

# Revisión de métodos para la purificación del ácido fosfórico

Juan Carlos Olvera Chancón<sup>1</sup>, Marcos Fernando Rodríguez Ordoñez<sup>2</sup>, Raúl García García<sup>3</sup>, Fernando Felipe Rivera Iturbe<sup>4</sup>, Juan Manuel Olivares Ramírez<sup>5</sup> y German Orozco Gamboa<sup>6</sup>  
<sup>1</sup>[jolvera@cideteq.mx](mailto:jolvera@cideteq.mx), <sup>2</sup>[mrodriguez@cideteq.mx](mailto:mrodriguez@cideteq.mx), <sup>3</sup>[rgarciag@utsjr.edu.mx](mailto:rgarciag@utsjr.edu.mx),  
<sup>4</sup>[frivera@cideteq.mx](mailto:frivera@cideteq.mx), <sup>5</sup>[jmolivaresr@utsjr.edu.mx](mailto:jmolivaresr@utsjr.edu.mx), <sup>6</sup>[gorozco@cideteq.mx](mailto:gorozco@cideteq.mx),  
<sup>1, 2, 4 y 6</sup>Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica  
<sup>3 y 5</sup>Energías Renovables, Universidad Tecnológica de San Juan del Río, Querétaro, México

## Resumen

No existen sustitutos para rocas de fosfato como materia prima en la producción de fertilizantes de fosfato y ácido fosfórico. Se estimó que el 75-80% de los elementos traza presentes en la roca, no son eliminados en el proceso de producción de ácido fosfórico de grado mercantil. Las principales impurezas metálicas son cadmio (Cd), hierro (Fe), magnesio (Mg) y uranio (U). Se revisaron 212 artículos publicados, los cuales reportan una o más técnicas de purificación. Se encontró que al menos en 248 ocasiones han sido evaluadas varias técnicas de purificación. El 90% de los estudios revisados se publicaron en el siglo XXI. Cerca del 75% de los estudios realizados sobre la purificación corresponden a los métodos de extracción con disolventes, métodos de precipitación y adsorción. Estas técnicas son las más usadas en la industria. En las 248 evaluaciones de técnicas, no se informa el gasto energético global, excepto en estudios de electrodiálisis. No se puede determinar qué técnica es superior a otras, algunas muestran la desventaja de la complejidad de sus usos. Estos procesos son efectivos químicamente, pero no es posible saber qué tan costosos son. Ninguna técnica por sí sola puede lograr una alta pureza de grado alimenticio o farmacéutico, es necesaria la realización de un proceso de purificación en varias etapas. Se espera que se continúe con una gran cantidad de investigaciones, las cuales tienen el objetivo de mejorar la purificación del ácido fosfórico.

**Palabras clave:** Ácido fosfórico grado mercantil, Fertilizantes, Purificación, Técnicas

## Abstracts

*The production of fertilizer phosphate and phosphoric acid is obtained by phosphate rocks. The 75-80% of the Metallic impurities present in the rock are not eliminated in the process of producing merchant-grade phosphoric acid, being the main metal impurities: Cadmium (Cd), Iron (Fe), Magnesium (Mg) and Uranium (U). This review classified 248 studies and 90% of the studies were published in the 21st century. Many methods have been employed for the purification of phosphoric acid: Adsorption (15.32%), Bioleaching (0.40%), Chemical precipitation (17.34%), Crystallization (1.23%), Evaporation (0.40%), Electrochemical (9.67%), Flotation (0.40%), Ion exchange (6.45%), Magnetism (0.81%) Nanofiltration (3.63%), Reverse osmosis (0.40%), Solvent extraction (43.15%) and Vertical zone melting technique (0.81%). It is not possible to determine which technique is superior to the others and some of them show the disadvantage of the complexity of their uses. No single technique can achieve a high purity of food or pharmaceutical grade, it is necessary to carry out the purification process in several stages.*

