

Optimización de Métodos de Tratamiento de Lixiviados mediante Evaporación Forzada: Diseño, Implementación y Evaluación Experimental

Optimization of Leachate Treatment Methods by Forced Evaporation: Experimental Design, Implementation and Evaluation

Recibido: 15 Septiembre de 2024

Aprobado: 23 Diciembre de 2024

Cómo citar: F. E. Moreno-García, O. A. . Lopez-Bustamante, E. . Gamboa-Guerrero, J.S. . Galindo-Lizcano , D. O. . Cardozo-Sarmiento. "Optimización de Métodos de Tratamiento de Lixiviados mediante Evaporación Forzada: Diseño, Implementación y Evaluación Experimental", *Mundo Fesc*, vol. 15, no. 31, 2025, doi: 10.61799/2216-0388.1454.

Francisco Ernesto Moreno-García^{1*}



Doctor en Ingeniería Mecánica.

femgarcia@ufps.edu.co

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5227-1238>

Universidad Francisco de Paula Santander – Cúcuta, Colombia.

Oriana Alexandra Lopez-Bustamante²



Ingeniero de Sistemas,

doc_egamboa@fesc.edu.co

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3993-3735> Fundación de Estudios Superiores Comfanorte – Cúcuta, Colombia.

Edinson Gamboa-Guerrero³



Candidata a Doctora en Educación,

lunome@gmail.com,

<https://orcid.org/0000-0002-2871-4991>,

Fundación Universitaria Los Libertadores, Bogotá, Colombia.

Juan Sebastian Galindo-Lizcano⁴



Ingeniero de Sistemas,

Email: doc_js_galindo@fesc.edu.co

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7039-7242>

Fundación de Estudios Superiores Comfanorte, Cúcuta, Colombia.

Darwin Orlando Cardozo-Sarmiento⁵



Magíster en Ingeniería Electrónica,

darwinorlandocs@ufps.edu.co

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3177-3893>

Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia.

***Autor para correspondencia:**

darwinorlandocs@ufps.edu.co



Optimización de Métodos de Tratamiento de Lixiviados mediante Evaporación Forzada: Diseño, Implementación y Evaluación Experimental

Palabras clave: Lixiviados, tratamiento de residuos, evaporación forzada, eficiencia de evaporación.

Resumen

El tratamiento de lixiviados es un proceso crucial para la gestión de residuos, estos líquidos altamente contaminantes contienen ácidos húmicos, nitrógeno amoniacal, metales pesados y sales inorgánicas. Entre los métodos más comunes de tratamiento se incluyen la sedimentación con arcillas, la ósmosis inversa, la evaporación natural y la evaporación forzada. Evaluar los métodos más comunes de tratamiento de lixiviados y desarrollo de un sistema experimental de evaporación forzada para la reducción del volumen de estos residuos, mejorando la eficiencia del proceso mediante el uso de energía térmica controlada y sistemas de monitoreo en tiempo real. Se realiza una revisión de los principales métodos de tratamiento de lixiviados, incluyendo osmosis inversa, sedimentación con arcillas, evaporación natural y evaporación forzada. Luego, se diseña y construye un prototipo experimental basado en evaporación forzada, el cual cuenta con domos triangulares de vidrio y metal inclinados a 45°, un sistema de regulación de caudal con válvulas y un sistema de generación térmica con resistencias a 100 °C. La adquisición de datos se gestiona mediante una ESP32 y sensores de temperatura tipo K con conversores Max6675, enviando información en tiempo real a la plataforma ThingSpeak. Se realizan pruebas experimentales con un flujo de 0,22 ml/seg durante 9 horas diarias, monitoreando radiación solar, temperatura y humedad relativa. Se determina que la evaporación forzada incrementa significativamente la eficiencia del proceso, logrando reducir el volumen de lixiviados en un 90%. La hora solar pico se identifica entre las 12:00 y 13:00 horas, con una radiación superior a 900 W/m². El lixiviado en el reservorio alcanza temperaturas de 38 a 39 °C, mientras que, en el domo principal, se asegura el cambio de fase a partir de la inyección de energía térmica. La evaporación forzada es una alternativa eficiente para la reducción del volumen de lixiviados, superando las limitaciones de la evaporación natural en cuanto a dependencia climática y espacio requerido. El diseño del prototipo experimental demostró ser funcional, facilitando la regulación del caudal y la aplicación controlada de energía térmica.

