



Artículo

Humedal artificial: tratamiento de aguas grises en zonas rurales

José Brandon García Quintanar^{1*}, Nidia Magaly Martínez Zúñiga ² y Karla Lizeth Hernández Alonso ³

¹ Tecnológico Nacional de México/ITS de Huichapan, Arquitectura, México

² Tecnológico Nacional de México/ITS de Huichapan, Arquitectura, México

³ Tecnológico Nacional de México/ITS de Huichapan, Arquitectura, México

* Correspondencia: a22021645@iteshu.edu.mx

Resumen:

La comunidad de Las Vegas, Nopala, enfrenta una gestión inadecuada de aguas grises que provoca contaminación y riesgos sanitarios. El objetivo de esta investigación fue diseñar un humedal artificial como alternativa sostenible para el tratamiento y reutilización del agua en contextos rurales. Se aplicó un estudio de caso estructurado en cuatro fases: diagnóstico, análisis, diseño digital 3D y selección de especies acuáticas nativas para fitoremedición que en su aplicación física hagan cumplir con estándares establecidos en la NOM-127-SSA1 relacionados con la calidad que el agua debe cumplir después de ser tratada para su reutilización. Se obtuvo un prototipo virtual del humedal y datos sobre la eficacia de especies locales en la remoción de contaminantes permitiendo comprobar la viabilidad del sistema para mejorar la calidad del agua y promover su reutilización. Se concluye que esta propuesta puede constituir un modelo replicable y escalable que fomente la gestión sostenible del agua y la participación comunitaria.

Keywords: Remoción; Fitoremedición; Reutilización

1. Introducción

Cada día la escasez hídrica se ve agravada por el avance la urbanización, que se refleja con el crecimiento poblacional y los efectos del cambio climático. Durante mucho tiempo el modelo del uso de agua ya utilizada ha sido “tratar y descargar”, donde las aguas residuales una vez tratadas parcialmente, se liberan al ecosistema sin ser aprovechadas antes. Ante esta situación y otras más como la explotación excesiva de fuentes de agua dulce, la degradación de mantos acuíferos y el aumento de la demanda de agua, resulta importante buscar un modelo que consiga “tratar y reutilizar” para así poder dar un giro y cambiar el paradigma de lo que es la reutilización de agua. [1,2]. Este nuevo modelo no solo permitiría conservar este recurso tan valioso, sino que también daría paso a generar resistencia y adaptación ante la escasez de agua en comunidades vulnerables, especialmente en zonas rurales donde los sistemas de saneamiento son escasos o inexistentes.

Con este escenario el agua proveniente de duchas, lavamanos, lavadoras y fregaderos, que se denominan aguas grises, se pueden considerar una fuente alternativa de agua sumamente aprovechable. Este tipo de aguas conforman entre el 50% y el 80% de la descarga líquida doméstica, y su tratamiento y reutilización puede reducir considerablemente el uso sobre los sistemas que abastecen de agua potable [3]. Estas aguas grises al estar menos contaminadas en comparación con las aguas negras, representan una oportunidad para su recuperación mediante la implementación de tecnologías de bajo costo, que sean adaptables a las condiciones locales y que contengan una alta eficiencia en la remoción de contaminantes.

Citar este trabajo: García Quintanar, J.B.; Martínez Zuñiga, N.M.; Hernandez Alonso, K.L. *Humedal artificial: tratamiento de aguas grises en zonas rurales. RELITEC'S 2025, 8va, edición*

Recibido: 30/10/2025

Aceptado: 06/11/2025

Publicado: 20/11/2025

Para lograr su aprovechamiento, es fundamental implementar tecnologías de tratamiento eficaces, sencillas y sostenibles, que no necesiten de infraestructuras complejas ni costosas en cuanto a consumo energético e implementación. Entre las alternativas disponibles, los humedales artificiales destacan por su efectividad, sostenibilidad y adaptabilidad [4]. Este tipo de sistemas constituyen una tecnología que se inspira en los procesos que ocurren en los humedales naturales. A través de la interacción entre sustratos, microorganismos y plantas macrófitas, se logra la remoción de materia orgánica, nutrientes, metales pesados y microorganismos patógenos. Además, presentan ventajas considerables frente a los tratamientos convencionales, como bajo costo operativo, mínima necesidad de mantenimiento y un consumo energético casi nulo [4,5].