**Keywords:** Wet phosphoric acid, Crude phosphoric acid, Merchant-grade, Purification, Stripping, Impurities.

Artículo arbitrado	
Recibido:	aceptado:
05 de abril de 2019	14 de julio de 2019

## Introducción

Los fosfatos son un ingrediente primario en los fertilizantes y en suplementos alimenticios. Hasta el momento, no existen sustitutos para rocas de fosfato como una materia prima en la producción de fertilizantes de fosfato y ácido fosfórico. En consecuencia, la demanda comercial de la roca de fosfato y ácido fosfórico aumentará mientras la población del mundo continúe incrementándose. Alrededor de 176 millones de toneladas de roca de fosfato son comercializadas anualmente y el ácido fosfórico es el segundo ácido más producido después del ácido sulfúrico. Por lo tanto, hay un gran número de estudios alrededor del ácido fosfórico y su proceso de producción a partir de roca de fosfato, más detalles sobre la producción de ácido fosfórico son ampliamente discutidos en la literatura (Cordell, Drangert, & White, 2009; Isherwood, 1998; Liu, Villalba, Ayres, & Schroder, 2008; Villalba, Liu, Schroder, & Ayres, 2008). Las reservas mundiales de fosfato, es decir, las cantidades que pueden extraerse económicamente, se estiman en 2400 millones de toneladas métricas de fósforo (Liu et al., 2008). Considerando un incremento anual del 2%, en el futuro inmediato se puede esperar que el consumo mundial de roca de fosfato ascienda a 214 millones de toneladas por año. El ácido fosfórico puede ser usado en la producción de fertilizantes (87%), comida fosfatada (6%), y sales alimenticias (7%), además presenta otros usos como dispositivos electrónicos y pilas de combustible ( $\leq 1\%$ ). Se estimó que el 75-80% de los elementos traza (concentración menor de 100 partes por millón), presentes en la roca, no son eliminados en el proceso de producción y, en consecuencia, se vuelven parte del fertilizante fosfatado. La pureza de los ácidos fosfóricos se establece de acuerdo con la concentración de impurezas. Los siguientes grados de pureza están comercialmente disponibles: ácido de grado técnico o mercantil, ácido de grado alimenticio, ácido de grado farmacéutico, ácido de grado analítico, ácido de grado electrónico. El ácido fosfórico de grado alimenticio es utilizado en refrescos de cola. Por ejemplo, en México, el consumo de bebidas gaseosas es de 119 L por persona por año, si cada litro de

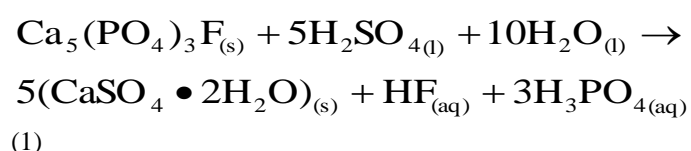
refresco contiene 0.5 mL de ácido fosfórico grado alimenticio, se obtiene un promedio de consumo anual de 59.5 mL de ácido fosfórico grado alimenticio por persona. Las rocas de fosfato son producidas en 40 países, las principales fuentes están localizadas en Marruecos y Sahara occidental, Túnez, Egipto, Iraq, Argelia, Brasil, Israel, Siria, Sudáfrica, Jordania, Australia, Senegal, Estados Unidos, China, India, Togo, Canadá y Rusia (Abouzeid, 2008; Kawatra, 2013; Van Vuuren, Bouwman, & Beusen, 2010). Cabe mencionar que el fertilizante se produce actualmente a partir de recursos no renovables como las rocas de fosfato y, en consecuencia, se especula que se producirá un total agotamiento de la roca fosfórica, lo que aumentará excesivamente los costos de producción al ser necesario el uso de otras fuentes de fosfato (Kawatra, 2013; Van Vuuren et al., 2010). Es importante aclarar que existen opiniones muy divergentes sobre la posibilidad del agotamiento de este tipo de roca (Van Vuuren et al., 2010).

El ciclo del uso del fósforo en la agricultura moderna establece las siguientes etapas: la minería, la producción de fertilizantes, la aplicación de fertilizantes a los suelos agrícolas, la recolección de cultivos, el procesamiento de alimentos, el consumo de alimentos por animales y seres humanos, la excreción y la recirculación al sistema alimentario (Van Vuuren et al., 2010). En cada paso, existe la posibilidad de fugas de los sistemas industriales a su entorno, lo que en consecuencia daña los entornos naturales. Liu et al (2008) comentó que la pérdida neta del fósforo de las tierras de cultivo es aproximadamente la mitad del fósforo extraído anualmente en el mundo. De acuerdo con Cordell (2009), cada tonelada de fosfato procesado a partir de roca de fosfato genera 5 toneladas de sulfato de calcio insoluble (fosfoyeso), con lo cual, existe el riesgo de emisión de este material al agua subterránea. La producción de fertilizantes a partir de roca de fosfato implica contaminantes de metales pesados y emisiones de carbono significativas. Hay algunas rocas de fosfato que contienen radionucleidos de torio y uranio (da Conceição, Antunes, & Durrant, 2012). Entonces, si la roca de fosfato no purificada se aplicara directamente a los

suelos, varios metales serán distribuidos a los suelos agrícolas, con el posible riesgo de presentarse su exposición a humanos y animales (Isherwood, 1998; Liu et al., 2008; Villalba et al., 2008). Por ejemplo, Acosta (2007) mide la concentración de metales pesados (Cr, Ni, Cu, Zn, Pb) presentes en suelos agrícolas de Valle del Mezquital (Hgo. México), en niveles que no son tóxicos para los humanos, pero que deben ser tomados en cuenta por la acumulación anual de los mismos. Está claro que será necesario reducir la concentración de metales pesados en la roca de fosfato. Ese tema es el que motiva nuestro estudio.