Optimization of Leachate Treatment Methods by Forced Evaporation: Experimental Design, Implementation and Evaluation

Keywords: Leachate, waste treatment, forced evaporation, evaporation efficiency.

Abstract

Leachate treatment is a crucial process for waste management, these highly polluting liquids contain humic acids, ammonia nitrogen, heavy metals and inorganic salts. Common treatment methods include clay sedimentation, reverse osmosis, natural evaporation and forced evaporation. To evaluate the most common methods of leachate treatment and develop an experimental forced evaporation system for the reduction of the volume of these wastes, improving the efficiency of the process using controlled thermal energy and real time monitoring systems. A review of the main leachate treatment methods, including reverse osmosis, clay sedimentation, natural evaporation and forced evaporation, is carried out. Then, an experimental prototype based on forced evaporation is designed and built, which has triangular glass and metal domes inclined at 45°, a flow regulation system with valves and a thermal generation system with 100 °C resistors. Data acquisition is managed by an ESP32 and K-type temperature sensors with Max6675 converters, sending real-time information to the ThingSpeak platform. Experimental tests were carried out with a flow rate of 0.22 ml/sec during 9 hours per day, monitoring solar radiation, temperature and relative humidity. It is determined that forced evaporation significantly increases the efficiency of the process, reducing the volume of leachate by 90%. The peak solar hour is identified between 12:00 and 13:00 hours, with a radiation of more than 900 W/m². The leachate in the reservoir reaches temperatures of 38 to 39 °C, while, in the main dome, phase change is ensured from the injection of thermal energy. Forced evaporation is an efficient alternative for leachate volume reduction, overcoming the limitations of natural evaporation in terms of climate dependence and space requirements. The design of the experimental prototype proved to be functional, facilitating flow regulation and controlled application of thermal energy.

Introducción

En la actualidad, la gestión adecuada de los residuos y su impacto ambiental han cobrado gran relevancia en el desarrollo sostenible. Uno de los principales desafíos en este ámbito es el manejo de los lixiviados, líquidos generados a partir de la descomposición de residuos sólidos en los rellenos sanitarios y vertederos. Estos líquidos contienen una alta carga de contaminantes, incluyendo metales pesados, materia orgánica y compuestos tóxicos, los cuales pueden representar un riesgo significativo para los ecosistemas y la salud humana si no son tratados de manera eficiente. El tratamiento de lixiviados es un proceso complejo debido a la variabilidad de su composición química y su alta concentración de contaminantes. Factores como las condiciones climáticas, el tipo de residuos depositados y el tiempo de almacenamiento influyen en la generación y características de estos líquidos. En este contexto, es fundamental desarrollar estrategias que permitan mitigar el impacto ambiental de los lixiviados mediante tecnologías eficientes y sostenibles de tratamiento y control. La implementación de sistemas de control automático e inteligente ha demostrado ser una herramienta clave para mejorar la eficiencia de los procesos de tratamiento de aguas residuales, como se expone en [1], donde se integran sensores, sistemas de control difuso y plataformas de monitoreo para regular variables críticas en plantas de tratamiento. Además, el uso de modelos computacionales, como el System Advisor Model (SAM), también ha permitido evaluar la viabilidad técnica y económica de soluciones energéticas y ambientales, incluyendo el aprovechamiento de residuos orgánicos, lo cual puede extrapolarse al tratamiento de lixiviados [2].