Los humedales artificiales no solo tratan el agua, sino que también proporcionan beneficios ecológicos complementarios. Estos sistemas contribuyen al aumento de la biodiversidad local, generan espacios verdes y pueden integrarse al paisaje de manera estética y funcional. En comunidades rurales, incluso pueden servir como espacios educativos que promuevan la conciencia ambiental y la gestión sostenible del recurso hídrico.

De acuerdo con Vymazal (1998), citado por Rodríguez (2019) [4], los humedales artificiales pueden clasificarse según el tipo de vegetación predominante en sus lechos:

- a) Macrófitas flotantes, como *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua) y *Lemna minor* (lenteja de agua);
- b) Macrófitas de hojas flotantes, como *Nymphaea alba* (nenúfar blanco) y *Potamogeton gramineus*;
- c) Macrófitas sumergidas, como *Littorella uniflora* y *Potamogeton crispus* (rizos de agua);
- d) Macrófitas emergentes, como *Typha latifolia* (espadaña o totora) y *Phragmites australis* (carrizo común) [6].

Cada tipo de planta ofrece diferentes ventajas en cuanto a absorción de nutrientes, oxigenación del agua y resistencia ambiental. No obstante, numerosos estudios coinciden en que las macrófitas emergentes presentan una mayor capacidad de adaptación a condiciones adversas y a variaciones climáticas, lo que las convierte en las especies más recomendadas para el tratamiento de aguas residuales [4].

A su vez, los humedales pueden subdividirse según el modo de flujo del agua:

- a) Humedales de flujo libre o superficial (HFS), donde el agua fluye sobre la superficie del sustrato;
- b) Humedales de flujo subsuperficial horizontal (HFSS), en los que el agua se mueve por debajo del sustrato, lo que minimiza olores y contacto directo con mosquitos;
- c) Humedales de flujo vertical (HFV), que alternan fases de llenado y vaciado para mejorar la aireación del sistema;
- d) Sistemas híbridos (SH), que combinan varios tipos de flujo para maximizar la eficiencia depurativa [4,5].

La elección del tipo humedal a implementar depende del objetivo del tratamiento, el espacio disponible y las condiciones ambientales locales. En todos los casos, los procesos de recirculación del agua tratada pueden implementarse para aumentar la eficiencia y garantizar un efluente de mejor calidad, especialmente cuando se requiere cumplir con normativas específicas para su reutilización [4,5].

Aunque este tipo de sistemas mantiene un gran potencial, la aplicación óptima de humedales artificiales para el tratamiento de aguas grises a escala más grande requiere de ajustes de diseño y selección cuidadosa de materiales. Este tipo de agua presenta una carga orgánica casi nula, pero contiene detergentes, aceites y grasas, los cuales pueden alterar los procesos biológicos de tratamiento si no se manejan adecuadamente [5,7]. Por esta razón, la selección del sustrato (arena, grava) y de las especies vegetales resulta crucial para garantizar tanto la eficiencia del proceso como la viabilidad económica y ecológica del sistema [6].

Entre las especies más utilizadas para fitorremediación en humedales se encuentran *Canna indica*, *Phragmites australis*, *Typha latifolia*, *Cyperus papyrus* y *Scirpus validus*. Estas plantas no solo facilitan la absorción y acumulación de nutrientes y metales, sino que también oxigenan el medio y proporcionan soporte para los microorganismos encargados de la degradación de materia orgánica. La combinación de procesos físicos, químicos y biológicos dentro del humedal garantiza una depuración integral, permitiendo alcanzar niveles de calidad del agua compatibles con su reutilización en otras actividades.

El diseño de humedales aplicables a comunidades rurales también implica considerar factores socioeconómicos y culturales, ya que se debe considerar que muchas veces las personas que ahí habitan no tienen noción de este tipo de tecnologías, aunque sin pensarlo lo tienen ahí presente en procesos naturales. La participación comunitaria en la construcción y mantenimiento de estos sistemas aumenta su aceptación social y asegura su sostenibilidad a largo plazo. Además, el uso de materiales locales, como gravas de la región o plantas nativas, reduce los costos y mejora la integración ambiental del proyecto.

