



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ



FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

Posgrado en Ciencias en Bioprocesos

Un nuevo enfoque para el diseño riguroso y operación óptima de plantas tratadoras de agua

Tesis que para obtener el grado de:

Maestría en Ciencias en Bioprocesos

Presenta:

Pichardo Zárate Lizeth Montserrat

Directora de tesis: **Dra. Alicia Román Martínez**

SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P.

JUNIO 2025



REPOSITORIO INSTITUCIONAL



UASLP-Sistema de Bibliotecas

Repositorio Institucional Tesis digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en este Trabajo Terminal está protegido por la Ley Federal de Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos.

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde se obtuvo, mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto o con fines de lucro, reproducción, edición o modificación será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Un nuevo enfoque para el diseño riguroso y operación óptima de plantas tratadoras de agua ©
2025 por Pichardo Zárate Lizeth Montserrat tiene licencia Creative Commons Atribución-No
Comercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Este proyecto se realizó en el Laboratorio Intensificación de Procesos y en el Centro de Cómputo de Posgrado de la Facultad de Ciencias Químicas adscrito a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, en el periodo comprendido entre agosto del 2023 y junio del 2025, bajo la dirección de la Dra. Alicia Román Martínez y fue apoyado por La Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI).

El programa de Maestría en Ciencias en Bioprocesos de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí pertenece al Sistema Nacional de Posgrados de Calidad (SNP) de la SECIHTI, registro 000588. Número de la beca otorgada por SECIHTI: 1316764.

Los datos del trabajo titulado Un nuevo enfoque para el diseño riguroso y operación optima de plantas tratadoras de agua se encuentran bajo el resguardo de la Facultad de Ciencias Químicas y pertenecen a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
Facultad de Ciencias Químicas
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado
Posgrado en Ciencias en Bioprocesos
Programa de Maestría

Formato M15

Solicitud de Registro de Tesis Maestría

San Luis Potosí SLP a 6 de marzo de 2024

Comité Académico
Posgrado en Ciencias en Bioprocesos
Presente

Por este conducto solicito a Usted se lleve a cabo el registro de tema de tesis de Maestría, el cual quedo definido de la siguiente manera:

Un nuevo enfoque para el diseño riguroso y operación óptima de plantas tratadoras de agua.

que desarrollará el/la estudiante: **I.B.P. Lizeth Montserrat Pichardo Zárate**

bajo la dirección de: **Dra. Alicia Román Martínez**

Asimismo, le comunico que el proyecto en el cual trabajará el alumno **NO** involucrará **el manejo de animales de experimentación, estudios con seres humanos o muestras derivadas de los mismos, el manejo y/o generación de organismos genéticamente modificados** y requiere de aval de Comité de Ética e investigación de la FCQ.

(Complete la opción que aplique en su caso):

(X) No Aplica

Sin otro particular, quedo de Usted.

A T E N T A M E N T E

Lizeth Montserrat Pichardo
Zárate

Dra. Alicia Román-Martínez
Facultad de Ciencias Químicas-
UASLP



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ



FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

Posgrado en Ciencias en Bioprocesos

**Un nuevo enfoque para el diseño riguroso y
operación óptima de plantas tratadoras de agua**

Tesis que para obtener el grado de:

Maestría en Ciencias en Bioprocesos

Presenta:

Pichardo Zárate Lizeth Montserrat

SINODALES:

PRESIDENTE: DR. ALEJANDRO ROCHA URIBE _____

SECRETARIO: DRA. ALICIA ROMÁN MARTÍNEZ _____

VOCAL: DR. JORGE F. TORO VÁZQUEZ _____

SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P

JUNIO 2025

INTEGRANTES DEL COMITÉ TUTORIAL ACADÉMICO

Dr. Alicia Román Martínez: Adscrito al Posgrado en Ciencias en Bioprocesos de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, S.L.P.

Dr. Alejandro Rocha Uribe : Sinodal de tesis. Adscrito al Posgrado en Ciencias en Bioprocesos de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, S.L.P.

Dr. Jorge Fernando Toro Vázquez: Sinodal de tesis. Adscrito al Posgrado en Ciencias en Bioprocesos de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, S.L.P.