Este proyecto se enfoca en el análisis y tratamiento de lixiviados generados en un sitio específico, evaluando su composición y explorando alternativas para su manejo adecuado. Se emplean diversas metodologías de caracterización fisicoquímica para identificar los principales contaminantes presentes y determinar los procesos más adecuados para su remediación. Además, se analiza la viabilidad de distintas tecnologías de tratamiento, incluyendo procesos biológicos, fisicoquímicos y de adsorción, con el objetivo de reducir la toxicidad y minimizar el impacto ambiental de estos efluentes. El uso de sensores ambientales y sistemas de monitoreo remoto también puede contribuir al control eficiente de variables asociadas a la generación de lixiviados, como la temperatura, la humedad o la calidad del aire, lo cual ha sido demostrado en contextos educativos y ambientales [3]. Se busca proporcionar herramientas y conocimientos que permitan mejorar la gestión de lixiviados, optimizando los procesos de tratamiento y promoviendo prácticas más sostenibles en la disposición final de residuos [4]-[6]. Se pretende contribuir a la reducción de la contaminación ambiental y al desarrollo de estrategias más eficientes para el manejo de estos efluentes en el contexto de la gestión integral de residuos sólidos.

Materiales y Métodos

En el presente estudio, se analizan los métodos de tratamiento de lixiviados más comunes, incluyen técnicas físicas, químicas y biológicas para la neutralización o eliminación de contaminantes. Entre los compuestos presentes en los lixiviados se encuentran ácidos húmicos, nitrógeno amoniacal, metales pesados y sales inorgánicas. Para su tratamiento, se emplean metodologías como la osmosis inversa, la evaporación natural y la evaporación forzada. La osmosis inversa se basa en la separación de sales inorgánicas a través de una membrana semipermeable. Esta técnica presenta costos elevados debido a la adquisición y mantenimiento de la membrana, además de su sensibilidad a factores ambientales como la temperatura y el ensuciamiento. Por otro lado, la evaporación natural se desarrolla sobre superficies expuestas a variaciones de humedad relativa y velocidad del aire (ver Figura 1). Este proceso presenta limitaciones debido al amplio terreno requerido y la influencia de factores climáticos, como precipitaciones, que pueden reducir la eficiencia del proceso. Además, pueden generarse problemas operativos como la formación de espumas y el arrastre de compuestos orgánicos volátiles (COVs). Finalmente, la evaporación forzada optimiza la eliminación del agua en los lixiviados mediante el uso de fuentes de energía, como el biogás, para generar calor. Para su aplicación, se consideran propiedades del lixiviado como la concentración, la temperatura, la formación de espumas y la presión del sistema. Esta metodología permite reducir el volumen del lixiviado hasta en un 90% y aprovechar diferentes fuentes de energía calorífica [7]-[16].



Figura 1. Lodo residual después del proceso de evaporación ambiental de lixiviados.

Se diseña y construye un prototipo a escala con domos triangulares fabricados con materiales de vidrio y metal. Estos domos presentan una inclinación de 45° para facilitar

la decantación del vapor y la recuperación del líquido. Un sistema de apertura regulado por una válvula permite el paso del lixiviado a un caudal de 0,22 ml/s desde un tanque reservorio hacia el domo principal. En este domo, se instala un sistema de generación térmica basado en una resistencia eléctrica operando a 100 °C, lo que acelera el proceso de evaporación. Para la monitorización de variables térmicas y ambientales, se implementa un sistema basado en conversores Max6675 acoplados a sensores de temperatura tipo K y un microcontrolador ESP32. Este sistema permite la adquisición y almacenamiento de datos en una plataforma en la nube mediante ThingSpeak. La conexión con los convertidores analógico-digital se realiza a través de los pines MISO, SCK y CS del ESP32 (ver Figura 2), mientras que la comunicación con una pantalla LCD se gestiona mediante el protocolo I2C. El control On-Off del sistema de generación térmica se efectúa utilizando un pin digital del ESP32, permitiendo el encendido y apagado de la resistencia. Para la programación y envío de datos, se emplean las librerías Max6675, LiquidCrystal_I2C, Wifi y ThingSpeak, configurando un retardo de 10 segundos en la transmisión [17]-[21]. El banco de pruebas con la instrumentación y adquisición de datos se muestra en la Figura 3.

