

EN

Design of a subsurface constructed wetland for wastewater treatment in the Tantala Stream, Milcahuales, Álamo Temapache, Veracruz, Mexico

ES

Diseño de un humedal artificial subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales en el arroyo Tántala, Milcahuales, Álamo Temapache, Veracruz, México

Oscar Eduardo Rivas-Aguilar; Lila Margarita Bada-Carbajal*; Margarita Fuentes-Olivares
Instituto Tecnológico Superior de Álamo Temapache, Tecnológico Nacional de México,
ITESAT-CA-3 PRODEP "Gestión Ambiental y Organizacional", Veracruz, México

*Corresponding author:
lila.bc@alamo.tecnm.mx

ORCID: 0000-0001-7757-5601

Received: June 19, 2024

Accepted: September 5, 2024

DOI:
10.5154/r.rchsat.2024.04.05

Abstract

The purpose of a wetland is to significantly eliminate biological, chemical and physical impurities present in water, thus contributing to the improvement of water quality and preservation of the local ecosystem. This research aimed to design a constructed wetland system by characterizing the waste discharged into a section of the Tantala Stream, a runoff that runs through the town of Milcahuales in the municipality of Álamo Temapache, Veracruz. The result was the design of a four-phase vertical flow subsurface constructed wetland. The research included a literature review on wetland issues at the international and national level, collection of information from the study area through interviews with the population to identify pollution sources, and field trips to observe the conditions of the stream; as a result, the predominant wastes identified in the water were organic, inorganic and those requiring special handling. The study will significantly contribute to improving the quality of life of the community and preserving the environmental surroundings in the long term.

Keywords: Constructed wetland, remediation, water quality, pollution.

Resumen

La finalidad de un humedal es eliminar de manera significativa las impurezas de tipo biológico, químico y físico presentes en el agua, contribuyendo así a la mejora de la calidad del agua y preservación del ecosistema local. El objetivo de esta investigación fue realizar el diseño de un sistema con el uso de humedales artificiales mediante la caracterización de los residuos vertidos en una sección del arroyo Tántala, escorrentía que atraviesa por la localidad de Milcahuales perteneciente al municipio de Álamo Temapache, Veracruz. El resultado fue el diseño de un humedal artificial subsuperficial de flujo vertical de cuatro fases. La investigación comprendió una revisión de literatura en cuanto a temas de humedales a nivel internacional y nacional, recopilación de información del área de estudio mediante entrevistas con la población para la identificación de las fuentes de contaminación y recorridos de campo para observar las condiciones del arroyo; como resultado, los residuos que predominaron en el agua fueron: orgánicos, inorgánicos y de manejo especial. El estudio contribuirá significativamente a mejorar la calidad de vida de la comunidad y preservar el entorno ambiental a largo plazo.

Palabras clave: Humedal artificial, remediación, calidad del agua, contaminación.

Please cite this article as follows (APA 7): Rivas-Aguilar, O. E., Bada-Carbajal, L. M., & Fuentes-Olivares, M. (2024). Design of a subsurface constructed wetland for wastewater treatment in the Tantala Stream, Milcahuales, Álamo Temapache, Veracruz, Mexico. *Revista Chapingo Serie Agricultura Tropical*, 4(2). doi: <https://doi.org/10.5154/r.rchsat.2024.04.05>

Introduction

Pollution of surface water bodies is a major environmental problem worldwide. It is estimated that about 80 % of wastewater returns to aquatic ecosystems without being treated or reused (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [UNESCO], 2017). This situation puts the health of aquatic ecosystems at risk and compromises the availability of safe water for human consumption and productive activities. A recent study by Britto et al. (2022) points out that this problem has intensified in recent years due to population growth and industrial expansion in developing countries. In addition, Zhao et al. (2023) have identified new emerging pollutants that represent additional challenges for wastewater treatment.

In Mexico, the pollution of rivers and streams is a worrisome reality. According to the National Inventory of Wastewater Discharges, more than 165 thousand municipal and industrial wastewater discharges into national water bodies were recorded in 2017 (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2018). This has led to the degradation of important hydrological basins and the loss of water quality in various regions of the country (Pérez-Flores et al., 2019). On the other hand, Martínez-Austria et al. (2021) report that climate change is exacerbating these problems, affecting water availability and quality in Mexico. A recent study by López-Ramírez et al. (2024) revealed that microplastic pollution in Mexican rivers has increased by 40 % in the last five years.