Carta Cesión de Derechos

San Luis Potosí SLP a junio 12 del 2025

En la ciudad de San Luis Potosí el día 12 del mes de junio del año 2025 El que suscribe Lizeth Montserrat Pichardo Zarate Alumno(a) del programa de posgrado de Ciencias en Bioprocesos adscrito a la Facultad de Ciencias Químicas manifiesta que es autor(a) intelectual del presente trabajo terminal, realizado bajo la dirección de: Dra. Alicia Román Martínez y cede los derechos del trabajo titulado Un nuevo enfoque para el diseño riguroso y operación optima de plantas tratadoras de agua a la **Universidad Autónoma de San Luis Potosí**, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir de forma total o parcial texto, gráficas, imágenes o cualquier contenido del trabajo si el permiso expreso del o los autores. Éste, puede ser obtenido directamente con el autor o autores escribiendo a la siguiente dirección alicia.romanm@uaslp.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Lizeth Montserrat Pichardo Zarate



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
Facultad de Ciencias Químicas
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado
Posgrado en Ciencias en Bioprocesos
Programa de Maestría

Formato M28

Carta de Análisis de Similitud

San Luis Potosí SLP a 16 de junio de 2025

L.B. María Zita Acosta Nava
Biblioteca de Posgrado FCQ

Asunto: Reporte de porcentaje de similitud de tesis de grado

Por este medio me permito informarle el porcentaje de similitud obtenido mediante Ithenticate para la tesis titulada UN NUEVO ENFOQUE PARA EL DISEÑO RIGUROSO Y OPERACIÓN OPTIMA DE PLANTAS TRATADORAS DE AGUA. La tesis es requisito para obtener el grado de Maestría en el Posgrado en Ciencias en bioprocesos. El análisis reveló un porcentaje de similitud de 19% excluyendo referencias y metodología.

Agradezco sinceramente su valioso tiempo y dedicación para llevar a cabo una exhaustiva revisión de la tesis. Quedo a su disposición para cualquier consulta o inquietud que pueda surgir en el proceso.

Sin más por el momento, le envío un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Dr. Jaime David Pérez Martínez
Coordinador del Posgrado en Ciencias en Bioprocesos

DEDICATORIAS Y AGRADECIMIENTOS

Con infinita gratitud y amor, dedico esta tesis a las personas y seres que han iluminado mi camino y hecho posible la culminación de este sueño.

A mi querida madre y mi padre, pilares de mi vida, por su amor incondicional, sacrificios y confianza, en mí y en mi capacidad para superar cada obstáculo. Gracias por ser mi fuente inagotable de fortaleza y enseñarme que los sueños se construyen con esfuerzo y dedicación.

A mi hermana, quien llena mi vida de alegría y con quien comparto los momentos más especiales, y a mi abuelita Luz, cuyo amor infinito y dulzura han sido mi puerto seguro. Su compañía, sus palabras y sus ejemplos son un recordatorio constante de las bendiciones que la vida nos da, iluminando cada paso que doy y enriqueciendo mi corazón con enseñanzas imborrables.

A Doris y Candy, mis más fieles, cuyos ojitos llenos de amor y compañía silenciosa alegraron mis jornadas de estudio y llenaron de ternura mis días más grises.

A mi gran amor, quien ha caminado a mi lado en este desafío, brindándome su apoyo inquebrantable, palabras de aliento y fe en mis capacidades. Gracias por ser mi refugio y mi motor.

A mis compañeras de la maestría, por su compañía y apoyo durante este desafiante pero enriquecedor proceso. Cada conversación, cada risa compartida y cada momento de estudio en conjunto me hicieron sentir que no estaba sola en este viaje.

A la Dra. Alicia Román Martínez, mi asesora de tesis, expreso mi más profundo agradecimiento por su invaluable guía, paciencia y confianza depositada en mi trabajo. Su conocimiento y profesionalismo fueron fundamentales para superar cada reto académico que este proyecto presentó, dejando una huella imborrable en mi formación.

A la Facultad de Ciencias Químicas y a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, agradezco sinceramente por ser el espacio donde pude crecer académica y personalmente. Esta institución no solo fue un recinto de aprendizaje, sino también el lugar donde descubrí y cultivé mi pasión por la ciencia.

