

EXTRACCIÓN LÍQUIDO-LÍQUIDO: PRINCIPIOS FUNDAMENTALES Y SU APLICACIÓN EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

LIQUID-LIQUID EXTRACTION: FUNDAMENTAL PRINCIPLES AND THEIR APPLICATION IN WASTEWATER TREATMENT. LITERATURE REVIEW

Emely Nahomi Chamba Escobar¹
 Jerry Giovanni Armijos Correa²
 Wilson Patricio León Cueva³
 Lisbeth Estefania Zhigüe Armijos⁴
 Evelin Daniela Agreda Valle⁵

Resumen

La presente investigación consiste en una revisión bibliográfica acerca de la Operación Unitaria: Extracción líquido-líquido, la cual se fundamenta en la separación de un soluto de interés que se encuentra en una solución con la ayuda de un disolvente inmiscible a dicha solución y que tenga más afinidad de disolución con el soluto. Este trabajo propone recopilar información básica, relevante y actualizada de generalidades acerca del proceso de extracción líquido-líquido como conceptos básicos, técnicas, disolventes de extracción más comunes y sus características, y equipos utilizados; además de su importancia de su aplicación en la industria. Se ejemplificará el proceso de la extracción líquido-líquido para el tratamiento del recurso agua en la extracción de contaminantes provenientes de dos distintas fuentes: fármacos (específicamente naproxeno y fenol) asociados al área de la salud e hidrocarburos provenientes de la industria del petróleo, utilizando distintos disolventes que muestran su efectividad en la extracción de los contaminantes de interés, lo que conlleva a la recuperación de la calidad del agua que está siendo tratada y resaltando así, la importancia de la aplicación de la extracción líquido-líquido para la purificación del líquido vital.

Palabras Claves: Extracción, Solventes, Operaciones unitarias, Naproxeno, Hidrocarburos, Fenol.

Abstract

The present research consists of a bibliographic review about the Unit Operation: Liquid-liquid extraction, which is based on the separation of a solute of interest found in a solution with the help of a solvent that is immiscible to that solution and that has more dissolution affinity with the solute.

Recepción: 17 de Mayo de 2024 / Evaluación: 15 de Junio 2024/ Aprobado: 09 Julio de 2024

¹Ingeniera Química, Universidad Técnica de Machala. Email: echamba5@utmachala.edu.ec. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5776-0289>

²Ingeniero Química, Universidad Técnica de Machala. Email: jarmijos13@utmachala.edu.ec. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9693-3768>.

³Magister en Ingeniería Química Aplicada, Universidad Técnica de Machala. Email: wleon@utmachala.edu.ec. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5474-430X>.

⁴Ingeniera Química, Universidad Técnica de Machala. Email: lzhigüe2@utmachala.edu.ec. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7131-0884>.

⁵Ingeniera Química, Universidad Técnica de Machala. Email: eagreda1@utmachala.edu.ec. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5390-7038>.

This work proposes to compile basic, relevant and updated general information about the liquid-liquid extraction process such as basic concepts, techniques, most common extraction solvents and their characteristics, and equipment used; in addition to the importance of its application in the industry. The process of liquid-liquid extraction for the treatment of water resources will be exemplified in the extraction of contaminants from two different sources: drugs (specifically naproxen and phenol) associated to the health area and hydrocarbons from the oil industry, using different solvents that show their effectiveness in the extraction of the contaminants of interest, which leads to the recovery of the quality of the water being treated and thus highlighting the importance of the application of liquid-liquid extraction for the purification of the vital liquid.

Keywords: Extraction, Solvents, Unit operations, Naproxen, Hydrocarbons, Phenol.

Introducción

La extracción líquido-líquido o extracción con disolvente es un proceso cuya finalidad es la separación de componentes de interés contenidos en un líquido mediante la adición de un líquido insoluble que se conocerá como disolvente. (León Mendoza, 2021)

Esta separación se da lugar al distribuir las dos fases líquidas inmiscibles, provocando que los componentes de la solución líquida se transfieran al líquido insoluble (Tello Aguilar, 2021). A su vez, para (Campos Magallanes et al., 2022), la transferencia se puede lograr de varias formas, siendo la más sencilla la transferencia de un componente en una mezcla binaria a un líquido inmiscible, o la transferencia de dos o más componentes contenidos en una solución a distintos líquidos inmiscibles para cada uno de los componentes.