El ácido es fabricado utilizando dos procesos diferentes: proceso térmico y húmedo. En el proceso térmico, el ácido fosfórico se produce inicialmente mediante la reducción de la roca de fosfato, seguido

por una oxidación e hidratación. El proceso húmedo implica la reacción de la roca de fosfato con un ácido para producir ácido fosfórico en bruto, que puede contener impurezas inorgánicas y orgánicas que varían según el depósito del mineral (Kawatra, 2013). Aproximadamente el 90% del ácido fosfórico producido en todo el mundo se obtiene a partir del ácido fosfórico en proceso húmedo derivado de la digestión ácida. Para producir ácido fosfórico por proceso húmedo, la roca de fosfato concentrada se hace reaccionar con el ácido (generalmente ácido sulfúrico) para formar cristales de sulfato de calcio dihidratado. La principal reacción es la siguiente:



**Figura 1.** Diagrama de flujo del proceso simplificado para producción de ácido fosfórico. En la industria el contenido de fósforo se mide bajo la forma de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Este contiene un 44% de riqueza en fósforo (P). Esquema basado en información de Gilmour (2014). Fuente : elaboración propia.

La Figura 1 presenta un diseño esquemático básico del proceso de producción de ácido fosfórico y el diagrama, ilustra dónde se eliminan algunas impurezas a través de la filtración. El flujo de entrada contiene roca, ácido sulfúrico, agua e impurezas. Las etapas de filtración son realizadas para separar el yeso sólido del ácido fosfórico. En las etapas posteriores de filtración y concentración, se eliminan algunas impurezas; sin embargo, varias impurezas no se eliminan en estas etapas y permanecen en el ácido grado comercial.

El ácido grado comercial contiene al menos 30 contaminantes diferentes, entre los que se encuentran elementos metálicos muy tóxicos y ácido fluorhídrico, los cuales deben eliminarse para obtener el ácido purificado. Si estos elementos no se recuperan, pueden acumularse en el suelo y, como consecuencia, las plantas pueden incorporarlos, lo que representan un peligro para la salud (Acosta Álvarez, 2007; Cordell et al., 2009; Villalba et al., 2008).

Gilmour (2014) revisó la tecnología para la producción industrial de ácido fosfórico desde la década de 1960. Este autor comenta que la palabra

purificación en la industria fosfórica se aplica con una interpretación muy amplia, es decir, que hay varias tolerancias diferentes para las impurezas. Muchas compañías de fosfatos realizan la purificación con base en la técnica de extracción con disolventes. Por ejemplo, el instituto para investigación industrial Israel Mining Industries (IMI), a fines de la década de 1950, inventó las rutas de ácido clorhídrico o ácido sulfúrico para convertir roca fosfórica a ácido fosfórico. En este proceso el método de extracción con disolventes es un paso esencial. En México la producción de fosfatos se realiza en la planta Innophos Fosfatados de México Complejo Industrial Pajaritos Coatzacoalcos (Veracruz) con base en el método IMI. En esta planta se reciben rocas de fosfato de Marruecos y otras fuentes mexicanas de rocas de fosfato que se encuentran en San Juan de la Costa (Baja California) y Zimapan (Hidalgo). En México las minas están ubicadas en San Luis Potosí, Guanajuato, Chiapas. En San Juan del Río (Querétaro) existe una industria (HERVI S.A. DE C.V.) que produce fosfatos a partir de la fosforita, mineral proveniente de San Luis Potosí.

## Metodología

Se consideraron tres fuentes de información *SciFinder*, *Scopus* y *Google Académico* (en inglés, *Google Scholar*). *SciFinder* es un sistema de información de la American Chemical Society, *Scopus* es una base de datos de literatura científica y *Google Académico* es un buscador de Google enfocado a la comunidad científico-académica.

Se escogieron las siguientes palabras clave como fijas: 1) *wet phosphoric acid*, *phosphoric acid*, *crude phosphoric acid*, 2) se combinaron esas palabras con las siguientes palabras una cada vez, 3) *purification*, *stripping*, *purification process*, *impurities*; *D2EHPA*; *extractant*; *solvent extraction*; *TOPO*; *Electrodialysis*, *Clay materials*, *adsorption*, *crystallization*, *membrane*, *review*, *Exchange resin*.