RESUMEN

En este contexto global, en el que el agua dulce disponible es cada vez más escasa debido al crecimiento demográfico y a la demanda industrial, el tratamiento de las aguas residuales es la herramienta necesaria para garantizar que el recurso se utiliza de acuerdo con las condiciones reales. Este estudio se centra en la aplicación de técnicas de optimización estocástica en varias plantas de tratamiento de aguas residuales, con el objetivo de reducir los costes de operación y mejorar la eficiencia de los procesos teniendo en cuenta las incertidumbres asociadas a las variables operativas y a las condiciones ambientales.

Este trabajo analiza tres casos representativos de plantas de tratamiento de aguas residuales: dos pertenecientes al sector industrial (una farmacéutica y otra alimentaria) y la última una planta de tratamiento de aguas residuales municipales, identificando rangos óptimos de operación, desarrollando un modelo matemático detallado y proponiendo soluciones factibles en cumplimiento de las regulaciones y normativas medioambientales. Entre los métodos utilizados figuraban el balance de materiales, la modelización estocástica con un modelo de lodos activados (ASM) y algoritmos avanzados de optimización, como algoritmos genéticos, optimización por enjambre de partículas y simulación de Montecarlo.

Se utilizaron simulaciones de escenarios para evaluar distintas configuraciones y estrategias operativas, y los resultados mostraron reducciones de costes hasta 1.000 millones de dólares.

PALABRAS CLAVES: Optimización Estocástica, Tratamiento de Aguas Residuales, Costos Operacionales, Modelo de Lodos Activados, Sostenibilidad.

ABSTRACT

In this global context, where available freshwater is becoming increasingly scarce due to population growth and industrial demand, wastewater treatment is the necessary tool to ensure that the resource is used in accordance with actual conditions. This study focuses on the application of stochastic optimization techniques in various wastewater treatment plants, with the goal of reducing operating costs and improving process efficiency while considering the uncertainties associated with operational variables and environmental conditions.

This work analyzes three representative cases of wastewater treatment plants: two from the industrial sector (one pharmaceutical and one food industry) and one municipal wastewater treatment plant. It identifies optimal operating ranges, develops a detailed mathematical model, and proposes feasible solutions that comply with environmental regulations and standards. The methods used include material balance, stochastic modeling with an activated sludge model (ASM), and advanced optimization algorithms such as genetic algorithms, particle swarm optimization, and Monte Carlo simulation.

Scenario simulations were used to evaluate different configurations and operational strategies, and the results showed cost reductions of up to 1 billion dollars by reducing pollutants and ensuring compliance with current regulations.

KEYWORDS: Stochastic Optimization, Wastewater Treatment, Operational Costs, Activated Sludge Model, Sustainability.

Bibliografía.

1. Abdul Malek, N. H., Wan Yaacob, W. F., Md Nasir, S. A., & Shaadan, N. (2021). The effect of chemical parameters on water quality index in machine learning studies: A meta-analysis. *Journal of Physics: Conference Series*, 2084(1), 012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2084/1/012007>
2. Adetunji, A., & Olaniran, A. (2021). Treatment of industrial oily wastewater by advanced technologies: A review. *Applied Water Science*, 11(1), Article 64. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01430-4>
3. Analoui, R., Taheriyoun, M., & Amin, M. T. (2022). Dynamic failure risk assessment of wastewater treatment and reclamation plant: An industrial case study. *Safety*, 8(4), 79. <https://doi.org/10.3390/safety8040079>
4. Angenent, L. T., Karim, K., Al-Dahhan, M. H., Wrenn, B. A., & Domínguez-Espinosa, R. (2004). Production of bioenergy and biochemicals from industrial and agricultural wastewater. *Trends in Biotechnology*, 22(9), 477–485. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2004.07.001>
5. Aravena, R., & Robertson, W. D. (1998). Use of multiple isotope tracers to evaluate denitrification in groundwater: Study of nitrate from a large-flux septic system plume. *Ground Water*, 36(6), 975–982. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1998.tb02104.x>
6. Arif, A. U. A., Sorour, M. T., & Aly, S. A. (2020). Cost analysis of activated sludge and membrane bioreactor WWTPs using CapdetWorks simulation program: Case study of Tikrit WWTP (middle Iraq). *Alexandria Engineering Journal*, 59(6), 4659–4667. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.08.023>
7. Ayres Rebello, T., Roque, R., Gonçalves, R., Calmon, J., & Queiroz, L. (2021). Life cycle assessment of urban wastewater treatment plants: A critical analysis and guideline proposal. *Water Science & Technology*. Advance online publication. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.608>
8. Banco Mundial. (2020). *Wastewater: From Waste to Resource – Shifting Paradigms for Smarter Wastewater Interventions in Latin America and the Caribbean*. Recuperado de <https://www.worldbank.org/en/topic/water/publication/wastewater-initiative>
9. Bazaraa, M. S., Sherali, H. D., & Shetty, C. M. (1993). *Nonlinear programming: Theory and algorithms*. Chichester, UK: Wiley. https://www.google.com.mx/books/edition/Nonlinear_Programming/_2pRAAAAMAAJ?hl=es419&gbpv=0&bsq=Nonlinear%20programming:%20Theory%20and%20algorithms.%20Wiley
10. Beven, K. J., & Freer, J. (2001). Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology. *Journal of Hydrology*, 249(1–4), 11–29. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00421-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00421-8)
11. Birge, J. R., & Louveau, F. (2011). *Introduction to stochastic programming*. Springer.
12. Bofill, M., Muñoz, V., & Murillo, J. (2016). Solving the wastewater treatment plant problem with SMT. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/1609.05367>
13. Boltz, J. P., Morgenroth, E., deBarbadillo, C., Dempsey, M. J., McQuarrie, J. P., Ghylis, T., Harrison, J., & Nerenberg, R. (2009). Biofilm reactor technology and design. En T. L. Krause & A. B. Pincince (Eds.), *Design of municipal wastewater treatment plants. Liquid treatment processes* (Vol. 2, pp. 238). McGraw-Hill. <https://www.dora.lib4ri.ch/eawag/islandora/object/eawag%3A11582>

