encuentra entre las diez sustancias químicas que se producen industrialmente en mayor cantidad a nivel mundial. Se obtiene principalmente por vía húmeda

Si bien es un elemento esencial para todas las formas de vida, representa uno de los tres macronutrientes que necesitan las plantas. El principal uso de la

roca fosfórica es la producción de una gama de fosfatos y fertilizantes de multinutrientes que son fundamentales para aumentar el rendimiento de los cultivos y mantener el suministro mundial de alimentos.⁽¹⁾ Sin embargo, el fósforo es también un suplemento nutritivo importante en la alimentación animal, cuya demanda es determinada por la producción mundial de carne. Además, se requieren cantidades más pequeñas de fósforo para una amplia gama de aplicaciones industriales y alimentarias. Cerca del 80 % de toda la roca fosfórica se utiliza para producir ácido fosfórico por vía húmeda (WPA), el cual se utiliza para producir una variedad de fertilizantes sucesivos y otros productos.⁽²⁾

El ácido fosfórico es un compuesto inorgánico que se presenta como un líquido transparente, incoloro y viscoso a temperatura ambiente. Entre las propiedades físicas del ácido fosfórico se encuentran, punto de fusión 42,35 °C, punto de ebullición 158 °C; densidad 1,88 g/cm³ a temperatura ambiente; es soluble en agua y en la mayoría de los solventes orgánicos comunes, como el etanol, el benceno y el cloroformo; pH del ácido fosfórico al 85% es de aproximadamente 1,5 unidades. El H₃PO₄, es un ácido fuerte; es un líquido viscoso, por tener baja fluidez y una alta resistencia al flujo; tiene tensión superficial relativamente alta, por lo que tiende a formar gotas y no mojar algunas superficies; por ser un electrólito débil, tiene una conductividad eléctrica relativamente baja en comparación con otros ácidos fuertes, como el ácido clorhídrico.^(3,4)

La materia prima fundamental para producir ácido fosfórico es la roca fosfórica que contiene fosfato de calcio, entre otros minerales. La mayoría de la roca fosfórica se extrae de minas a cielo abierto en países como Marruecos, China, Estados Unidos y Rusia. En Cuba después de la extracción, la roca de fosfato se somete a procesos de trituración y molienda para reducir su tamaño y aumentar su superficie de contacto.⁽⁵⁾

En Cuba se encuentran importantes reservas de roca fosfórica, principalmente en la región de Sierra de Cubitas, Camagüey, zona de rocas sedimentarias de origen marino del Cretácico, que se formaron hace aproximadamente 100 millones de años. La roca fosfórica en esta zona tiene una alta calidad y una concentración media del 28 al 30 % de pentóxido de difósforo (P₂O₅), lo que lo hace adecuado para la producción de ácido fosfórico y fertilizantes.⁽⁶⁾ Cuba cuenta con importantes reservas de roca fosfórica y utiliza este recurso como

materia prima para la producción de ácido fosfórico y fertilizantes en las plantas de Moa y Cienfuegos.

La empresa estatal Geominera se encarga de la exploración y explotación de los recursos minerales en Cuba; y se han identificado importantes depósitos de roca fosfórica en esta región, los cuales se encuentran entre los mayores de Latinoamérica.

La demanda de ácido fosfórico en Cuba es elevada, por lo que se requiere importar este producto con la calidad requerida para satisfacer el mercado interno.

Luego, el objetivo de esta investigación fue aplicar un procedimiento eficiente para la producción de ácido fosfórico mediante la lixiviación de roca fosfórica cubana utilizando ácido clorhídrico al 5 % de producción nacional.

Materiales y métodos

Caracterización fisicoquímica del mineral

La roca fosfórica, de fórmula general $\text{Ca}_5(\text{X})(\text{PO}_4)_3$, es una roca sedimentaria que contiene fosfato de calcio, X (halógenos) y otros minerales, se extrae de minas a cielo abierto en todo el mundo.⁽⁵⁾

Apatita es la roca fosfatada más importante que se aplica en la producción de ácido fosfórico de grado industrial y alimentario. Es principalmente del fluoruro y el tipo de hidróxido. Ambas rocas contienen muchas impurezas: flúor (F), cloruro (Cl^-), óxidos de hierro y aluminio (Fe_2O_3 , Al_2O_3); piritas (sulfúrico ferroso, FeS) y materia orgánica fosilizada.⁽⁷⁾