La aplicación de la extracción líquido-líquido se da lugar cuando no es factible utilizar otros métodos de separación como la destilación y la evaporación. Esto puede ser cuando la volatilidad de dos componentes es similar, cuando se quiere evitar la descomposición térmica de los componentes, cuando se quiere evitar la formación y posterior eliminación de subproductos o cuando se requiere ahorrar recursos económicos (Treybal, 1997).

La contaminación del recurso agua tiene origen en diversas fuentes. Los fármacos (entre ellos, el naproxeno y fenol) se han convertido en contaminantes emergentes debido a que estos no son totalmente absorbidos por el organismo y se expulsan en las excretas que van a parar a las aguas residuales. (Jiménez-Bambague et al., 2020). El problema radica en que los contaminantes emergentes no son totalmente eliminados en las PTAR debido a que estas no se encuentran diseñadas para la eliminación total de los estos contaminantes por lo que los métodos de detección y análisis de los contaminantes emergentes se encuentran aún en desarrollo, causando así una preocupación de las consecuencias que podían traer a la salud pública y ambiental. (Castro-Pastrana et al., 2021).

Los hidrocarburos son otro de los contaminantes presentes en las fuentes de agua que provienen principalmente de la industria del petróleo y derivados. Son compuestos orgánicos que requieren de oxígeno para degradarse, por lo que disminuyen el contenido de oxígeno en el agua, creando compuestos que resultan nocivos para la salud acuática (García González et al., 2019).

Pon ende, se ha visto la necesidad de recopilar información actualizada sobre la importancia de la aplicación de la Operación Unitaria: Extracción líquido-líquido, en el tratamiento del recurso agua que ha sido contaminada, con enfoque en dos tipos de contaminantes (fármacos: naproxeno y fenol, e hidrocarburos).

Desarrollo

Conceptos relacionados a la extracción L-L.

La comprensión de un proceso a nivel industrial suele ser altamente compleja. No obstante, al interpretar los distintos dialectos utilizados en el desarrollo de cada fase que comprende dicha operación unitaria, se logra un mejor entendimiento de este. A continuación, se presentan algunos conceptos clave que, según Robert Treybal son fundamentales para su desarrollo.

Extracción líquido-líquido: técnica de separación que hace uso de las diferencias de solubilidad entre las partes que componen una mezcla (alimento líquido homogéneo y solvente). (Treybal, 1973).

Etapas de extracción: empleada en forma discontinua o continua

Etapas de regeneración: el solvente se separa mediante destilación

Extracto: producto obtenido del proceso rico en disolvente, denominada como la fase orgánica (Regina & Silva, 2022).

Refinado: Fase acuosa, es decir, es el líquido residual del cual se separó el soluto rico en diluyente ((Regina & Silva, 2022).

Mezclador: equipo en donde el extracto y refinado se mantienen unidas por la agitación que se da y de esta forma hay unión entre soluto y solvente

Reservorio: parte de un equipo donde se mantiene en reposo la mezcla para posteriormente separar sus dos fases.

Técnicas de extracción L-L

Las técnicas de extracción líquido-líquido se basa en las características que componen una mezcla, es ampliamente utilizada para separar, concentrar y purificar iones metálicos y ácidos (Quijas-Morales et al., 2023), de esta manera se logra distinguir dos tipos que son simple y continua; cada una de ellas es aplicada acorde a la composición de la solución.

Extracción líquido-líquido continua: este proceso se aplica en una mezcla sencilla, es decir, allí las relaciones de distribución no tienen valores iguales, además de la selectividad, busca resultar solo en el componente de interés de una mezcla.

Extracción líquido-líquido continua: procedimiento aplicado tras la fase inicial, es decir, cuando el reparto del compuesto a obtener no tiene la cantidad suficiente para dar lugar a dos fases. El proceso se basa en un sistema cerrado donde el disolvente debe condensarse para posteriormente pasar a una disolución acuosa que finalmente llevara el producto final al matraz de inicio donde este se condensara.