The situation in the state of Veracruz is particularly alarming. Martínez-Tavera et al. (2018) found that a significant proportion of the state's rivers and streams have high levels of pollution from wastewater discharges, urban solid waste and toxic substances. This has generated a negative impact on aquatic biodiversity, public health, and economic activities that depend on water resources. García-García et al. (2023) have documented a significant decrease in the diversity of aquatic macroinvertebrates in several rivers in Veracruz, directly attributing it to water pollution. Additionally, Morales-Hernández et al. (2022) have reported an increase in the frequency of harmful algal blooms in the coastal areas of Veracruz, associated with excess nutrients from agricultural and urban pollution.

One of the most critical cases is that of the Tántala Stream, located in the town of Milcahuales, municipality of Álamo Temapache, Veracruz. This waterbody has been the recipient of domestic and industrial wastewater discharges, as well as urban solid waste dumped into the stream, which have significantly deteriorated

Introducción

La contaminación de los cuerpos de agua superficiales es un problema ambiental de gran magnitud a nivel mundial. Se estima que alrededor del 80 % de las aguas residuales retornan a los ecosistemas acuáticos sin ser tratadas o reutilizadas (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [UNESCO], 2017). Esta situación pone en riesgo la salud de los ecosistemas acuáticos y compromete la disponibilidad de agua segura para el consumo humano y las actividades productivas. Un estudio reciente de Britto et al. (2022), señala que esta problemática se ha intensificado en los últimos años debido al crecimiento poblacional y la expansión industrial en países en desarrollo. Además, Zhao et al. (2023), han identificado nuevos contaminantes emergentes que representan desafíos adicionales para el tratamiento de aguas residuales.

En México, la contaminación de ríos y arroyos es una realidad preocupante. Según el Inventario Nacional de Descargas de Aguas Residuales, en 2017 se registraron más de 165 mil descargas de aguas residuales municipales e industriales a cuerpos de agua nacionales (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2018). Esto ha provocado la degradación de importantes cuencas hidrológicas y la pérdida de calidad del agua en diversas regiones del país (Pérez-Flores et al., 2019). Por otro lado, Martínez-Austria et al. (2021), reportan que el cambio climático está exacerbando estos problemas, afectando la disponibilidad y calidad del agua en México. Un estudio reciente de López-Ramírez et al. (2024), ha revelado que la contaminación por microplásticos en los ríos mexicanos ha aumentado en un 40 % en los últimos cinco años.

La situación en el estado de Veracruz es especialmente alarmante. Martínez-Tavera et al. (2018), encontraron que una proporción significativa de los ríos y arroyos del estado presentan altos niveles de contaminación por descargas de aguas residuales, residuos sólidos urbanos y sustancias tóxicas. Esto ha generado impacto negativo en la biodiversidad acuática, la salud pública y las actividades económicas que dependen de los recursos hídricos. García-García et al. (2023), han documentado una disminución significativa en la diversidad de macroinvertebrados acuáticos en varios ríos de Veracruz, atribuyéndola directamente a la contaminación del agua. Adicionalmente, Morales-Hernández et al. (2022), han reportado un aumento en la frecuencia de floraciones algales nocivas en las zonas costeras de Veracruz, asociadas al exceso de nutrientes provenientes de la contaminación agrícola y urbana.

Uno de los casos más críticos es el del arroyo Tántala, ubicado en la localidad de Milcahuales, municipio de

its quality (López-Hernández et al., 2017). This has led to a decrease in aquatic biodiversity, health problems in the local population, and limitations in the use of water for domestic and agricultural activities. A recent analysis by Ramírez-Sánchez et al. (2024) reveals that the situation of the Tantala Stream has worsened in recent years, with a 30 % increase in the concentration of organic pollutants between 2020 and 2023.

Faced with this problem, it is urgent to implement effective and sustainable solutions for wastewater treatment and the recovery of the quality of waterbodies in Veracruz and throughout the country. Constructed wetlands are emerging as a promising alternative, combining water purification with environmental and social benefits (Wu et al., 2015; Vymazal, 2014). Recent studies by Li et al. (2022) and Gorito et al. (2023) have demonstrated the effectiveness of constructed wetlands in removing emerging pollutants and microplastics, respectively, further expanding the potential of these technologies to address current water pollution challenges.