Existe otro grupo de impurezas, tales como el arsénico, cadmio, cobre, plomo, níquel, cinc y mercurio los que están presentes en la mayoría de las rocas fosfóricas y que podrían pasar al ácido durante el proceso de reacción. Las rocas fosfóricas contienen de forma natural uranio y otros componentes radiactivos del uranio, en dependencia del material fosfático.⁽⁸⁾ El uranio sale junto con el ácido producido y el radio se coprecipita con el fosfoyeso. La cantidad de uranio es prácticamente nula en algunas rocas fosfóricas.⁽⁹⁾

Cuba, cuenta con reservas considerables de roca fosfórica que se distribuyen en 10 provincias destacando los yacimientos de Trinidad de Guedes en Matanzas. Presenta como componentes fundamentales el pentóxido de difósforo (29,16 %) y el óxido de calcio (45,54 %) (tabla 1).⁽⁵⁾

Tabla 1- Composición química de la roca fosfórica cubana

Componentes	%	Componentes	%
SiO ₂	8,10	K ₂ O	0,28
Al ₂ O ₃	4,96	P ₂ O ₅	29,16
Fe ₂ O ₃	3,55	MnO	0,03
TiO ₂	0,19	SO ₃	< 0,10
CaO	45,54	P.P.I	7,20
MgO	0,48	F	0,29
Na ₂ O	0,53	Materia orgánica	0,48

Fuente: Pedraza (2022)

En las fases minerales, predominan los carbonatos y la colofana (tabla 2)

Tabla 2- Análisis mineralógico roca fosfórica cubana

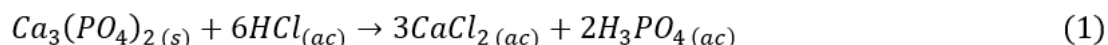
Mineral	%
Colofana	32
Carbonatos	60
Glauconita	Granos raros
Cuarzo	2
Restos fósiles	3
Granos carbonatos con inclusiones bituminosa	1
Óxidos e Hidróxidos de hierro	2
Hermatita	Granos raros

Fuente: Pedraza (2022)

Descripción del proceso de producción de ácido fosfórico a partir de fosforita y ácido clorhídrico

El proceso en estudio parte de la patente ⁽¹⁰⁾ donde propone un proceso eficiente para la obtención de ácido fosfórico de elevada pureza. A continuación, se describen las etapas del proceso.

Lixiviación ácida: la roca fosfórica triturada en un molino de anillos, con tamaño de grano entre 150-500 micrones, se agrega a un reactor de contacto tipo tanque agitado con una disolución de ácido clorhídrico al 5 %, que por ser diluido disminuyen los problemas de corrosión, la viscosidad del medio, la separación de las sustancias insolubles es sencilla y rápida, no hay generación de calor durante la descomposición, por lo que el proceso se realiza a temperatura ambiente; es de bajo costo (1).



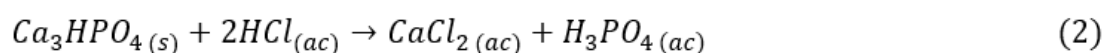
Filtración: La corriente de salida del reactor pasa por un filtro de prensa para eliminar los sólidos no disueltos remanentes del proceso de reacción.

Neutralización: En esta etapa se neutraliza el ácido fosfórico y precipita el CaHPO₄ que se enriquece en P₂O₅ en comparación con el mineral inicial. Se

utilizan 2 reactores de contacto que operan en serie. En los reactores se añade CaCO_3 y Ca(OH)_2 respectivamente.

Filtración: La mezcla acuosa resultante de los reactores de neutralización se lleva a un filtro de bandas donde se separa el CaHPO_4 sobre la banda móvil y se filtra el líquido remanente.

Reactor de formación: La torta proveniente del filtro rica en CaHPO_4 se hace reaccionar con ácido clorhídrico al 20 % para generar una disolución que contiene H_3PO_4 y CaCl_2 de alta pureza. La reacción transcurre en 30 min (2).



Columna de Extracción: El licor proveniente del reactor de formación, que contiene H_3PO_4 ; CaCl_2 y HCl pasa a la etapa de extracción L-L con el objetivo de separar el H_3PO_4 y el HCl , quedando en la mezcla acuosa las impurezas y el CaCl_2 . El licor se pone en contacto a contracorriente con n-butanol, una relación en volumen n-butanol/agua) = 2. en una columna de platos. Los ácidos fosfórico y clorhídrico se transfieren al solvente orgánico y por su parte el cloruro de calcio y las impurezas permanecieron en la fase acuosa.

Columna de lavado: La disolución orgánica (extracto) se alimenta a una columna de platos para ser lavada a contracorriente con agua como solvente y extraerle los ácidos fosfórico y clorhídrico que contiene. El n-butanol libre puede reutilizarse en la sección de extracción, disminuyendo los costos de operación del proceso. La fase acuosa (extracto) obtenida en esta columna pasa a la etapa de concentración del proceso.