Características del disolvente de extracción.

La eficacia del proceso de extracción líquido-líquido no solo está determinada por la aplicación precisa de su técnica, también se determina por las propiedades inherentes al disolvente de extracción. Para garantizar un desarrollo óptimo del proceso, es imprescindible que la solución solvente cumpla con una serie de requerimientos específicos para lo cual McCabe Warren propone lo siguiente:

- No debe mezclarse con otro disolvente, debe poder unirse al solvente orgánico que contiene la mezcla (McCabe et al., 2007) .
- El grado de volatilización debe ser alto, para que al final del proceso este sea extraído por aplicación de evaporación o destilación.
- El componente de interés debe poseer mayor solubilidad en el disolvente de extracción y no en el solvente original.

- Compuestos remanentes no deben combinarse con el disolvente de extracción.

Disolventes de extracción L-L comúnmente utilizados

Con el disolvente oportuno se puede ejecutar diferentes aplicaciones por el proceso de extracción. Uno de los disolventes más comunes en esta operación es el agua. Los orgánicos con mayor polaridad son más miscibles con el agua, como el metanol, etanol o acetona, solubles con el agua y no son apropiados para una extracción líquido-líquido ((Demling et al., 2020).

Disolventes como el diclorometano, éter dietílico, acetato de etilo, tolueno o el hexano, son disolventes orgánicos con poca polaridad y estos comúnmente se usan en los procesos de extracción (Silva et al., 2022).

Disolventes de extracción menos densos que el agua:

- Éter etílico.
- Hexano.
- Benceno.
- Tolueno.
- Acetato de etilo.

Disolventes de extracción más densos que el agua:

- Diclorometano.
- Cloroformo.
- Tetracloruro de carbono.

Equipos más importantes utilizados para la extracción L-L

Los equipos de este tipo de extracción se diseñan para disociar elementos de una mezcla líquida mediante transferencia selectiva de solutos entre fases líquidas. Estos dispositivos dependen del tipo de sustancias y el tipo de proceso a realizar.

Entre los equipos de mayor uso industrial y de laboratorio para este proceso destacan los siguientes:

- **Mezcladores:** los agitadores y mezcladores-sedimentadores son de los dispositivos más usados en extracción líquido-líquido, constan de tuberías y bombas que ayudan a realizar el proceso, proporcionan un alto rendimiento de mezclado y una eficaz separación de fases (De Dietrich Process Systems, n.d.).
- **Embudos de separación:** este equipo de extracción usado en laboratorios es el más básico para la extracción líquido-líquido, consiste en un embudo con forma de pera que posee en la parte inferior una llave de paso que separa las fases de extracción ((University of Guadalajara, 2024).
- **Centrifugas de extracción:** estos equipos se basan en la fuerza centrífuga para permitir acelerar la separación de las fases de extracción, es más eficiente y rápido sobre todo para trabajar a nivel industrial con grandes proporciones o volúmenes. (Perry & Green, 1999)
- **Columnas de extracción:** Este proceso consiste en separar que pasa a través de la columna y separa de forma selectiva las fases, estas columnas constan de tubos verticales que puedes ser de platos o de relleno de un material poroso (University of Guadalajara, 2024).

Aplicación de extracción L-L en tratamiento del recurso agua

Extracción de naproxeno

El naproxeno es un antiinflamatorio no esteroide que actualmente su demanda es elevada, haciéndolo parte de los contaminantes emergentes presentes en aguas superficiales, potables.

Estudios mencionan que se ha encontrado nanogramos en ecosistemas acuáticos afectado el desarrollo y morfología peces (Zarazúa-Morín (+) et al., 2024).

La extracción por disolventes en una opción de tratamiento para aguas contaminadas por fármacos debido a su eficiencia selectiva.

De acuerdo con (Elías Rodríguez et al., 2018), se analizaron las interrelaciones químicas entre el medicamento y los constituyentes de las diferentes fases del sistema de extracción, que incluían dodecano, trioctilamina, naproxeno, fosfato de sodio monobásico y NaOH.