Constructed wetlands have proven effective in removing various pollutants present in wastewater, such as organic matter, nutrients (nitrogen and phosphorus), heavy metals, persistent organic compounds and pathogens (Stefanakis et al., 2021). These systems can be used as primary, secondary or tertiary treatment, depending on the specific water quality requirements.

One of the main purification mechanisms in constructed wetlands is phytoremediation, which consists of the absorption, accumulation and metabolism of pollutants by aquatic plants (Rezania et al., 2019). In addition, microorganisms present in the soil and in the rhizosphere of plants contribute to the degradation of organic compounds and the removal of nutrients through processes such as nitrification and denitrification (Wang et al., 2020).

Another important aspect of constructed wetlands is their ability to retain suspended solids and sediments, which improves the physical water quality (Ilyas & Masih, 2017). In addition, these systems promote biodiversity by providing habitats for different species of aquatic flora and fauna (Maniquiz-Redillas et al., 2021).

From a sustainability approach, constructed wetlands are an attractive solution due to their low construction and operating costs, low energy consumption, and integration with the natural environment (Langergraber et al., 2020). Furthermore, these systems can be designed in a modular and scalable manner, making them adaptable to different wastewater treatment scenarios and needs (Sehar & Nasser, 2019).

Álamo Temapache, Veracruz. Este cuerpo de agua ha sido receptor de descargas de aguas residuales domésticas e industriales, así como de residuos sólidos urbanos vertidos en el arroyo, lo que ha deteriorado significativamente su calidad (López-Hernández et al., 2017). Esto ha provocado la disminución de la biodiversidad acuática, problemas de salud en la población local y limitaciones en el uso del agua para actividades domésticas y agrícolas. Un análisis reciente de Ramírez-Sánchez et al. (2024), revela que la situación del arroyo Tántala se ha agravado en los últimos años, con un aumento del 30 % en la concentración de contaminantes orgánicos entre 2020 y 2023.

Ante esta problemática, es urgente implementar soluciones efectivas y sostenibles para el tratamiento de las aguas residuales y la recuperación de la calidad de los cuerpos de agua en Veracruz y en todo el país. Los humedales artificiales se perfilan como una alternativa prometedora, al combinar la depuración del agua con beneficios ambientales y sociales (Wu et al., 2015; Vymazal, 2014). Estudios recientes de Li et al. (2022) y Gorito et al. (2023), han demostrado la eficacia de los humedales artificiales en la remoción de contaminantes emergentes y microplásticos, respectivamente, ampliando aún más el potencial de estas tecnologías para abordar los desafíos actuales de la contaminación del agua.

Los humedales artificiales han demostrado su efectividad en la remoción de diversos contaminantes presentes en las aguas residuales, como materia orgánica, nutrientes (nitrógeno y fósforo), metales pesados, compuestos orgánicos persistentes y patógenos (Stefanakis et al., 2021). Estos sistemas pueden ser utilizados como tratamiento primario, secundario o terciario, dependiendo de los requerimientos específicos de la calidad del agua.

Uno de los principales mecanismos de depuración en los humedales artificiales es la fitorremediación que consiste en la absorción, acumulación y metabolismo de contaminantes por parte de las plantas acuáticas (Rezania et al., 2019). Además, los microorganismos presentes en el suelo y en la rizosfera de las plantas, contribuyen a la degradación de compuestos orgánicos y a la remoción de nutrientes a través de procesos como la nitrificación y desnitrificación (Wang et al., 2020).

Otro aspecto importante de los humedales artificiales es su capacidad de retención de sólidos suspendidos y sedimentos, lo que mejora la calidad física del agua (Ilyas & Masih, 2017). Además, estos sistemas promueven la biodiversidad al proporcionar hábitats para diferentes especies de flora y fauna acuática (Maniquiz-Redillas et al., 2021).

Constructed wetlands have demonstrated removal efficiencies of over 90 % for suspended solids, organic matter and nutrients such as nitrogen and phosphorus (Vymazal, 2018). Additionally, their ability to remove pathogens, heavy metals and persistent organic compounds has been widely documented (Zhang et al., 2020; Hijosa-Valsero et al., 2016).