La implementación de estos sistemas contribuye a cumplir con los siguientes Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS): ODS 6 (agua limpia y saneamiento), al promover tecnologías sostenibles para el tratamiento del agua. Asimismo, fortalece el ODS 11 (ciudades y comunidades sostenibles) y el ODS 13 (acción por el clima), al reducir la contaminación hídrica y fomentar la gestión de agua ante sequías y variaciones climáticas [2,3].

Por lo tanto, esta investigación propone evaluar el desempeño de un sistema de humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal, diseñado con especies vegetales y sustratos locales, para el tratamiento de aguas grises en la comunidad de Las Vegas, Nopala. El objetivo es garantizar que el agua tratada alcance parámetros de calidad adecuados para su reutilización segura en actividades agrícolas o urbanas, cumpliendo con los lineamientos de la NOM-127-SSA1 y otras normativas ambientales aplicables [3].

El proyecto además tiene un enfoque educativo y replicable, ya que busca crear conciencia sobre la gestión responsable del recurso hídrico y demostrar la viabilidad de los humedales como solución sostenible, económica y de bajo impacto ambiental. Su implementación puede servir como modelo para otras comunidades rurales de la zona que enfrentan problemáticas similares de saneamiento, fomentando así la economía circular y la autonomía hídrica local.

La correcta aplicación de los humedales requiere investigación local, selección adecuada de especies y monitoreo constante. Al integrar la innovación tecnológica con el conocimiento ecológico, este enfoque promueve un equilibrio entre desarrollo humano y conservación del ambiente, constituyéndose como una herramienta esencial para enfrentar la crisis hídrica actual y avanzar hacia una gestión del agua verdaderamente sostenible [1–7].

2. Materiales y Métodos

El método que se utilizó es de estudio de caso, este enfoque permite realizar un análisis y contextualización para evaluar la viabilidad de un sistema de tratamiento de aguas grises mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial en zonas rurales. El estudio se centra en la comunidad de Las Vegas, Nopala, Hidalgo considerando las condiciones ambientales y sociales locales.

Procedimiento

El procedimiento se desarrolla en cuatro fases consecutivas:

o Primera fase: se realizó un diagnóstico de las viviendas de la comunidad para conocer las condiciones de acceso a servicios básicos como drenaje y agua potable. Esto mediante visitas de campo y entrevistas, recopilando información que permita estimar el consumo promedio de agua en la comunidad.

o Segunda fase: se realizará un muestreo de las aguas grises generadas en las viviendas. Para conocer sus propiedades fisicoquímicas y microbiológicas, identificando los principales contaminantes, para elaborar un informe diagnóstico.

o Tercera fase: se diseñó el prototipo de humedal artificial utilizando software de modelado 3D. Las dimensiones del sistema se determinarán con base en el caudal de agua gris estimado y en los parámetros de calidad del agua.

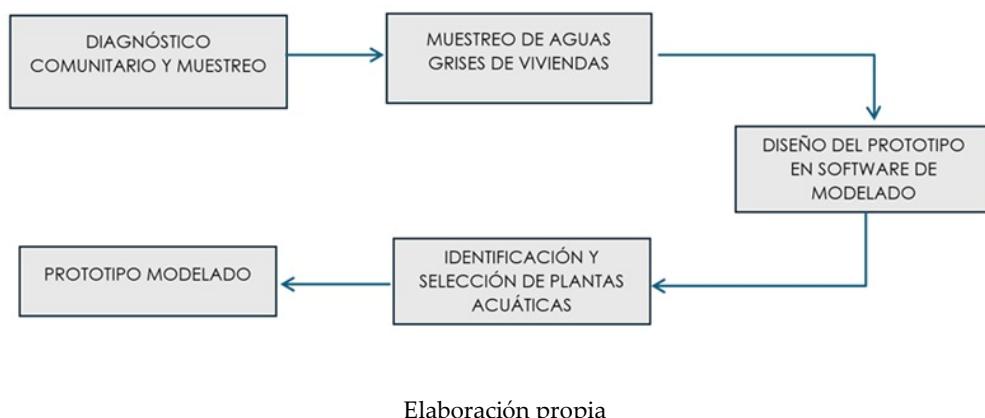
o Cuarta fase: se llevará a cabo la identificación y elección de especies acuáticas nativas de la comunidad de las Vegas, Nopala, a través de un análisis comparativo. La selección de las especies contará con una justificación técnica sobre su selección para el proceso de fitoremediaciόn.