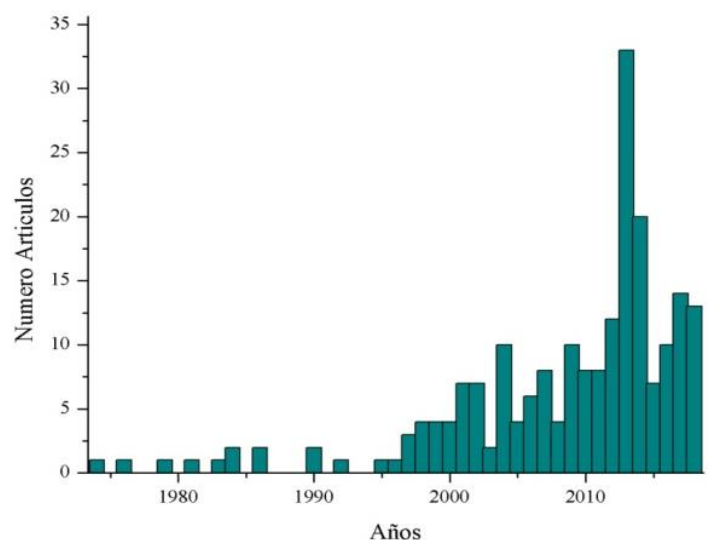
Se revisaron los años de 1974 al 2018 con esta búsqueda. Se escogieron los primeros 10 resúmenes

por orden de relevancia, y se decidió cuales artículos merecían una lectura completa. Se realizaron las lecturas del documento para clasificar qué técnicas se usaron, la información sobre el número de pasos del proceso y la energía aplicada en cada paso. Se consideraron varios de los artículos que citaban al artículo leído y, para encontrar quienes citan al artículo leído, se usaron dos bases de datos *Scopus* and *Google Académico*.

La lista completa de las referencias encontradas se halla en la tesis de maestría de Rodríguez (2018). Además, Rodríguez describe detalladamente las técnicas de purificación.

## Resultados

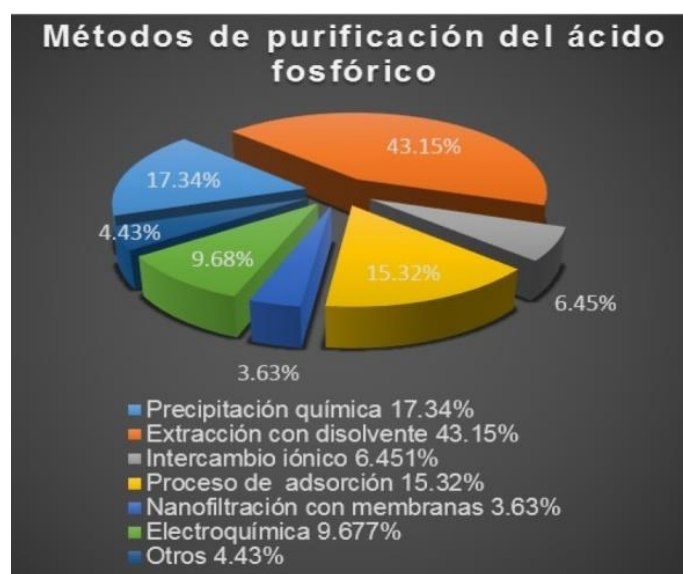
En la Figura 2 se presentan las publicaciones por año sobre el tema con un promedio de 6.42 publicaciones por año; sin embargo, el 90% de los 212 artículos considerados se publicaron en el siglo XXI. Una posible explicación del aumento de este ritmo de publicación, puede ser la política editorial que tuvieron varios países del Medio Oriente, donde se dieron muchas facilidades a los investigadores para divulgar su información en formato abierto (en inglés: *open access*).



**Figura 2.** Variación de número de publicaciones sobre el tema de la purificación del ácido fosfórico, a lo largo del tiempo. Fuente: elaboración propia.

Es importante mencionar que el número de artículos publicados es de 212, pero, como se combinan varios métodos en las publicaciones, las técnicas son estudiadas 248 veces. Con base en lo anterior se elaboró la Figura 3.

La mayoría de estudios realizados corresponde al método de extracción con disolventes, seguido por los métodos de precipitación y adsorción. Estos tres métodos representan cerca del 75% de los artículos publicados, y cabe mencionar que estas técnicas son las mayormente usadas en la industria. El porcentaje de estudios que se enfocan al uso de membranas (nanofiltración u osmosis inversa) es bajo (aproximadamente 4%), resinas de intercambio iónico son pocas estudiadas (6.45%) y otras técnicas escasamente alcanzan un 4.43% del total estudios. Las reacciones redox, tienen cierto interés en la academia, y se usan complementando otras técnicas. Los estudios de electrodiálisis, electrocoagulación o electrólisis si son consideradas en la academia (9.68%), sin existir un uso industrial de estas.