From an economic perspective, constructed wetlands have significantly lower construction and operating costs than conventional wastewater treatment systems (Lutterbeck et al., 2017). This is mainly due to their low energy consumption, the absence of complex mechanical processes, and the use of low-cost materials, such as gravel and native plants (Masi et al., 2018).

Despite these advantages, it is important to consider that constructed wetlands require careful planning and design to ensure their long-term efficiency and sustainability; factors such as plant species selection, substrate type, hydraulic loading and local climatic conditions must be properly evaluated (Liu et al., 2021). This article aimed to design a vertical subsurface constructed wetland system for the treatment of water polluted by urban solid waste dumped into the Tantala Stream, Milcahual, Veracruz, Mexico, based on the characterization of the pollutants present.

Materials and methods

This work focused on the design of a constructed wetland system based on phytoremediation, which refers to the purification of polluted water by means of higher plants, in this case macrophytes, in wetlands or aquatic systems, whether natural or artificial. Based on the above, the term macrophytes, with respect to its use in scientific language, encompasses aquatic plants visible to the naked eye, including vascular aquatic plants, mosses, algae and ferns (Brix & Schierup, 2015). This type of wetland constitutes a “phytosystem” process, as it uses solar energy through photosynthesis, so basically it is about capturing sunlight and transforming it into chemical energy, which is used in its metabolism to perform vital functions.

Delimitation of the study area

The community of Milcahual is located in the municipality of Temapache in the state of Veracruz de Ignacio de la Llave. The community has 281 inhabitants of which 147 are men and 134 are women (INEGI, 2020) and a fertility rate (children per woman) of 3.08, with a settled population from outside the state of Veracruz of 2.14 % and an indigenous population percentage of 3.91 %; it is important to note that 38.27 % of the houses have a toilet or bathroom. Figures 1 and 2

Desde un enfoque de sostenibilidad, los humedales artificiales son una solución atractiva debido a su bajo costo de construcción y operación, su bajo consumo energético y su integración con el entorno natural (Langergraber et al., 2020). Además, estos sistemas pueden ser diseñados de manera modular y escalable, lo que los hace adaptables a diferentes escenarios y necesidades de tratamiento de aguas residuales (Sehar & Nasser, 2019).

Los humedales artificiales han demostrado eficiencias de remoción superiores al 90 % para sólidos suspendidos, materia orgánica y nutrientes como nitrógeno y fósforo (Vymazal, 2018). Por otro lado, su capacidad para eliminar patógenos, metales pesados y compuestos orgánicos persistentes ha sido ampliamente documentada (Zhang et al., 2020; Hijosa-Valsero et al., 2016).

Desde una perspectiva económica, los humedales artificiales presentan costos de construcción y operación significativamente más bajos que los sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales (Lutterbeck et al., 2017). Esto se debe principalmente a su bajo consumo de energía, la ausencia de procesos mecánicos complejos y la utilización de materiales de bajo costo, como grava y plantas nativas (Masi et al., 2018).

A pesar de estas ventajas, es importante considerar que los humedales artificiales requieren una cuidadosa planificación y diseño para garantizar su eficiencia y sostenibilidad a largo plazo; factores como la selección de especies vegetales, el tipo de sustrato, la carga hidráulica y las condiciones climáticas locales, deben ser evaluadas adecuadamente (Liu et al., 2021). Este artículo tuvo como objetivo, diseñar un sistema de humedal artificial subsuperficial vertical para el tratamiento de las aguas contaminadas por residuos sólidos urbanos vertidos en el arroyo Tántala, Milcahual, Veracruz, México; con base en la caracterización de los contaminantes presentes.

Materiales y métodos

Este trabajo se enfocó en el diseño de un sistema artificial de humedales, por lo que la fitodepuración hace referencia a la depuración de aguas contaminadas por medio de plantas superiores, en este caso las macrófitas, en los humedales o sistemas acuáticos, ya sean estos naturales o artificiales. Con base en lo anterior, el término macrófitas, con respecto a su uso en el lenguaje científico, abarca a las plantas acuáticas visibles a simple vista, incluye plantas acuáticas vasculares, musgos, algas y helechos (Brix & Schierup, 2015). Este tipo de humedales constituyen un proceso de “fitosistemas”, pues emplean la energía solar a través de la fotosíntesis, por lo que básicamente, se