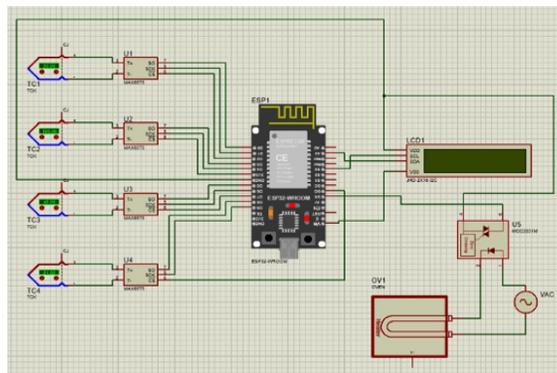


Figura 2. Diagrama de circuito electrónico ESP32. Fuente: Autores.



Figura 3. Prototipo experimental. Fuente: Autores.

Finalmente, se desarrolla una interfaz web mediante HTML, CSS y JavaScript para la visualización en tiempo real de los datos adquiridos por los sensores. La página web se diseña en Visual Studio Code y permite el monitoreo de temperaturas en distintas etapas del proceso [22]-[25]: reservorio inicial, entrada al domo principal y salida de los domos secundarios. Además, se incluye un botón de descarga que permite obtener los datos en formato CSV. Esta interfaz es accesible desde cualquier dispositivo con conexión a internet, siempre que la ESP32 esté vinculada a la red.

Mediante estas metodologías, se establecen las bases para evaluar la eficiencia del tratamiento de lixiviados y la optimización de la evaporación forzada como una solución viable para la reducción del volumen de residuos líquidos contaminantes.

Resultados y Discusión

Se realizan pruebas experimentales registrando las mediciones de radiación solar, temperaturas y humedad, para una carga inicial de 5 litros de lixiviados de base crudo descargados a un flujo de 0,22 ml/seg desde las 9:00 horas hasta las 18:00 horas. El consumo del prototipo es de 100W con una corriente de 1,38A. La interfaz para la visualización se muestra en la Figura 4.

En la Figura 5a, la hora solar pico (HSP) se muestra por encima de los 900W/m², entre las 12:00 horas y las 13:00 horas, mostrando un máximo aprovechamiento de la radiación solar. Se observa aumento en la radiación solar desde horas tempranas hasta llegar a picos y luego mínimas incidencias solares después de las 16:00 horas. Las temperaturas en el reservorio son similares en el orden de los 38 a 39 °C, como se pueden observar en la Figura 5b, debido a que el lixiviado está expuesto en un reservorio al aire libre y a la temperatura promedio del ambiente.

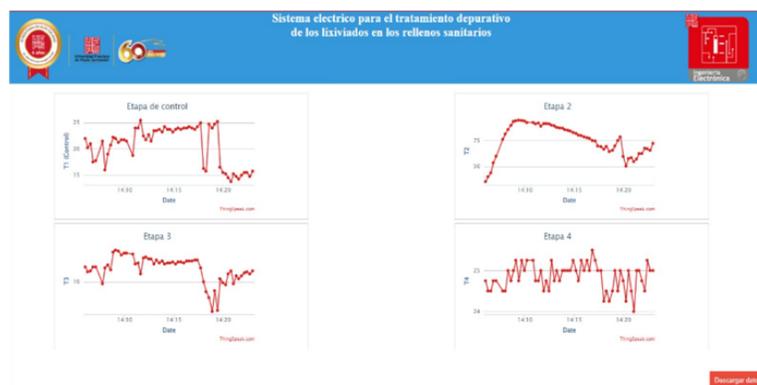


Figura 4. Interfaz gráfica. Fuente: Autores.