**Figura 3.** Métodos de purificación del ácido fosfórico presentados en artículos publicados en revistas científicas o tecnológicas. Fuente: elaboración propia. Se agruparon varias técnicas bajo la categoría de otras técnicas (—), estas técnicas son biolixiviación 0.40 %, cristalización 1.23 %, evaporación 0.40%, flotación 0.40 %, fundición en etapas con un flujo vertical 0.81. %, osmosis inversa 0.40 %, paramagnetismo 0.81%. Fuente: elaboración propia.

Hay cuatro impurezas de considerable importancia en los estudios reportados: cadmio (Cd), hierro (Fe), magnesio (Mg) y uranio (U). El Cd es un elemento extremadamente tóxico, por lo que su eliminación del ácido de calidad comercial es crucial. El contenido de Mg aumenta la viscosidad (Yu & Liu, 2010) y, en consecuencia, causa muchos problemas. En la mayoría de los ácidos de grado alimentario la concentración de Fe debe ser inferior a 10 ppm, para alcanzar este nivel se requiere un gran gasto energético (Faustino L, Prado, P.E., 2007). El uranio es un elemento radioactivo que puede ser delimitado para aplicaciones de fertilizantes (da Conceição et al., 2012).

Se encontraron tres grupos de trabajo académicos en México. En la Universidad de Guanajuato se estudió un sistema que combina dos técnicas (Faustino L. Prado, P.E., 2007; L. Hinojosa Reyes et al., 2001) y se observó que la extracción con disolventes en combinación con resinas de intercambio elimina aproximadamente el 90% del Cd de las disoluciones de ácido fosfórico concentrado. También estudiaron la combinación de osmosis inversa y nanofiltración, la cual redujo la concentración de las impurezas aproximadamente 100 veces del valor inicial (González et al., 2002).

Se evaluaron estrategias para activar las membranas de nanofiltración (González Muñoz et al., 2006; González et al., 2006). La viabilidad de la nanofiltración del ácido fosfórico concentrado fue establecida por este grupo, pero el tiempo de vida de la membrana es demasiado corto, como para ser usado en una aplicación industrial. Sin embargo, la eficiencia de remoción de fluoruros fue 93.89% (González Muñoz et al., 2006; González et al., 2006; Navarro et al., 2008).

Otro grupo que ha estudiado las técnicas para purificar ácido de calidad comercial se encuentra en el CIDETEQ. Machorro et al (2013) estudiaron la purificación de fosfatos grado mercantil por electrodiálisis. Este grupo encontró que los compuestos formados entre impurezas metálicas y fosfatos disminuyen la interacción electrostática y la conductividad eléctrica de los iones. Se concluyó



que los iones de fosfato no podían migrar fácilmente a través de la membrana, lo cual genera el consumo de una gran cantidad de energía.

Un grupo académico dedicado a este tema labora en la Universidad Autónoma de Baja California (Salas, Wiener, & Martínez, 2017; Schorr, Valdez, Zlatev, & Stoytcheva, 2010). Este grupo proporcionó poca información sobre la purificación del ácido; sin embargo, estudió las severas condiciones corrosivas de los tanques donde se almacena y transporta el ácido fosfórico. Determinó específicamente la corrosión en reactores donde, por ejemplo, la corrosión por erosión de los agitadores y evaporadores es intensa. Este grupo informó que el acero inoxidable sufrió una severa corrosión durante el transporte del ácido.

## Discusión

Las 248 veces que se han estudiado las técnicas o procesos de purificación de ácido muestran que existe un interés en la academia sobre este tema. Estos estudios han determinado la influencia de los diversos parámetros en el rendimiento de los métodos. Debido a que la motivación en la academia suele ser la investigación científica, se presta poca atención a nivel de laboratorio a los costos de los reactores y al consumo de energía.

Estas técnicas mostraron las desventajas siguientes: a) la formación de precipitados en contacto con el ácido fosfórico, que causa la obstrucción del dispositivo de extracción e influye en un bajo rendimiento de filtración; b) una complejidad para el uso de la tecnología, ya que se necesitan integrar varios reactores, filtros, agitadores, entre otros; c) usan productos caros y no regenerativos. Estos procesos son efectivos químicamente, pero no se puede determinar qué tan costosos son. Existen diferentes criterios de pureza, pero es claro, al revisar los resultados reportados, que ninguna técnica por sí sola puede lograr una alta pureza grado alimenticio o farmacéutico, es decir, es necesaria la realización el proceso de purificación en varias etapas. Se espera que se continúe con una gran