Concentración: La disolución de ácido fosfórico recuperada en la torre de lavado, se somete a un proceso de evaporación, que al tener una temperatura de ebullición superior al del ácido clorhídrico, se obtiene como producto concentrado y por la evaporación saldrán las trazas de ácido clorhídrico.

Balance de materiales y diseño de equipos fundamentales

El balance de masa y energía propicia el cálculo de las cantidades de materiales y la cuantificación en los cambios energéticos involucrados en un proceso a partir de un mínimo de información. Estas operaciones están íntimamente relacionadas con el diseño, evaluación de equipos y el análisis

de 93,6 % del P_2O_5 presente en la roca fosfórica, lo que indica que la metodología propuesta es efectiva para la extracción de fósforo. Sin embargo, la pérdida del 6,4 % restante del contenido de P_2O_5 se distribuye principalmente en las etapas de filtración y neutralización, y en la posible formación de compuestos intermedios no deseados.

Tabla 3- Resultado de los balances de materiales

Balance de materiales	Resultados	Unidad
Cantidad de HCl 5%	1497,6	kg/h
Cantidad de $CaCl_2$	113,48	kg/h
Masa de la mezcla a la salida del reactor I	1647,6	kg/h
Masa de la torta en el filtro I	43,03	kg/h
Masa del líquido filtrado	1604,47	kg/h
$CaCO_3$	58	kg/h
$Ca(OH)_2$	20,1	L/h
Masa de H_3PO_4 que reacciona en el reactor II	56,86	kg/h
$CaHPO_4$	78,4	kg/h
Masa de agua en el reactor II	10,5	kg/h
Masa de agua en el reactor III	1,6	kg/h
Torta en el filtro II	91,1	kg/h
Líquido filtrado en el filtro II	1599,48	kg/h
Cantidad de HCl 20%	278,3	kg/h
Licor a la salida del reactor IV	374,34	kg/h
Cantidad de butanol puro	636,044	kg/h
Masa de ácido fosfórico 80% pureza	88,90	Kg/h

El consumo de HCl es significativo y representa un aspecto crítico para la economía del proceso. Para asegurar la calidad y la eficiencia de la reacción se emplea un 20 % de ácido en exceso, que permite garantizar una conversión elevada, pero incrementa los costos operativos.

El proceso genera 113,48 kg/h de cloruro de calcio, como principal subproducto lo que representa un desafío para la gestión ambiental si no se le da un valor agregado como producto comercializable como agente anticongelante o en el tratamiento de aguas.

Dimensionamiento del equipamiento

El dimensionamiento de los equipos para el proceso de obtención de ácido fosfórico evalúa los aspectos técnicos fundamentales (tabla 4).

Tabla 4- Dimensiones características del equipamiento

Etapa	Equipo	Cantidad	Parámetros principales
Molienda	Molino de anillos	1	N = 4,5 kW
Reacción química (lixiviación ácida)	Reactor de contacto	1	V= 750 L/h H= 1,08 m D= 0,983 m
Neutralización	Reactores	2	V= 1513 L/h V= 1014 L/h H= 1,364 m H= 1,17 m D= 1,24 m D= 1,062 m
Reacción química	Reactor de contacto	1	V= 152 L/h H= 0,64 m D= 0,58 m
Filtración	Filtro prensa	1	Capacidad 20-50 pie ³
	Filtro de bandas	1	Ancho= 2- 3,5 m
Extracción L-L	Columna de extracción	1	Z= 2 m D= 0,2 m
Lavado	Torre de lavado	1	Z= 2 m D= 0,2 m
Concentración	Evaporadores	3	A = 60,9 pie ² Q = 181 223,95 kJ/h

Con el correcto diseño del reactor de contacto, donde ocurre la lixiviación ácida de la fosforita con el ácido clorhídrico al 5% peso, se puede asegurar un tiempo de residencia adecuado para garantizar la completa dilución de la roca fosfórica. Este dimensionamiento considera la necesidad de agitación efectiva para mantener en suspensión las partículas sólidas y promover la transferencia de masa entre las fases.

Los reactores de neutralización muestran un diseño escalonado que favorece el control del pH y la formación del CaHPO_4 , la diferencia de volumen entre los reactores permite un mejor control de las reacciones químicas involucradas.