Se propusieron dos mecanismos de transferencia de masa, uno utilizando dodecano puro y otro con dodecano más trioctilamina, demostrando la efectividad del método para recuperar el naproxeno presente en soluciones acuosas. Los resultados obtenidos revelaron la importancia de las interacciones químicas en el proceso de extracción y desextracción del medicamento, destacando la influencia de las propiedades ácido-base y las características de los componentes del sistema de extracción líquido-líquido.

Eliminación de fenol

El estudio se enfocó en la eliminación de fenol presente en aguas residuales farmacéuticas mediante el proceso de extracción líquido-líquido. Esta técnica utiliza un solvente orgánico para separar el fenol del agua residual. En este caso, se seleccionó el tolueno como solvente debido a su alta capacidad de extracción y su baja miscibilidad con el agua.

El tolueno fue escogido por su efectividad en la extracción de fenol y su capacidad para ser recuperado y reutilizado, lo que contribuye a reducir los costos operativos y de químicos (Byrne & Holbrey, 2020).

Se probaron diferentes concentraciones de tolueno (20%, 30% y 40%) para evaluar su eficacia en la eliminación del fenol.

El proceso experimental se llevó a cabo en un laboratorio, donde se prepararon soluciones acuosas con un 5% de fenol. El procedimiento incluyó varios pasos: primero, la preparación de las soluciones de fenol; luego, la determinación de la demanda química de oxígeno (DQO) antes y después de la extracción; seguido del ajuste del pH de las soluciones a diferentes niveles (4, 5, 6 y 7) mediante la adición de ácido sulfúrico (H_2SO_4). (Patel & Desai, 2022)

Posteriormente, las soluciones de fenol se mezclaron con tolueno en diferentes concentraciones. Tras la extracción, se formaron dos capas: una orgánica compuesta por tolueno y fenol, y otra acuosa con una menor cantidad de fenol.

Los resultados mostraron que la máxima eliminación de fenol se logró a un pH de 7 y con una concentración de tolueno del 20%. Bajo estas condiciones, se obtuvo una eliminación del 60% de fenol en soluciones acuosas y del 68% en aguas residuales farmacéuticas reales. Esto sugiere que no es necesario reducir el pH por debajo de 7 para mejorar la eficiencia de extracción, lo que además reduce los costos de tratamiento al minimizar el uso de químicos adicionales.

El uso de tolueno como solvente en la extracción líquido-líquido resultó ser eficaz para la eliminación de fenol en aguas residuales farmacéuticas, ofreciendo una solución práctica y económica para el tratamiento de este contaminante.

Extracción de hidrocarburos disueltos

Los hidrocarburos son tóxicos para los ecosistemas acuáticos. Al entrar en el agua, forman una capa en la superficie que impide el intercambio de gases y bloquea la luz solar, afectando la respiración y fotosíntesis del fitoplancton y zooplancton, lo que altera la cadena alimenticia (Narciso-Ortiz et al., 2021).

Planteando así el proceso de separación de hidrocarburos diluidos en agua mediante extracción líquido-líquido con polímeros macroporosos.

Fundamentándose en el uso de perlas de polímero poroso que contienen un líquido de extracción inmovilizado. Estas perlas permiten eliminar selectivamente los hidrocarburos del agua. Los hidrocarburos se distribuyen entre la fase acuosa y la fase oleosa del líquido de extracción, y posteriormente se regeneran utilizando vapor a baja presión (Low et al., 2020).

El sistema MPPE ha demostrado ser muy eficiente, logrando tasas de eliminación de hidrocarburos que van del 90 % al 99,99 %. Además, no requiere la incorporación de sustancias químicas, no produce gases de escape ni lodos, y permite extraer los hidrocarburos en un estado casi limpio.

Resultados

La extracción líquido-líquido es una operación unitaria cuyo principio es separar una sustancia o soluto de interés que se encuentra en una solución mediante un disolvente inmiscible a dicha solución y que se afin a la disolución del soluto.

Mediante la presente revisión bibliográfica se actualizó conceptos sobre la extracción líquido-líquido con ayuda de información de artículos recientes, los cuales nos presentaban información actualizada sobre los equipos y disolvente que se usan hoy en día para dicha operación, se encontró información interesante acerca de las técnicas y la aplicación de este proceso en diferentes campos, destacando principalmente en el tratamiento de aguas residuales.