cantidad de investigaciones, las cuales tienen el objetivo de mejorar la purificación del ácido fosfórico de todas las impurezas catiónicas y aniónicas. En cada estudio se detallan los resultados obtenidos, pero no contienen una información donde sea posible comparar las energías aplicadas para purificar, una cantidad de ácido a una calidad deseada. Lo anterior, dificulta la comparación de procesos de varias etapas, donde no se informa del gasto energético global, con los métodos electroquímicos de una sola etapa, que tienen una clara información del gasto energético. Una excepción es el trabajo de Gorazda (2014), quien estudia la producción de fosfato trisódico (STPP por sus siglas en inglés) y estima que el consumo de electricidad, en su método no electroquímico, es de 30.4 kWh/t STPP. Además, en su estudio disminuye el gasto energético del calentamiento de todos los líquidos. Daifullah et al (2004) informan del coste de su proceso. Este grupo desarrolló un método de adsorción e intercambio de iones para la eliminación de cationes del ácido de calidad comercial. El método se basó en la sílice extraída por tratamiento alcalino de cáscara de arroz carbonizada. El nuevo método para eliminar  $\text{Fe}^{3+}$  tiene un costo de aproximadamente la mitad del costo habitual, que se reportaba en Egipto en el año 2004.

A pesar del número de trabajos sobre el tema, aún no se puede determinar qué técnica es superior a las otras. La comparación entre técnicas es muy difícil, ya que no existe un parámetro común; como, por ejemplo, costo energético por un kg de ácido producido a partir una concentración de impurezas bien determinadas, para ser usado como referencia. En este caso, suponemos que es la tradición y comodidad de utilizar unos procesos muy conocidos, lo que orienta a los grupos de investigación a refinar conocimientos sobre estos, pues solamente un 15% de los estudios plantea técnicas muy novedosas, lo que debería ser el objetivo último de la investigación.

No se encontró en la literatura una revisión de métodos electroquímicos usados para la purificación de ácido fosfórico, solamente Scott (1995) comenta dos estudios de electrodiálisis (ED) realizados

alrededor de 1995. La aplicación tradicional de electrodiálisis fue capaz de concentrar el ácido de grado reactivo en un factor de 2-3 veces, hasta una concentración de  $1.0 \text{ mol/dm}^3$  y con los consumos de energía de 1.73-2.5 kWh/kg de  $\text{P}_2\text{O}_5$ . El costo de la ED en ese momento fue aproximadamente un 17% mayor que la evaporación. El proceso puede lograr una mayor concentración, pero a expensas de un costo de energía significativamente mayor.

Los estudios realizados con membranas de intercambio iónico comerciales, aún enfrentan el problema de que estas membranas se han diseñado para los procesos de desalinización de agua salobre. Se han sintetizado membranas polisulfonadas de amonio cuaternario, que exhiben una alta eficiencia de purificación del ácido fosfórico por electrodiálisis (Duan et al., 2018). Las tasas de eliminación de los iones metálicos (Fe, Mg, Ca) alcanzan más del 60%, y el consumo de energía fue de 2.73 (kWh/kg) (Duan et al., 2018, 2019). Bagastyo y su grupo (2017) reportan que se necesita más energía para la migración de fosfatos, que en el caso de iones fluoruro; sin embargo, en sus condiciones de operación, se obtiene una purificación con consumos alrededor de 6 mol kW/h.

Bisan y su cuerpo académico (2004) estudiaron la posibilidad de eliminar electroquímicamente el arsénico del ácido fosfórico. Este grupo uso varios electrodos y los mejores resultados se obtuvieron con electrodos de cobre, donde se electrodepositó arsénico (As). Se demostró que es posible eliminar el arsénico con un 24% de eficiencia. El problema del método es la producción de gases tóxicos durante el proceso de electrodeposición.

Un aspecto muy importante para considerar es si los métodos usados para purificar no aumentan los costos producidos por la corrosión. Este asunto no es tomado en cuenta en ningún estudio, aunque es conocido que la corrosión de aceros en plantas industriales, está fuertemente influenciado por las impurezas disueltas que se originan de la roca de fosfato (Salas et al., 2017; Schorr et al., 2010).

## Conclusiones

Los métodos de extracción y purificación del ácido fosfórico se estudiaron en 212 publicaciones, debido a la preocupación de los efectos de las impurezas en la salud humana y el medio ambiente. Las impurezas metálicas más generadas en la producción Cd, Fe, Mg y U. Se observó que los métodos tradicionales, como la extracción con disolventes, requieren altos volúmenes de agua y disolventes orgánicos.

La mayoría de los estudios revisados no son electroquímicos. El método de extracción con disolventes, precipitación y adsorción representan cerca del 75% de los artículos publicados, asimismo, estas técnicas son las fundamentalmente usadas en la industria.

Los métodos electroquímicos, especialmente la purificación por electrodiálisis, requieren investigación y desarrollo de membranas semipermeables, así como la determinación de los parámetros operacionales más adecuados para aumentar la eficiencia energética del proceso. Existen en México solamente tres grupos académicos identificados que estudian este tema y existe la necesidad de una mayor investigación. En consecuencia, se requiere de una nueva tecnología eficiente para la producción de fosfatos, se considera que las técnicas electroquímicas pueden ser la respuesta.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al CONACYT por el apoyo gracias al proyecto FOSIHGO 1999025008.