14. Borzooei, S., Campo, G., Cerutti, A., Meucci, L., Panepinto, D., Ravina, M., Riggio, V., Ruffino, B., Scibilia, G., & Zanetti, M. (2019). Optimization of the wastewater treatment plant: From energy saving to environmental impact mitigation. *Science of The Total Environment*, 691, 1182–1189. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.241>
15. Box, G. E. P., & Draper, N. R. (1987). *Empirical model-building and response surfaces*. Wiley. <https://doi.org/10.1137/1031022>
16. Boyd, S., & Vandenberghe, L. (2004). *Convex optimization*. Cambridge University Press. <https://www.cambridge.org/highereducation/books/convexoptimization/17D2FAA54F641A2F62C7CCD01DFA97C4#overview>
17. Bratby, J. (2016). *Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment* (3rd ed.). IWA Publishing. <https://doi.org/10.2166/9781780407500>
18. Caligan, C. J. A., Garcia, M. M. S., Mitra, J. L., & San Juan, J. L. G. (2022). Multi-objective optimization for a wastewater treatment plant and sludge-to-energy network. *Journal of Cleaner Production*, 368, Article 133047. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133047>
19. Castillo, A., Cheali, P., Gomez, V., Comas, J., Poch, M., & Sin, G. (2016). An integrated knowledge-based and optimization tool for the sustainable selection of wastewater treatment process concepts. *Environmental Modelling & Software*, 84, 177–192. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.06.019>
20. Capodaglio, A. G., & Olsson, G. (2017). Energy issues in sustainable urban wastewater management: Use, demand reduction, recovery opportunities. *Applied Energy*, 192, 165–178. <https://doi.org/10.3390/su12010266>
21. Chobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (2013). Chapter 1: *Wastewater engineering: An overview* (pp. 9–23). En *Wastewater engineering: Treatment and reuse*. McGraw-Hill.
22. Coma, M., Rovira, S., Canals, J., & Colprim, J. (2013). Minimization of sludge production by a side-stream reactor under anoxic conditions in a pilot plant. *Bioresource Technology*, 129, 229–235. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.11.055>
23. Comisión Nacional del Agua. (2020). *Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021: Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores nacionales*. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5635205&fecha=11/03/2022
24. Crini, G., & Lichtfouse, E. (2019). Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, 17(1), 145–155. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0785-9>
25. Díaz-Elsayed, N., Hua, J., Rezaei, N., & Zhang, Q. (2023). A decision framework for designing sustainable wastewater-based resource recovery schemes. *Sustainability*, 15(4), 3839. <https://doi.org/10.3390/su15043839>
26. Diwekar, U. (2008). *Introduction to applied optimization* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-76635-5>
27. Djami, A. B. N., Samon, J. B., Ousman, B., Nguelcheu, U., Nzié, W., Ntamack, G., & Kenmeugne, B. (2024). *Evaluation of the reliability of a system: Approach by Monte Carlo simulation and application*. *Open Journal of Applied Sciences*, 14(3), 721–739. <https://doi.org/10.4236/ojapps.2024.143051>
28. Doby, T., Loughlin, D., De los Reyes, F., & Ducoste, J. (2002). Optimization of activated sludge designs using genetic algorithms. *Water Science and Technology*, 45(3), 187–198. <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0106>