3. Resultados

Después de desarrollar esta investigación, se ha completado la fase de diseño del humedal. Dicho diseño está respaldado por el prototipo virtual desarrollado y permitirá dar inicio a la siguiente etapa del proyecto: su desarrollo físico.

Esta investigación se llevó a cabo siguiendo las siguientes fases:

Figura 1. Fases de la investigación.



El diseño del humedal incluye la estructura completa del sistema, representada en un modelo tridimensional que permite visualizar la disposición de cada componente, así como los flujos de agua y los procesos de tratamiento. Se definió el dimensionamiento técnico del humedal, con un área total de 5.00 m², una profundidad media de 0.80 m y una capacidad de tratamiento de 3, 150 L por día. Se obtuvo las dimensiones de acuerdo con el siguiente análisis:

Tabla 1. Tabla de análisis de dimensiones

| No. habitantes | Gasto de agua semanal (L) | Volumen de agua (m ³) | Dimensiones del humedal (m) | | Profundidad recomendada |
|----------------|---------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------|-------------------------|
| 3 | 3, 150 | 3.15 | 3.15 | 1.57 | 0.50 – 0.80 m |
| 4 | 4, 200 | 4.2 | 4.20 | 2.10 | 0.55 – 0.80 m |
| 5 | 5, 250 | 5.25 | 5.25 | 2.62 | 0.60 – 0.80 m |

La selección de las especies fue a base de su eficiencia comprobada en la remoción de contaminantes como el Fosforo (P) y Nitrógeno (N), además de considerar que las especies sean de la región para evitar problemas de adaptabilidad y de mantenimiento. Dichas plantas se enlistarán en la tabla a continuación.

Tabla 2. Tabla de especificaciones de plantas acuáticas seleccionadas

| Parámetro | Lirio de agua (<i>Eichhornia crassipes</i>) | Lenteja de agua (<i>Lemna minor</i>) |
|-------------------|---|--|
| Tipo de macrófita | Flotante libre | Flotante libre |

| | | |
|--|-----------------------------|----------------------------|
| Tasa de crecimiento | Rápida | Rápida |
| Profundidad de raíz | 20-50 cm | 1 -5 cm |
| pH óptimo | 6.0 – 7.5 | 6.5 – 7.5 |
| Tolerancia de metales | Alta (Pb, Cd, Hg, Zn) | Moderada-Alta (As, Cu, Zn) |
| Remoción de N | 60 – 90% (Nitratos, Amonio) | 60 – 85% (Nitratos) |
| Remoción de P | 70 - 90% (Fosfatos) | 60 – 85% (Fosfatos) |
| Reducción de DBO | 60 - 80% | 50 – 75% |
| Mantenimiento requerido | Cada 2 – 4 semanas | Cada 1 – 3 semanas |
| Compatibilidad con otras especies | Alta | Alta |

En las siguientes imágenes se visualiza dicho diseño:

Figura 2. Prototipo del humedal y sus componentes



Elaboración propia



Figura 3. Vista general del humedal



Figura 4. Vista general del humedal

Elaboración propia

Además, se identificaron los materiales óptimos para su implementación en el humedal. Dichos materiales se listan en la tabla a continuación.

Tabla 3. Tabla de materiales a emplear para el diseño del humedal

| Categoría | Material / Equipo | Descripción / Uso | Justificación |
|-----------|-------------------|-------------------|---------------|
| | | | |

| | | | |
|------------------------------|--|--|---|
| Sustratos | Grava y arena | Medios filtrantes en las celdas del humedal [12]. | Actúan como medio filtrante físico, reteniendo sólidos suspendidos. |
| | Suelo local | | Proporciona micronutrientes para el establecimiento inicial de vegetación |
| Tuberías y accesorios | Tubería de PVC | Para entrada, distribución y salida de agua | Material resistente y económico, se utiliza para crear un sistema de distribución uniforme del agua |
| Equipos de medición | Medidor de pH, conductímetro, termómetro, kits portátiles para DBO/DQO | Determinación de parámetros fisicoquímicos [5]. | Esencial para el monitoreo y la evaluación del desempeño del sistema. |
| Software | Software de modelado 3D Y programa QGIS (software libre) | Modelado 3D, diseño técnico y georreferenciación del sitio [14]. | El modelado 3D permite visualizar, optimizar el diseño y detectar posibles problemas antes de la construcción |