## Referencias

- Abouzeid, A.-Z. M. (2008). Physical and thermal treatment of phosphate ores — An overview. *International Journal of Mineral Processing*, 85(4), 59–84. <https://doi.org/10.1016/J.MINPRO.2007.09.001>
- Acosta Álvarez, M. M. (2007). Determinación de metales pesados en suelos agrícolas del Valle del Mezquital, Hgo., 82–83. Retrieved from <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/handle/231104/635>

- Bagastyo, A. Y., Anggrainy, A. D., Nindita, C. S., & Warmadewanthi. (2017). Electrodialytic removal of fluoride and calcium ions to recover phosphate from fertilizer industry wastewater. *Sustainable Environment Research*, 27(5), 230–237. <https://doi.org/10.1016/J.SERJ.2017.06.002>
- Bisang, J. M., Bogado, F., Rivera, M. O., & Dorbessan, O. L. (2004). Electrochemical removal of arsenic from technical grade phosphoric acid. *Journal of Applied Electrochemistry*, 34(4), 375–381. <https://doi.org/10.1023/B:JACH.0000016611.62284.70>
- Cordell, D., Drangert, J.-O., & White, S. (2009). The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, 19(2), 292–305. <https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2008.10.009>
- da Conceição, F. T., Antunes, M. L. P., & Durrant, S. F. (2012). Radionuclide concentrations in raw and purified phosphoric acids from Brazil and their processing wastes: implications for radiation exposures. *Environmental Geochemistry and Health*, 34(1), 103–111. <https://doi.org/10.1007/s10653-011-9394-2>
- Daifullah, A. A. ., Awwad, N. ., & El-Reefy, S. . (2004). Purification of wet phosphoric acid from ferric ions using modified rice husk. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 43(2), 193–201. [https://doi.org/10.1016/S0255-2701\(03\)00014-X](https://doi.org/10.1016/S0255-2701(03)00014-X)
- Duan, X., Wang, C., Wang, T., Xie, X., Zhou, X., & Ye, Y. (2018). A polysulfone-based anion exchange membrane for phosphoric acid concentration and purification by electro-electrodialysis. *Journal of Membrane Science*, 552, 86–94. <https://doi.org/10.1016/J.MEMSCI.2018.02.004>
- Duan, X., Wang, C., Wang, T., Xie, X., Zhou, X., & Ye, Y. (2019). Comb-shaped anion exchange membrane to enhance phosphoric acid purification by electro-electrodialysis. *Journal of Membrane Science*, 573, 64–72. <https://doi.org/10.1016/J.MEMSCI.2018.11.062>
- HERVI SA DE CV - HERVI SA DE CV Directorio Empresarial México. (n.d.). Retrieved March 19, 2019, from <https://directorioempresarialmexico.com/empresa/0006273331/HERVI-SA-DE-CV>
- Isherwood, K. F. (1998). Head, information and market research service international fertilizer industry association (IFA). In *Proceedings of an International Workshop on Current Environmental Issues of Fertilizer Production* (pp. 164–167). Paris.
- Katarzyna Gorazda, Zygmunt Kowalski, Regina Kijkowska, DanutaPawłowska-Kozińska, ZbigniewWzorek, Marcin Banach, A. K. N. (2014). Dry single-stage method of sodium tripolyphosphate production – technological and economic assessment. *Polish Journal of Chemical Technology*, 16(1), 41–44. <https://doi.org/10.274/pjet-2014-007>
- Kawatra, S. K. (2013). Beneficiation of phosphate ore. In and E. Society for Mining, Metallurgy (Ed.) (pp. Chapter 1,2; 5–6, 9–10). Retrieved from [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=f\\_BIAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Beneficiation+of+Phosphate+Ore.+Society+for+Mining,+Metallurgy,+and+Exploration+\(SME\).+\(2014\).+&ots=QfUoy](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=f_BIAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Beneficiation+of+Phosphate+Ore.+Society+for+Mining,+Metallurgy,+and+Exploration+(SME).+(2014).+&ots=QfUoy)
- Faustino L. Prado, P.E., P. & A. (2007). Food Grade Phosphoric Acid in Turkey. Retrieved March 19, 2019, from <https://es.scribd.com/document/51902812/Food-Grade-Phosphoric-Acid-in-Turkey>
- Gilmour R. (2014). *Phosphoric Acid Purification, Uses, Technology, and Economics not found | Taylor & Francis Group*. (L. U.S, y Taylor & Francis Group, Ed.). Retrieved from <https://www.taylorfrancis.com/books/9781439895160>
- González Muñoz, M. P., Navarro, R., Saucedo, I., Avila, M., Prádanos, P., Palacio, L., ... Hernández, A. (2006). Hydrofluoric acid treatment for improved performance of a nanofiltration membrane. *Desalination*, 191(1-3), 273–278. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2005.06.040>
- González, M. P., Navarro, R., Saucedo, I., Avila, M., Revilla, J., & Bouchard, C. (2002). Purification of phosphoric acid solutions by reverse osmosis and nanofiltration. *Desalination*, 147(1-3), 315–320. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00558-1](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00558-1)
- González, M. P., Saucedo, I., Navarro, R., Prádanos, P., Palacio, L., Martínez, F., ... Hernández, A. (2006). Effect of phosphoric and hydrofluoric acid on the structure and permeation of a nanofiltration membrane. *Journal of Membrane Science*, 281(1-2), 177–185. <https://doi.org/10.1016/J.MEMSCI.2006.03.038>
- L. Hinojosa Reyes, †, I. Saucedo Medina, †, R. Navarro Mendoza, \*, †, J. Revilla Vázquez, ‡, M. Avila Rodríguez, † and, & Guibal§, E. (2001). Extraction of Cadmium from Phosphoric Acid Using Resins Impregnated with Organophosphorus Extractants. <https://doi.org/10.1021/IE0005349>
- Liu, Y., Villalba, G., Ayres, R. U., & Schroder, H. (2008). Global Locations - About Innophos - Innophos. (n.d.). Retrieved March 19, 2019, from <http://www.innophos.com/en/about-innophos/locations/6>
- M.F. Rodríguez Ordoñez. (2018). *Estudio virtual de un reactor electroquímico y su perspectiva para la purificación de efluentes con fosfatos, Tesis de Maestría*. cideteq México . Retrieved from [https://www.google.com.mx/search?q=M.F.+Rodr%C3%ADguez+Ordo%C3%B1ez,+Estudio+virtual+de+un+reactor+electroqu%C3%ADmico+y+su+perspectiva+para+la+purificaci%C3%B3n+de+efluentes+con+fosfatos,+Tesis+de+Maestr%C3%ADa+\(2018\),+cideteq+M%C3%A9xico&tbm=isch&source](https://www.google.com.mx/search?q=M.F.+Rodr%C3%ADguez+Ordo%C3%B1ez,+Estudio+virtual+de+un+reactor+electroqu%C3%ADmico+y+su+perspectiva+para+la+purificaci%C3%B3n+de+efluentes+con+fosfatos,+Tesis+de+Maestr%C3%ADa+(2018),+cideteq+M%C3%A9xico&tbm=isch&source)