29. Dorigo, M. (1999). Ant colony optimization: A new meta-heuristic. En *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation—CEC99* (Vol. 2, pp. 1470–1477). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CEC.1999.782657>
30. El Aissaoui El Meliani, M. E. A., Sun, M., Amen, T. W. M., Choubane, H., Iddou, A., Liu, B., & Terashima, M. (2022). Optimization of an activated sludge process equipped with a diffused aeration system: Investigating the diffuser density sensitivity. *Advances in Environmental Technology*, 8(4), 255–270. <https://doi.org/10.22104/aet.2022.5455.1479>
31. Espinosa-Ortiz, E. J., Gerlach, R., Peyton, B. M., Roberson, L., & Yeh, D. H. (2023). Biofilm reactors for the treatment of used water in space: Potential, challenges, and future perspectives. *Biofilm*, 6, 100140. <https://doi.org/10.1016/j.bioflm.2023.100140>
32. Frialá, J., Escalona, F., Sigua, A., & San Juan, J. L. (2024). A multi-objective optimization of a wastewater treatment plant considering maximizing process effectiveness of each treatment. En *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)* (pp. 87–91). <https://doi.org/10.1109/IEEM62345.2024.10857154>
33. Fu, G., Butler, D., & Khu, S.-T. (2008). Multiple objective optimal design of urban wastewater systems. *Environmental Modelling & Software*, 23(3), 246–258. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2007.06.003>
34. García, M., & Rodríguez, J. (1997). Análisis de la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales industriales mediante procesos biológicos. *Environmental Technology*, 18(9), 1023–1032. <https://doi.org/10.1080/09593331808616479>
35. Gleick, P. H., Ajami, N., Christian-Smith, J., Cooley, H., Donnelly, K., Fulton, J., Ha, M.-L., Heberger, M., Moore, E., Morrison, J., Orr, S., Schulte, P., & Srinivasan, V.. (2014). *The world's water volume 8: The biennial report on freshwater resources*. Island Press. [https://doi.org/10.5822/978-1-61091-483-3:contentReference\[oaicite:37\]{index=37}](https://doi.org/10.5822/978-1-61091-483-3:contentReference[oaicite:37]{index=37})
36. Goel, R., & Mohaghegh Motlagh, A. (2013). *Biological phosphorus removal*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4578.6728>
37. Griboiro, A., McCorquodale, J., Pitt, P., Vinci, P., & Wang, T. (2007). Uncertainty analysis in wastewater engineering modeling: Understanding the limitations. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2007, 1584–1596. <https://doi.org/10.2175/193864707788116293>
38. Hamouda, M., Anderson, W. B., & Huck, P. M. (2009). Decision support systems in water and wastewater treatment process selection and design: A review. *Water Science and Technology*, 60(7), 1757–1770. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.538>
39. Henze, M., Harremoës, P., Arvin, E., & La Cour Jansen, J. (1997). *Wastewater treatment: Biological and chemical processes* (2^a ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-22605-6>
40. Holanda, B., Domokos, E., Rédey, Á., & Fazakas, J. (2007). Aeration optimization of a wastewater treatment plant using genetic algorithm. *Optimal Control Applications and Methods*, 28(3), 191–208. <https://doi.org/10.1002/oca.796>
41. Horvath, A., & Hendrickson, C. T. (1998). Steel versus reinforced concrete in environmental life cycle design. *Journal of Infrastructure Systems*, 4(3), 111–121. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(1998\)4:3\(111\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(1998)4:3(111))
42. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2022). *Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales 2021*. <https://www.inegi.org.mx/programas/cngmd/2021/>