Por otro lado, para determinar el tiempo de contacto hidráulico requerido para una fitorremediación efectiva se obtiene mediante el tiempo recomendado por tipo de planta [16]. De acuerdo con la selección de plantas se obtiene lo siguiente:

Tabla 4. Tabla de tiempo de contacto por tipo de planta

| | Lirio de agua (<i>Eichhornia crassipes</i>) | Lenteja de agua (<i>Lemna minor</i>) |
|---------------------|--|---|
| TRH mínimo | 3 – 5 días | 2 – 4 días |
| TRH óptimo | 5 – 10 días | 3 - 7 días |
| Remoción DBO | Mínimo 50 – 65% | Mínimo 45 – 60% |
| | Óptimo 75 – 90% | Óptimo 65 – 80% |
| Remoción N | Mínimo 40 – 55% | Mínimo 50 – 65% |
| | Óptimo 70 - 85% | Óptimo 75 – 85% |
| Remoción P | Mínimo 45 – 60% | Mínimo 55 – 70% |
| | Óptimo 75 – 88% | Óptimo 80 – 90% |

Con los resultados obtenidos, la investigación avanza a la siguiente etapa: su construcción y funcionamiento, esto permitirá evaluar su desempeño en condiciones reales y dará paso a ajustar los parámetros de operación si fuera necesario.

Cuando el prototipo físico sea implementado, será necesario ejecutar un plan de monitoreo, el cual servirá para asegurar y evaluar su correcto funcionamiento, con ello se podrán implementar acciones preventivas o correctivas según sea necesario, para maximizar su eficiencia. Dentro de las actividades de este plan se podrán encontrar mediciones periódicas de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, así como la observación del comportamiento de la vegetación y el desempeño del sistema del humedal.

El proyecto no buscará solamente validar su tecnología, sino que también se reflejará como un marco de referencia para la comunidad rural donde será desarrollado. Servirá como un hito y espacio de capacitación, promoviendo su replicación de esta solución en

otras zonas con problemáticas similares. A través de talleres y guías técnicas, el conocimiento podrá pasar entre los habitantes, mejorando sus capacidades para la gestión sostenible del agua y posicionando a este proyecto como una alternativa accesible y eficaz en zonas marginadas.

4. Discusión

En esta investigación, los resultados obtenidos muestran el diseño del humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal con un área de 5.00 m² y una capacidad de tratamiento de 3, 150 litros al día, se considera también la utilización de especies acuáticas nativas de la región, como Lirios de agua (*Eichhornia crassipes*) y lenteja de agua (*Lemna minor*), debido a su eficiencia y bajo requerimiento de menor mantenimiento. Esta investigación demuestra que la implementación de humedales artificiales para el tratamiento de aguas grises en zonas rurales representa una solución viable y sostenible, especialmente en zonas rurales.

Desde un enfoque técnico, el dimensionamiento del humedal, basado en el caudal estimado de aguas grises y las características fisicoquímicas identificadas en la primera fase de diagnóstico, refleja un enfoque replicable y contextualizado. Esto de acuerdo con investigaciones realizadas por Molina Salas (2023) [12] y Ferrer (2020) [13], quienes indican que el correcto funcionamiento de estos sistemas depende en gran medida de una correcta caracterización del agua y de la adecuada selección de especies acuáticas.

Los humedales artificiales pueden actuar como reservorios de vida silvestre y son útiles para recircular materia orgánica, producir y aprovechar materiales útiles en la construcción, plantas de ornato, reciclaje de materia orgánica, además de ayudar a generar oxígeno y captar CO₂ [9]. La implementación de este prototipo busca fortalecer la participación comunitaria, un aspecto crucial para la sostenibilidad a largo plazo, tal como lo menciona ONU-Hábitat [11] en sus orientaciones sobre desarrollo comunitario.