En tratamiento de aguas residuales su aplicación es muy relevante para la extracción de varios contaminantes como son: fármacos, metales, residuos de hidrocarburos, entre otros, que se encuentren en un efluente hídrico los cuales alteran la composición y características del agua por lo que hay que tratarlos para recuperar ese recurso. En esta investigación se seleccionó la extracción de naproxeno, de hidrocarburos disueltos y eliminación de fenol, que se fundamentan en el mismo proceso, pero por la sustancia de interés se usa diferente disolvente, en los tres procesos el método presenta alta eficiencia por eso su aplicación en este campo es muy importante.

Conclusiones

En conclusión, la extracción líquido-líquido es una operación unitaria esencial en la ingeniería química, basada en la transferencia de soluto entre fases líquidas inmiscibles, optimizando su separación con disolventes adecuados. La eficiencia en este tipo de operación unitaria se precisará de acuerdo con los disolventes, equipos, técnicas específicas de acuerdo con la aplicación y necesidades. La extracción líquido-líquido se establece como una operación fundamental para el tratamiento de aguas residuales, tal es el caso de los contaminantes emergentes como el naproxeno que con aplicación de los disolventes dodecano y el sistema dodecano + trioctilamina se logra extraer el fármaco. Otras aplicaciones de la operación es la extracción de hidrocarburos disueltos, utilizando técnicas como las perlas de polímeros poroso logran la eliminación de porcentajes superiores al 90%, así mismo la extracción de fenol en aguas residuales con la ayuda de tolueno como disolvente.

La revisión bibliográfica actualizada proporciona una visión de avances en esta operación, incluyendo innovación en disolventes y equipos.

Bibliografía

Byrne, E. L., & Holbrey, J. D. (2020). Phenol Recovery from Aromatic Solvents by Formation of Eutectic Liquids with Trialkyl-2,3-dihydroxypropylammonium Chloride Salts. *Sustainable Chemistry*, 1(1), 49–61. <https://doi.org/10.3390/suschem1010004>

- Campos Magallanes, L., Moreno Soria, L. D., Piñón Ortega, G., Reyes de la Cruz, F. I. del C., González Muñoz, M. del P., & Razo Lazcano, T. A. (2022). Recuperación de antiinflamatorios y antihistamínicos empleando componentes naturales mediante la técnica de extracción líquido-líquido. Parte I: Antihistamínicos. *XXVII Verano De La Ciencia*, 16, 1–8. <http://repositorio.ugto.mx/handle/20.500.12059/7486>
- Castro-Pastrana, L. I., Cerro-López, M., Toledo-Wall, M. L., Gómez-Oliván, L. M., & Saldívar-Santiago, M. D. (2021). Análisis de fármacos en aguas residuales de tres hospitales de la ciudad de Puebla, México. *Ingeniería Del Agua*, 25(1), 59–73. <https://doi.org/10.4995/ia.2021.13660>
- De Dietrich Process Systems. (n.d.). *MEZCLADOR-SEDIMENTADOR*. Retrieved April 24, 2024, from <https://www.dedietrich.com/es/soluciones-y-productos/extraccion/extraccion-liquido/liquido/mezclador-sedimentador>
- Demling, P., Von Campenhausen, M., Grütering, C., Tiso, T., Jupke, A., & Blank, L. M. (2020). Selection of a recyclable: In situ liquid-liquid extraction solvent for foam-free synthesis of rhamnolipids in a two-phase fermentation. *Green Chemistry*, 22(23), 8495–8510. <https://doi.org/10.1039/d0gc02885a>
- Elías Rodríguez, N., Cervantes, P. L., Guadalupe, D., Cervantes, M., Geovany Juárez Betancourth, A., Tzunux Tzoc, F., Mishell, J., Cruz, H., Alejandra, T., & Lazcano, R. (2018). *Estudio sobre el mecanismo de transferencia de masa del naproxeno en sistemas de extracción líquido-líquido*. 1–14.
- García González, J., Peñafiel Heredia, D., & Rodríguez, R. (2019). Bioremediación de hidrocarburos en aguas residuales con cultivo mixto de microorganismos: caso Lubricadora Puyango. *Enfoque UTE*, 10(1). <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v10n1.312>
- Jiménez-Bambague, E. M., Madera-Parra, C. A., & Peña-Salamanca, E. J. (2020). Eliminación de compuestos farmacéuticos presentes en el agua residual doméstica mediante un tratamiento primario avanzado. *INGENIERÍA Y COMPETITIVIDAD*, 22(1), 1–10. <https://doi.org/10.25100/iyc.v22i1.8794>
- León Mendoza, L. M. (2021). *Selección de equipos para la extracción y purificación de ácido láctico en el laboratorio de operaciones unitarias utilizando el hongo Rhizopus oryzae*. <https://repositorio.uvg.edu.gt/handle/123456789/4135>
- Low, A., Boom, J., & Severing, K. (2020). Eliminación de hidrocarburos disueltos y dispersos del agua mediante extracción líquido-líquido. *Industria Química, ISSN 2340-2113, N° 83, 2020, Págs. 48-52, 83, 48–52*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7626073&info=resumen&idioma=SPA>
- McCabe, W., Smith, J., & Harriott, P. (2007). Operaciones en las que intervienen partículas de sólidos. In *Operaciones unitarias en ingeniería química*.
- Narciso-Ortiz, L., Vargas-García, K. A., Vázquez-Larios, A. L., Quiñones-Muñoz, T. A., Hernández-Martínez, R., Lizardi-Jiménez, M. A., Nacional de México Veracruz, T., & Blanca, T. (2021). *Cuencas y sistemas arrecifales del Golfo de México en el estado de Veracruz: Contaminación por hidrocarburos y biorremediación*. 25(3), 54–70.
- Patel, J., & Desai, H. (2022). Removal of phenol by liquid-liquid extraction from pharmaceutical wastewater. *Materials Today: Proceedings*, 57, 2396–2399. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.12.435>