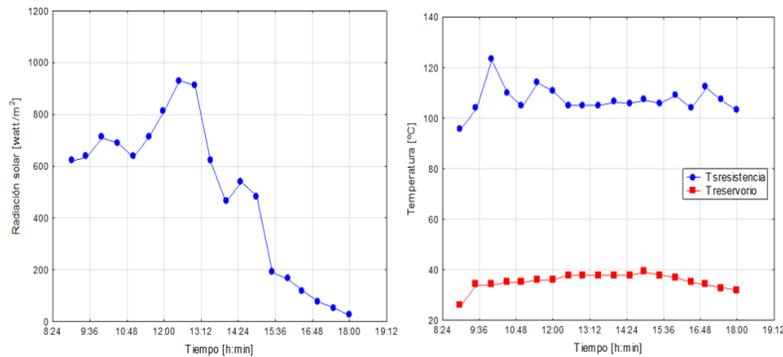


Figura 5. a) radiación solar incidente. b) Temperatura del lixiviado crudo en el reservorio inicial y a la entrada al domo principal. Fuente: Autores.

La importancia al inyectarse una energía externa al sistema de evaporización específicamente al incrementar la temperatura en el orden de los 100°C del lixiviado al entrar al domo principal, asegura un cambio de fase del lixiviado crudo inicial, como se puede observar en la Figura 5b, en toda la franja de operación de la maquina desde las 9:00 horas hasta las 18:00 horas, logrando que el lixiviado cambiase de fase por una evaporización forzada, sin importar la variación y fluctuaciones de la radiación solar en el transcurso del día.

Por otro lado, en el domo principal según los datos se puede identificar mayor calor acumulado y remanente a temperaturas en el orden de los 60°C en gran parte del día, esto ocurre al transcurrir las horas y por circunstancias naturales la radiación disminuye hasta ser nula a las 18:00 horas. Se evidencia un primer proceso de evaporización en el orden del 15% para los 5 litros iniciales de lixiviado base crudo. Al inyectar energía adicional apoyando la energía latente en el domo principal, se mejora el proceso volviéndolo más rápido, ya que en solo una hora de trabajo desde las 9:00 horas el sistema ya estaba purificando el lixiviado crudo original, aun al tener radiaciones incidentes solares bajas y una humedad relativa en el orden del 40%, según Figura 6a y 6b.

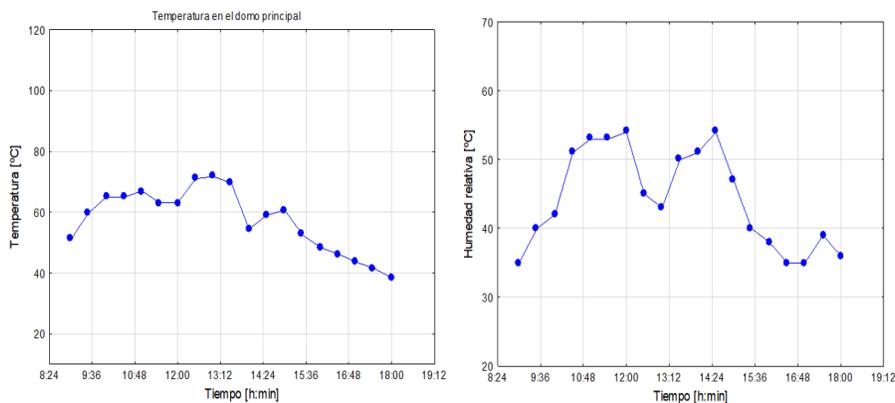


Figura 6. a) Temperatura del lixiviado en el domo principal. b) Temperatura ambiente interior del domo principal. Fuente: Autores.