43. Jiménez, B., & Asano, T. (Eds.). (2008). *Water reuse: An international survey of current practice, issues and needs*. IWA Publishing. <https://doi.org/10.2166/9781780401881>
44. Juárez-García, I., Snell-Castro, R., Méndez-Contreras, J., Vallejo-Cantú, N., Alavarado-Lassman, A., & Rosas-Mendoza, E. (2022). Performance of an anaerobic biofilm reactor through the application of different operational conditions. *Renewable Energy, Biomass & Sustainability*, 4(1), 14–22. <https://doi.org/10.56845/rebs.v4i1.71>
45. Karolinczak, B., Milaszewski, R., & Dąbrowski, W. (2020). Cost optimization of wastewater and septage treatment process. *Energies*, 13(23), 6406. <https://doi.org/10.3390/en13236406>
46. Kitanou, S., Tahri, M., Bachiri, B., Mahi, M., Hafsi, M., Taky, M., & Elmidaoui, A. (2018). Comparative study of membrane bioreactor (MBR) and activated sludge processes in the treatment of Moroccan domestic wastewater. *Water Science and Technology*, 78(9), 1951–1958. <https://doi.org/10.2166/wst.2018.384>
47. Kosgey Kiprotich, Zungu, P. V., Bux, F., & Kumari, S. (2022). Biological nitrogen removal from low carbon wastewater. *Frontiers in Microbiology*, 13, Article 968812. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.968812>
48. Liao, J., Li, S., Liu, Y., Mao, S., Tian, T., Ma, X., Li, B., & Qiu, Y. (2024). *Multi-Objective Optimization Based on Simulation Integrated Pareto Analysis to Achieve Low-Carbon and Economical Operation of a Wastewater Treatment Plant*. *Water*, 16(7), 995. <https://doi.org/10.3390/w16070995>
49. Liu, H., Yuan, Y., Zhao, M., Fang, H., & Zhao, H. (2011). *Hybrid multi-objective genetic algorithm for optimal design of water supply network*. En J. G. Uber, W. C. Jeppson, & C. H. Tryby (Eds.), *Water distribution systems analysis 2010: Proceedings of the 12th International Conference, WDSA 2010* (pp. 899–908). American Society of Civil Engineers. [https://doi.org/10.1061/41203\(425\)82](https://doi.org/10.1061/41203(425)82)
50. Liu, Y., & Tay, J.-H. (2001). Detachment forces and their influence on the structure and metabolic behavior of biofilms. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 17(2), 111–117. <https://doi.org/10.1023/A:1016625209839>
51. Lettinga, G., Field, J., van Lier, J., Zeeman, G., & Huishoff Pol, L. W. (1997). Advanced anaerobic wastewater treatment in the near future. *Water Science and Technology*, 35(10), 5–12. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00222-9](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00222-9)
52. Majeed, A., Zohul, A.-K., Hadi, A., & Hamza, Z. (2014). Optimal wastewater treatment design by using genetic algorithm. *University of Thi-Qar Journal for Engineering Sciences*, 5(1), 28–45. <https://doi.org/10.31663/utjes.v6i1.66>
53. Makinia, J., & Zaborowska, E. (2020). *Mathematical modelling and computer simulation of activated sludge systems* (2nd ed.). IWA Publishing. <https://doi.org/10.2166/9781780409528>
54. Metcalf & Eddy, Inc. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5.^a ed., Cap. 3, pp. 153–205). McGraw-Hill Education. <https://www.mheducation.com/highered/product/Wastewater-Engineering-Treatment-and-Resource-Recovery-Metcalf-and-Eddy>
55. Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models' part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
56. Nawaz, M. A., & Khan, M. I. (2018). Integrated, decentralized wastewater management for resource recovery in rural and peri-urban areas. *Resources*, 6(2), 22. <https://doi.org/10.3390/resources6020022>