Las implicaciones de este estudio trascienden en el ámbito técnico y se extienden al campo socioambiental. Por ello la integración de talleres y capacitaciones como parte del proyecto puede aumentar la aceptación social y facilitar la replicabilidad del modelo en otras comunidades con problemáticas similares, la implementación del humedal podría servir como referente para impulsar modelos de gestión del agua en zonas que no cuenten con una buena infraestructura en servicios básicos y de redes de saneamiento.

Conclusiones

La investigación realizada demuestra que los humedales artificiales constituyen una alternativa confiable y sostenible para dar un segundo uso a las aguas grises en comunidades rurales que carecen de agua potable y presentan limitaciones en sus redes hidráulicas. En la investigación se propuso un diseño digital con software especializado, basado en materiales de la región y con plantas nativas de la misma, lo que favorece la eliminación de contaminantes mediante procesos físicos y permite utilizar el agua tratada en usos domésticos como la limpieza y el riego de huertos y áreas verdes.

Al ser un proyecto aplicable en comunidades rurales, contribuye como un proyecto social y fomenta el aprovechamiento de las aguas grises una vez tratadas, promoviendo así una cultura ambiental sostenible. En general, esta investigación contribuye al aprovechamiento de un recurso hídrico que, mediante los humedales artificiales, puede ser utilizado, evitando su desaprovechamiento. Se recomienda continuar con el monitoreo a largo plazo y explorar su funcionalidad para beneficiar a un mayor número de viviendas.

Agradecimientos: Este trabajo fue posible gracias al apoyo del Instituto Tecnológico Superior de Huichapan (ITESHU) por la asesoría técnica.

Financiamiento: Esta investigación no recibió financiamiento externo

Referencias

1. Fundación Aquae. (2021, 22 septiembre). Contaminación del agua: principales causas. Fundación Aquae.
2. Sostenibilidad, R. (2025, 15 abril). Sostenibilidad: la única apuesta por el futuro. Pacto Mundial.
3. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2023). Ley de Aguas Nacionales. Secretaría de Gobernación.
4. Rodríguez, J. J. S. (2019, 27 noviembre). Introducción a los Humedales Artificiales como tratamiento de las aguas residuales. iAgua.
5. Aquanova. (2023, 1 agosto). ¿Qué es la DBO y DQO? Aquanova.
6. Jardín Botánico de Córdoba. (2021, 4 mayo). Plantas acuáticas. Jardín Botánico de Córdoba.
7. Prisma. (2024, 14 marzo). Contaminación del suelo: causas y soluciones. Eurofins Environment Testing Spain.
8. Ocaña, G. L., Pérez, N. E., Pérez, G. A., Mendoza, E. C. A., & Balcázar, C. A. T. (2023). Degradación de contaminantes en humedales artificiales en serie con especies macrófitas del trópico húmedo. CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias, 12(24), 19-48. <https://doi.org/10.23913/ciba.v12i24.122>
9. Martínez, R. (2024, 10 junio). Humedal artificial en la UNAM: innovación en tratamiento de aguas residuales - UNAM Global. UNAM Global - de la Comunidad Para la Comunidad. https://unamglobal.unam.mx/global_revista/humedal-artificial-en-la-unam-innovacion-en-tratamiento-de-aguas-residuales/
10. Fundación Global Nature. (2020, 11 junio). Humedales artificiales - Fundación Global Nature. Fundación Global Nature - Desde 1993 Dedicados A la Conservación de la Naturaleza y la Funcionalidad de los Ecosistemas. <https://fundacionglobalnature.org/humedales-artificiales/>
11. ONU-Hábitat. (s.f.). ¿Cómo definir ciudades, pueblos y áreas rurales? <https://onuhabitat.org/index.php/como-definir-ciudades-pueblos-y-areas-rurales>
12. Molina Salas, M. A. (2023). Diseño de sistema de humedal artificial de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales, Alto Cunas, centro poblado Chaquecocha.
13. Ferrer, L. (2020). Humedal artificial empleando especies fitodepuradoras nativas para el tratamiento de aguas residuales en el Distrito de San Antonio Huarochoirí.
14. Autodesk Inc. (2025). Revit 2025 User Guide. Autodesk.
15. Secretaría de Salud de México. (2021). NOM-127-SSA1-2021, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano.
16. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: humedales artificiales. (2015). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/CONAGUA%202015.%20Manual%20Humedales%20Artificiales%2030.pdf