El sistema de filtración incluye dos tecnologías distintas, un filtro de prensa para la etapa inicial y un filtro de bandas para la posterior separación del CaHPO_4 . El filtro prensa permite manejar y separar eficientemente los sólidos no disueltos salientes de la etapa de reacción, dejando solo el líquido homogéneo para la etapa de neutralización. El filtro de bandas es adecuado para el manejo de tortas húmedas como la torta de CaHPO_4 , en esta etapa es recomendable un lavado a contracorriente en el filtro para mejorar la recuperación de productos valiosos y reducir las pérdidas de compuestos fosforados.

Las columnas de extracción líquido-líquido y de lavado son de diseño compacto que favorecen el proceso de transferencia de masa entre las fases. La selección del n-butanol como solvente de extracción permite separa con gran

precisión el ácido fosfórico de las impurezas, sin embargo, el consumo de este solvente representa un costo operativo significativo.

Estimación de la inversión

El estudio económico del proyecto revela una situación favorable sustentada en indicadores claves que demuestran su viabilidad económica. El análisis comprende una evaluación integral de los costos, inversiones y parámetros de rentabilidad que permiten proyectar el desempeño financiero del proyecto a mediano y largo plazo (tabla 5).

Tabla 5- Costo del equipamiento de la planta de obtención de ácido fosfórico

Equipos	Cantidad	Precio [\$]	Precio actualizado [\$]
Molino de anillos	1	23 087,75	100 893,47
Reactor I	1	5 000,00	21 850,00
Reactor II	1	10 300,00	45 011,00
Reactor III	1	10 000,00	43 700,00
Reactor IV	1	1 200,00	5 244,00
Filtro prensa	1	1 500,00	6 555,00
Filtro de bandas	1	11 000,00	48 070,00
Torres de extracción L: L y lavado	2	20 000,00	87 400,00
Intercambiador de calor	1	160,00	699,20
Evaporadores	3	14 700,00	64 239,00
Bombas centrífugas	7	14280,10	62 404,04
Costo adquisición		111 227,85	486 065,70

Tomando como referencia la tabla 6-9 (Peters, 2003) ⁽¹⁵⁾, se procedió a estimar en función del costo de adquisición, cada uno de los restantes componentes de los costos directos, costos indirectos, capital fijo de inversión y el costo total de inversión (tabla 6).

Tabla 6- Resumen de la estimación y cálculo del costo total de inversión

Indicador	Valor [\$]
Costos directos (CD)	2 628 490,477
Costos indirectos (CI)	1 290 565,144
Capital fijo de inversión (CFI)	3 919 055,620
Costo total de inversión (CTI)	4 807 059,160

El costo total de producción de 368 431,849 \$/año está directamente relacionado con el proceso de producción de ácido fosfórico (tabla 7).

Tabla 7- Componentes del costo base 704,088 t de ácido fosfórico

Componente del costo de operación	Valor [\$ /año]
Cargos fijos	36 577,852
Gastos generales	13 230,020
Costo de fabricación	355 201,829
Costo total de producción	368 431,849

El costo total de la inversión asciende a \$ 4 807 059,16 de ello el 54,7 % corresponde a costos directos y el 26,8 % a costos indirectos. Los costos directos incluyen principalmente equipamiento, instalación de tuberías e instrumentación, mientras que los costos indirectos cubren ingeniería, supervisión y gastos imprevistos. El capital fijo de inversión alcanza valores de \$ 3 919 055,62, incluyendo un 12% de fondos de trabajo que garantizarán la operación inicial de la planta.

El costo total de producción se estimó en \$ 368 431,849 para una producción de 704, 088 toneladas de ácido fosfórico al año. Este valor se descompone en un 9,9 % en cargos fijos, 3,6 % en gastos generales y un 96,4 % en costos de fabricación. Los costos de fabricación incluyen las materias primas, la mano de obra, el mantenimiento y los servicios auxiliares.

Indicadores de rentabilidad VAN, TIR, PRD

Una valoración de la factibilidad de la inversión se realizó sobre la base del cálculo de los indicadores dinámicos VAN (valor actual neto), TIR (tasa de rendimiento interna) y el PRD (período de recuperación al descontado), tomando una tasa de interés del 15 % (tabla 8).

Tabla 8- Valores de los indicadores de factibilidad de la variante en estudio

Indicadores	Valor
Valor actual neto. VAN [\$]	7 866 969,23
Tasa de Rendimiento Interna. TIR [%]	76
Plazo de recuperación al descontado. PRD [años]	3,5

Los indicadores de la tabla 8 superan ampliamente los umbrales mínimos aceptables para procesos industriales, situándose la TIR muy por encima del costo capital promedio del sector químico. El VAN positivo y significativo garantiza que el proyecto generará valor económico incluso considerando los flujos descontados a lo largo de su vida útil.