57. Nemirovski, A. (2024). Chapter 1: *Introduction to linear optimization: Examples of LO models* (pp. 1–79). En *Introduction to linear optimization*. World Scientific Publishing Company.https://www.google.com.mx/books/edition/Introduction_To_Linear_Optimization/IJr7EAAAQBAJ
58. Olsson, G., Nielsen, M. K., Yuan, Z., Lynggaard-Jensen, A., & Steyer, J.-P. (2005). Instrumentation, control and automation in wastewater systems. *Water Intelligence Online*, 4. <https://doi.org/10.2166/9781780402680>
59. Oturan, M. A., & Aaron, J.-J. (2014). Advanced oxidation processes in water/wastewater treatment: principles and applications. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44(23), 2577–2641. <https://doi.org/10.1080/10643389.2013.829765>
60. Ozturk, M., Serrat, F., & Teymour, F. (2016). Optimization of aeration profiles in the activated sludge process. *Chemical Engineering Science*, 139, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.09.007>
61. United Nations Environment Programme (UNEP) & Pacific Institute. (2010). *Clearing the waters: A focus on water quality solutions*. <https://pacinst.org/publication/clearing-the-waters-focus-on-water-quality-solutions/>
62. Padilla-Rivera, A., Morgan-Sagastume, J. M., & Güereca-Hernández, L. P. (2019). Sustainability assessment of wastewater systems: An environmental and economic approach. *Journal of Environmental Protection*, 10(2), 241–259. <https://doi.org/10.4236/jep.2019.102014>
63. Pascual-Pañach, J., Sánchez-Marrè, M., & Cugueró-Escofet, M. À. (2024). A temporal case-based reasoning approach for performance improvement in intelligent environmental decision support systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 136(Part A), 108833. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108833>
64. Petrides, D., Cruz, R., & Calandranis, J. (1998). Optimization of wastewater treatment facilities using process simulation. *Computers & Chemical Engineering*, 22(Supplement 1), S775–S782. [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(98\)00073-8](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(98)00073-8)
65. Pichardo-Zárate, L., & Román-Martínez, A. (2024). Hacia un tratamiento eficiente de aguas residuales de la industria farmacéutica utilizando optimización estocástica. *Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad*, 3(1), 166–169. <https://doi.org/10.56845/terys.v3i1.310>
66. Poyatos, J., Muño, M., Almécija, M. C., Torres, J. C., Hontoria, E., & Osorio, F. (2009). Advanced oxidation processes for wastewater treatment: State of the art. *Water, Air, and Soil Pollution*, 205, 187–204. <https://doi.org/10.1007/s11270-009-0065-1>
67. Pytel, K. (2016). Hybrid fuzzy-genetic algorithm applied to clustering problem. *Annals of Computer Science and Information Systems*, 8, [páginas si las tienes]. <https://doi.org/10.15439/2016F232>
68. Rabayah, H., Lafi, W., Abushgair, K., & Assbeihat, J. M. (2016). Comparison of coagulation, electrocoagulation and biological techniques for the municipal wastewater treatment. *International Journal of Applied Engineering Research*, 11, 11014–11024. https://www.researchgate.net/publication/312328393_Comparison_of_Coagulation_Electrocoagulation_and_Biological_Techniques_for_the_Municipal_Wastewater_Treatment/citation/download
69. Rani, A., & Chang, C.-T. (2021). Modeling and optimization of wastewater treatment processes. In *Advanced Biological Treatment Processes* (pp. 123–145). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821009-3.00006-3>