Un diseño de Experimentos (DOE) se ejecutó, con el fin de obtener un modelo estático de

sistema desarrollado, de forma se pueda describir y profundizar de manera más precisa la relación entre los factores independientes tales como la radiación solar, la temperatura del lixiviado al entrar al domo y las respuestas medidas. Estas ecuaciones pueden ser de primer, segundo o incluso mayor orden, según la forma en que las respuestas reaccionen a las variaciones. En el caso específico de este proyecto, se ha obtenido el siguiente modelo para la Temperatura interna del domo principal del sistema de evaporización de lixiviado en función de dos factores independientes de mayor impacto: la radiación solar en W/m² y la temperatura de la resistencia a la entrada del domo en °C como se muestra en (1):

$$T_d = 25,9014 + (0,3056 \cdot \text{Rad}) + (0,0067 \cdot T_r) \quad (1)$$

Donde T_d es la temperatura del domo, Rad es la radiación solar y T_r la temperatura de la resistencia.

La metodología de respuesta de superficie permite modelar con mayor precisión la curvatura alrededor de un proceso multivariable. En la Figura 7 se observa la influencia en la temperatura del domo cuando la radiación y la temperatura en la resistencia eléctrica varían. Al asegurar la temperatura de evaporización del lixiviado llevando la temperatura de la resistencia en el orden de los 100°C, su influencia es de primer impacto, porque permite mantener el domo por encima de los 60°C ante un rango de operación posible para radiación solar entre los 400 a los 1000W/m². Lo anterior indica que la inyección adicional de energía asegura la evaporización del lixiviado en cualquier momento del día. Finalmente, a mayor radiación solar, más la energía térmica inyectada por la resistencia eléctrica, asegura la temperatura del domo en el orden de 70°C.

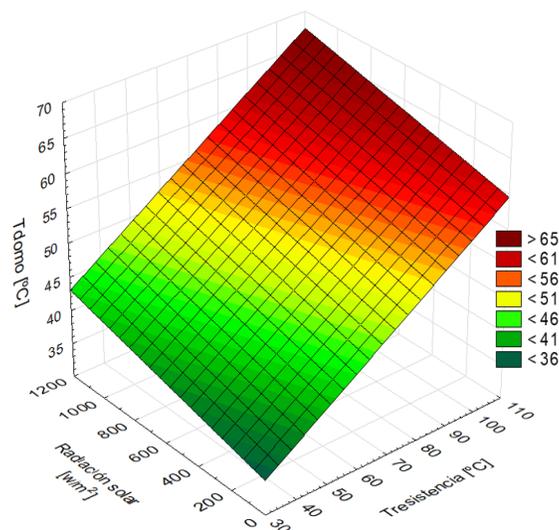


Figura 7. Diagrama de superficie sistema de evaporización de lixiviado.

Conclusiones

Se logra desarrollar un sistema alternativo eléctrico que cumple con los requisitos establecidos dentro de esta investigación y que así mismo apoya el tratamiento de los lixiviados en un porcentaje de descontaminación considerable con respecto a otro tipo de tratamiento. Bajo una primera observación, se bajó las cargas contaminantes del lixiviado base crudo inicial.

Se desarrolla el prototipo para 5 litros de base lixiviado crudo, con un 15% (250 ml) tratado limpio.

Con el sistema de inyección de energía térmica interno en el domo principal se mejora el proceso ante las variaciones en la radiación solar sensible a las condiciones climáticas del día.

Se desarrolla un sistema alternativo eléctrico que cumple como apoyo al tratamiento de los lixiviados en un porcentaje de descontaminación considerable. Con 100watts se logra la evaporización del lixiviado al entrar al domo principal, la carga de corriente es de 1,38 amperios.

La interfaz de usuario permite que el sistema sea observado en tiempo real mediante internet, para ellos se utilizaron diferentes softwares de libre acceso que permitieron crear la interfaz, para ello se utilizó el host gratuito del software programable GitHub.