Conclusiones

1. Se desarrolló la selección y el dimensionamiento de los equipos fundamentales para la producción de ácido fosfórico a partir de roca fosfórica y ácido clorhídrico cubanos, a partir de una conversión del 93,6 % de P_2O_5 y producción de 88,9 kg/h del ácido al 80 % de pureza.
2. Se determinó que el proyecto es económicamente viable para un VAN de \$7,8 millones, TIR del 76 %, y un período de recuperación al descontado (PRD) de 3,5 años.
3. Se determinó una generación de 113,48 kg/h de cloruro de calcio como subproducto, lo cual constituye una oportunidad para su aprovechamiento comercial.

Referencias bibliográficas

1. MENDOZA HERNÁNDEZ, L.A., VEGA ALIAGA, H.C. *Proyecto de pre-factibilidad para instalar una planta de ácido fosfórico a partir de roca fosfatada*. 2015. <http://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/130>
2. SIERRA B.C. *Rocas fosfóricas: Nueva fuente de fósforo para praderas y cultivos*. 1990. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/38089>
3. RODRÍGUEZ B. F. D. *Procedimiento para la obtención de ácido fosfórico usando ácido clorhídrico de producción nacional*. 2022. <https://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/17744>
4. ARMAS H., L. *Diseño de una planta química para la obtención de ácido fosfórico basado en el estudio de la necesidad de productos fosfatados en Cuba* [Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Facultad de Química y Farmacia. Departamento de Ingeniería Química]. 2021. <https://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/13100>
5. ACOSTA, A., LON-WO, E., CÁRDENAS, M., ALMEIDA, M. Evaluación de la fosforita del yacimiento Trinidad de Guedes como fuente potencial de fósforo para gallinas ponedoras. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 2009. **43**(2). 167-174. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193015425012>
6. PEDRAZA, J., GONZÁLEZ, E., MIÑO, J. E., MORALES, M. Parámetros de control para producir ácido fosfórico por reacción química a partir de fosforita cubana. *+Ingenio, Revista de Ciencia Tecnología e Innovación*, 2020. **4**(1). 29-40.

7. SALAS, B.V., WIENER, M.S., MARTINEZ, J.R.S., WIENER, M.S., SALAS, B.V., MARTINEZ, J.R.S. Phosphoric Acid Industry: Problems and Solutions. En *Phosphoric Acid Industry—Problems and Solutions*. IntechOpen. 2017. <https://doi.org/10.5772/intechopen.70031>
8. ORDOÑEZ, S.Y. C., RODRÍGUEZ, A.C., RODRÍGUEZ, S. L. Determination of optimal conditions for obtaining phosphate fertilizer from cuban phosphoric rock. *Ingeniería y Competitividad*, 2017. **19**(2). 137-148. <https://doi.org/10.25100/iyc.v19i2.5300>
9. Hernandez, C. A. *Diseño de una planta química para la producción de ácido fosfórico a partir de la fosforita cubana*. Trabajo de Diploma. J. G. Pedraza y E.G. Suárez (dir.). Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, 2019. <https://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/11580>
10. Mohamed Takhim. (2012). *Procedimiento para la producción de ácido fosfórico de elevada pureza* (Patente española n.º ES2384772T3). (2012). Ecophos SA. <https://patents.google.com/patent/ES2384772T3/es>
11. TREYBAL, R. *Mass-transfer operations* (3ra ed.). McGraw-Hill. 1980.
12. LEVENSPIEL, O. *Ingeniería de las reacciones químicas*, (3ra ed.). McGraw-Hill. 1985. ISBN: 968-18-5860-3.
13. MCCABE, W., SMITH, J., HARRIOTT, P. *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química* (7.^a ed.). McGraw-Hill. 2007. ISBN 9701061748. <http://librodigital.sangregorio.edu.ec/librosusgp/14698.pdf>
14. PERRY, R. H., GREEN, D. W. *Perry's chemical engineers' handbook* (9th ed.). [En Línea]. McGraw-Hill. 2019. ISBN 9780071834087. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071834087>
15. PETERS, M., TIMMERHAUS, M., WEST, R. *Plant Design and economics for Chemical Engineers* (5th ed.) McGraw-Hill. 2003. ISBN 0072392665.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

Contribución de los autores

Yosviel Reyes Delgado: conceptualización, investigación y redacción.

Frank Daniel Rodríguez Ballesteros: investigación y revisión.

Laura Aracha Alejo Calderón: investigación y redacción.

Erenio González Suárez: conceptualización, supervisión y revisión del informe.