- Perry, R., & Green, D. (1999). *Perry's Chemical Engineers' Handbook*.
- Quijas-Morales, Y., Navarro-Segura, D. L., Cholico-González, D. F., & Ávila-Rodríguez, M. (2023). Sistemas acuosos bifásicos para la extracción de HNO₃. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías Del ICBI*, 11(Especial), 83–87. <https://doi.org/10.29057/icbi.v11iespecial.10359>
- Regina, L., & Silva, S. (2022). *Purificação de nióbio utilizando a extração líquido – líquido Purification of niobium using liquid - liquid extraction Purificación de niobio utilizando líquido - extracción líquida*. 2022, 1–12.
- Silva, J. J., Mello, D. M. de, Pires, R. F., & Dantas, S. C. (2022). Estudo termodinâmico do equilíbrio líquido-líquido para o sistema acetato de etila + ácido acético + água. *Research, Society and Development*, 11(7), e9311729685. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i7.29685>
- Tello Aguilar, R. (2021). *Procedimiento de extracción de ácido láctico de un caldo de fermentación microbiana en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala* [Universidad del Valle de Guatemala]. <http://repositorio.uvg.edu.gt/handle/123456789/4164>
- Treybal, R. E. (1973). Transfer operations. *Journal of the Franklin Institute*, 296(1), 71. [https://doi.org/10.1016/0016-0032\(73\)90241-x](https://doi.org/10.1016/0016-0032(73)90241-x)
- Treybal, R. E. (1997). EXTRACCIÓN LÍQUIDA. In *OPERACIONES DE TRANSFERENCIA DE MASA* (2da ed.). McGraw-Hill.
- University of Guadalajara. (2024). *EQUIPOS DE EXTRACCIÓN LÍQUIDO-LÍQUIDO*. <https://www.collegesidekick.com/study-docs/5918412>
- Zarazúa-Morín(+), M. E., Alfaro-Cruz, M. R., & Torres-Guerra, L. M. (2024). Medicamentos y sus consecuencias como contaminantes emergentes. *Revista Ciencia UANL*, 27(123), 8–15. <https://doi.org/10.29105/cienciauanl27.123-1>