Referencias

- [1] Suarez-Sierra, O. J., Ortega-Ibáñez, L. F., Solano-López, T., Pardo-García, A., & Mejía-Bugallo, A. (2024). Implementación de un sistema de control inteligente para el procesamiento de aguas residuales. *AiBi Revista de Investigación, Administración e Ingeniería*, 12(3), 171–184. <https://doi.org/10.15649/2346030X.4702>
- [2] Cordoba-Charry, P. A., & Ortega-Ramírez, A. T. (2022). System Advisor Model (SAM) como sistema de apoyo ambiental y energético para el aprovechamiento de la cascarilla de arroz. *AiBi Revista de Investigación, Administración e Ingeniería*, 10(2), 67–74. <https://doi.org/10.15649/2346030X.2684>
- [3] Díaz-Pinzón, J. E., & Rodríguez-González, J. (2025). Ensamble de una estación meteorológica con sensores para monitorear parámetros ambientales. *AiBi Revista de Investigación, Administración e Ingeniería*, 13(1), 52–59. <https://doi.org/10.15649/2346030X.3443>
- [4] López-Avendaño, J. E., López-Inzunza, H. J., Tirado-Ramírez, M. A., Estrada-Acosta, M. D., & Martínez-Gallardo, J. Á. (2024). Requerimiento hídrico, coeficiente de cultivo y productividad de pasto híbrido Convert 330 (*Brachiaria* sp) en un clima semiárido

- cálido de México. *Terra Latinoamericana*, 42. <https://doi.org/10.28940/terra.v42i0.1797>
- [5] Gavilánez Luna, F. C., Morán Castro, C. E., & Campoverde Verdugo, G. (2024). Impacto ambiental y emisión de metano del botadero de basura de Naranjito, Guayas - Ecuador. *Cuadernos de Investigación UNED*, 16(1). <http://dx.doi.org/10.22458/urj.v16i1.5173>
- [6] García Dávila, J., Santacruz Juárez, E., Sánchez Minutti, L., Ortega Sánchez, E., & Tellez Girón, J. D. (2024). Evaluación de propiedades fisicoquímicas de composta como producto de un dispositivo inteligente de degradación biológica. *RIDE. Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*, 14(28). <https://doi.org/10.23913/ride.v14i28.1910>
- [7] Humintech GmbH. (2025). Tratamiento de aguas residuales con ácidos húmicos. Recuperado el 6 de abril de 2025, de <https://www.humintech.com/es/medio-ambiente/blog/tratamiento-de-aguas-residuales-con-acidos-humicos>
- [8] Condorchem Envitech. (2025). Tratamiento de aguas residuales industriales mediante evaporación al vacío. Recuperado el 6 de abril de 2025, de <https://condorchem.com/es/blog/tratamiento-de-aguas-residuales-industriales-mediante-evaporacion-al-vacio>
- [9] Retema. (2021). El rol de la evaporación en el tratamiento de efluentes difíciles de tratar. Recuperado el 6 de abril de 2025, de <https://www.retema.es/actualidad/el-rol-de-la-evaporacion-en-el-tratamiento-de-efluentes-dificiles-de-tratar>
- [10] Martínez, E., Flórez, G., & Orozco, A. (2007). Remoción de amonio y metales pesados de los lixiviados del relleno sanitario La Glorita por medio de electrocoagulación. Universidad Nacional de Colombia. Recuperado el 6 de abril de 2025, de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/2837>
- [11] González, A. M., Pérez, C. A., & Vargas, L. E. (2010). Eliminación de metales pesados en aguas congénitas a partir de ácidos húmicos. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 13(1), 79-85. Recuperado el 6 de abril de 2025, de <https://repository.udca.edu.co/entities/publication/bd49a17c-aedc-48e9-9f15-9c4c169d12da>
- [12] Rocas y Minerales. (2021). La evaporación de aguas de lixiviados y líquidos percolados como alternativa al recrecido de balsas de contención. Recuperado el 6 de abril de 2025, de <https://www.rocasyminales.es/rocas-y-minerales/mineria/la-evaporacion-de-aguas-de-lixiviados-y-liquidos-percolados-como-alternativa-al-recrecido-de-balsas-de-contencion>
- [13] F. Forero Longas, A. P. Pulido Díaz, y S. A. Cabrera Navarro, "Modelación y simulación computacional del proceso de evaporación osmótica," *Tecnura*, vol. 20, no. 49, pp. 17-31, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour>