Machorro, J., Olvera, J., ... A. L.-I., & 2013, U. (2013). Electrodialysis of phosphates in industrial-grade phosphoric acid. *Downloads.hindawi.com*, 12. Retrieved from <http://downloads.hindawi.com/journals/isrn.electrochemistry/2013/865727.pdf>

Navarro, R., González, M. P., Saucedo, I., Avila, M., Prádanos, P., Martínez, F., ... Hernández, A. (2008). Effect of an acidic treatment on the chemical and charge properties of a nanofiltration membrane. *Journal of Membrane Science*, 307(1), 136–148. <https://doi.org/10.1016/J.MEMSCI.2007.09.015>

Phosphorus Flows and Environmental Impacts from a Consumption Perspective. *Journal of Industrial Ecology*, 12(2), 229–247. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2008.00025.x>

Salas, B. V., Wiener, M. S., & Martinez, J. R. S. (2017). Phosphoric Acid Industry: Problems and Solutions. In *Phosphoric Acid Industry - Problems and Solutions*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.70031>

Schorr, M., Valdez, B., Zlatev, R., & Stoytcheva, M. (2010). Phosphate ore processing for phosphoric acid production: classical and novel technology. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 119(3), 125–129. <https://doi.org/10.1179/174328509X481882>

Scott, K. (Keith). (1995). *Handbook of industrial membranes*. Elsevier Advanced Technology.

Van Vuuren, D. P., Bouwman, A. F., & Beusen, A. H. W. (2010). Phosphorus demand for the 1970–2100 period: A scenario analysis of resource depletion. *Global Environmental Change*, 20(3), 428–439. <https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2010.04.004>

Villalba, G., Liu, Y., Schroder, H., & Ayres, R. U. (2008). Global Phosphorus Flows in the Industrial Economy From a Production Perspective. *Journal of Industrial Ecology*, 12(4), 557–569. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2008.00050.x>

Yu, J., & Liu, D. (2010). Extraction of magnesium from phosphoric acid using dinonylnaphthalene sulfonic acid. *Chemical Engineering Research and Design*, 88(5-6), 712–717. <https://doi.org/10.1016/J.CHERD.2009.11.008>