70. Rittmann, B. E., & McCarty, P. L. (2001). *Environmental biotechnology: Principles and applications* (Cap. 4, Microbial kinetics, pp. 181–217). McGraw-Hill. https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781260441604/chapter/cha-006?utm_source=chatgpt.com
71. Rosso, D., & Stenstrom, M. K. (2005). Comparative economic analysis of the impacts of mean cell retention time and denitrification on aeration systems. *Water Research*, 39(16), 3773–3780. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.07.002>
72. Ruano, V., Ribes, J., Seco, A., & Ferrer, J. (2012). An advanced control strategy for biological nutrient removal in continuous systems based on pH and ORP sensors. *Chemical Engineering Journal*, 183, 212–221. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.12.064>
73. Salas, J., & Obeysekera, J. (2014). Revisiting the concepts of return period and risk for nonstationary hydrologic extreme events. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(4), 554–568. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000820](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000820)
74. Sampath, D., Mishra, B., Herath, S., Weerakoon, S., & Fukushi, K. (2015). Decision support system for sustainable water resources management. *NEAJ Newsletter*, 1, 5–10. https://www.researchgate.net/publication/273665886_DECISION_SUPPORT_SYSTEM_FOR_SUSTAINABLE_WATER_RESOURCES_MANAGEMENT
75. Sarpong, G., & Gude, V. G. (2021). Energy consumption and recovery in wastewater treatment systems. En V. G. Gude (Ed.), *Resource recovery in wastewater treatment* (Cap. 4). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003055501-4>
76. Sato, T., Qadir, M., Yamamoto, S., Endo, T., & Ahmad, Z. (2013). Global, regional, and country level need for data on wastewater generation, treatment, and use. *Agricultural Water Management*, 130, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.08.007>
77. Savic, D., & Walters, G. (1997). Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 123(2), 67–77. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1997\)123:2\(67\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1997)123:2(67))
78. Schütze, M., Butler, D., & Beck, M. (2002). *Modelling, simulation and control of urban wastewater systems*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0157-4>
79. Shabman, L., & Scodari, P. (2004). *Past, present, and future of wetlands credit sales* (Discussion Paper). Resources for the Future. https://www.researchgate.net/publication/23544425_Past_Present_and_Future_of_Wetlands_Credit_Sales
80. Sin, G., Gernaey, K., Neumann, M. B., Loosdrecht, M. C. M. V., & Gujer, W. (2009). Uncertainty analysis in WWTP model applications: A critical discussion using an example from design. *Water Research*, 43(11), 2894–2906. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.03.048>
81. Singh, T., & Khanna, P. (2025). Energy efficient wastewater treatment system for sustainable water conservation in industry. *International Journal of Contemporary Research in Multidisciplinary*, 4(2), 187–194. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15224757>
82. Singh, T., & Khanna, P. (2025). Optimization. In *Chemical Engineering Process Equipment Design and Integration* (Chapter 3, pp. 35–56). National Institute of Technology Srinagar. <https://nitsri.ac.in/Department/Chemical%20Engineering/PEDB1.pdf>

83. Speece, R. (1983). Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatment. *Environmental Science & Technology*, 17(9), 416A–427A. <https://doi.org/10.1021/es00115a001>
84. Sweco, S., & Pireva, R. (2020). Process adaptation of a small WWTP operated at low loading conditions for substantial energy savings. *Journal of Water Resource and Protection*, 12(6), 472–479. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2020.126028>
85. Tarique, A., & Gabbar, H. A. (2013). Particle swarm optimization (PSO) based turbine control. *Intelligent Control and Automation*, 4(2), 126–137. <https://doi.org/10.4236/ica.2013.42018>
86. Tsalas, N., Goufopoulos, S. K., Samios, S., Katsouras, G., & Peroulis, K. (2024). Optimization of energy consumption in a wastewater treatment plant: An overview. *Energies*, 17(12), 2808. <https://doi.org/10.3390/en17122808>
87. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2020). Stormwater discharges from construction activities. <https://www.epa.gov/npdes/stormwater-discharges-construction-activities>
88. UNESCO. (2017). *Wastewater: The untapped resource*. United Nations World Water Development Report. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247153>
89. Waqas, S., Harun, N. Y., Sambudi, N., Abioye, K. J., Zeeshan, M., Ali, A., Abdulrahman, A., Alkhatabi, L., & Alsaadi, A. (2023). *Effect of operating parameters on the performance of integrated fixed-film activated sludge for wastewater treatment. Membranes*, 13(8), 704. <https://doi.org/10.3390/membranes13080704>
90. Wei, Y., Van Houten, R. T., Borger, A. R., Eikelboom, D. H., & Fan, Y. (2003). Minimization of excess sludge production for biological wastewater treatment. *Water Research*, 37(18), 4453–4467. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00441-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00441-X)
91. Zakur, Y., Márquez, F., Al-Taie, A. S., Alsaidi, S., Alsadoon, A., Mirashrafi, S. B., Flaih, L., & Zakoor, Y. (2025). Artificial intelligence techniques applications in the wastewater: A comprehensive review. *E3S Web of Conferences*, 605, 03006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202560503006>
92. Zhang, H. L., Fang, W., Wang, Y. P., Sheng, G. P., Zeng, R. J., Li, W. W., & Yu, H. Q. (2013). Phosphorus removal in an enhanced biological phosphorus removal process: Roles of extracellular polymeric substances. *Environmental Science & Technology*, 47(20), 11482–11489. <https://doi.org/10.1021/es403227p>
93. Zieliński, M., Kazimierowicz, J., & Dębowski, M. (2023). Ventajas y limitaciones del tratamiento anaeróbico de aguas residuales: Fundamentos tecnológicos, líneas de desarrollo e innovaciones tecnológicas. *Energies*, 16(1), 83. <https://doi.org/10.3390/en16010083>