tecnura.2016.3.a02

- [14] G. E. Dévora-Isiordia, M. E. López-Mercado, y G. A. Fimbres-Weihs, "Desalación por ósmosis inversa y su aprovechamiento en agricultura en el valle del Yaqui, Sonora, México," *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 7, no. 3, pp. 155–169, 2016.
- [15] R. Rivas-Pérez, J. Sotomayor-Moriano, C. G. Pérez-Zúñiga y E. M. Calderón-Mendoza, "Diseño de un GPC multivariable basado en una PC industrial para el control de una unidad de ósmosis inversa de una industria farmacéutica," *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, vol. 15, no. 1, pp. 175–185, 2016.
- [16] M. Salazar-Pereyra, R. Lugo-Leyte, A. E. Bonilla-Blancas, F. Méndez-Lavielle y H. D. Lugo-Méndez, "Análisis teórico del control térmico del evaporador del sistema de refrigeración utilizando HFC-134a," *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, vol. 15, no. 1, pp. 147–159, 2016.
- [17] J. E. Tamil Malar and M. Vaishnavi, "IoT based Smart Irrigation System using ESP32," 2022 3rd International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC), Coimbatore, India, 2022, pp. 1751-1755, doi: 10.1109/ICESC54411.2022.9885308.
- [18] I. Mat, M. R. Mohd Kassim, A. N. Harun and I. M. Yusoff, "Smart Agriculture Using Internet of Things," 2018 IEEE Conference on Open Systems (ICOS), Langkawi, Malaysia, 2018, pp. 54-59, doi: 10.1109/ICOS.2018.8632817.
- [19] A. Na and W. Isaac, "Developing a human-centric agricultural model in the IoT environment," 2016 International Conference on Internet of Things and Applications (IOTA), Pune, India, 2016, pp. 292-297, doi: 10.1109/IOTA.2016.7562740.
- [20] V. Barral Vales, O. C. Fernández, T. Domínguez-Bolaño, C. J. Escudero and J. A. García-Naya, "Fine Time Measurement for the Internet of Things: A Practical Approach Using ESP32," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 19, pp. 18305-18318, 1 Oct.1, 2022, doi: 10.1109/JIOT.2022.3158701.
- [21] W. Song, X. Wang, T. Wang, Z. Li, Z. Zhang and L. Yang, "Design of Factory Environmental Monitoring System based on ESP32," 2023 5th International Conference on Frontiers Technology of Information and Computer (ICFTIC), Qiangdao, China, 2023, pp. 311-314, doi: 10.1109/ICFTIC59930.2023.10456317.
- [22] C. A. Vanegas, S. A. Pinzón Núñez y R. Rodríguez Guerrero, *Aplicaciones Web con HTML, Javascript y PHP*. Bogotá, Colombia: UD Editorial, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2018. ISBN: 978-958-543-491-2.

- [23] M. Rubiales Gómez, *Curso de desarrollo Web. HTML, CSS y JavaScript*. Edición 2021. Anaya Multimedia, 2021.
- [24] C. Aubry y C. Vigouroux, *HTML5, CSS3 y JavaScript - Pack de 2 libros: Aprende a desarrollar tu interfaz Front End*. ENI, 2022
- [25] P. E. Fernández Casado, *Construcción y diseño de páginas web con HTML, CSS y JavaScript*. Ediciones de la U, 2023.