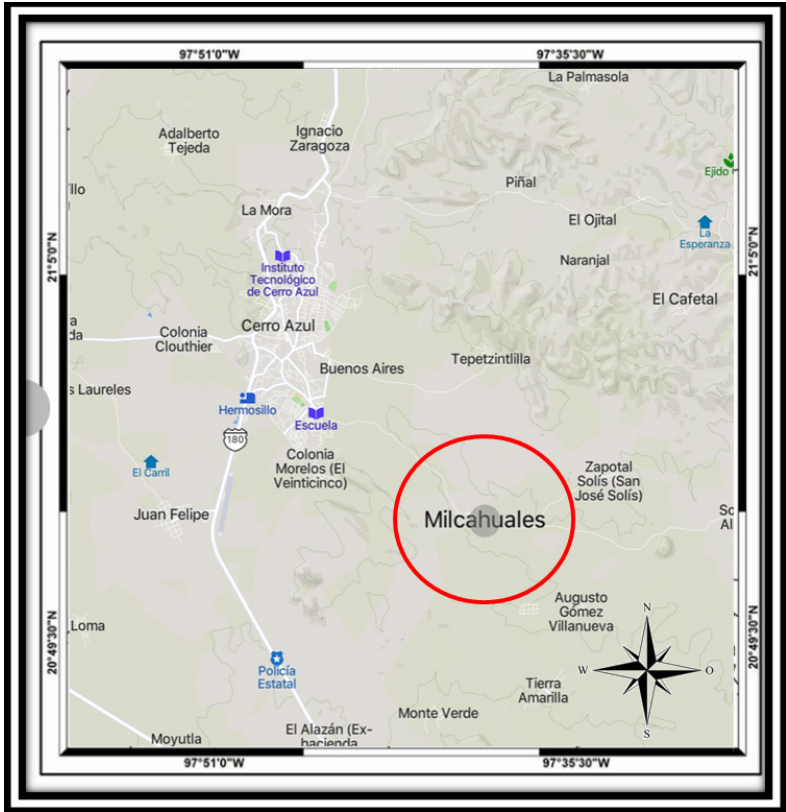


Figure 1. Polygon of the Micahuales, Álamo Temapache; Ver.
Figura 1. Polígono del área de Micahuales, Álamo Temapache; Ver.

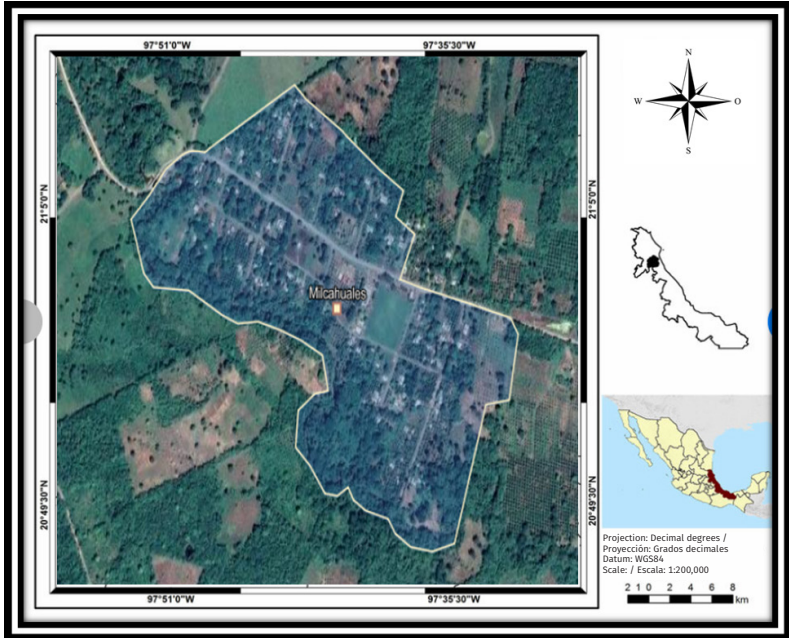


Figure 2. Milcahuales municipality of Álamo Temapache, Ver.
Figura 2. Milcahuales municipio de Álamo Temapache, Ver.

Source: INEGI Digital Map, 2023 / Fuente: Mapa Digital de INEGI, 2023

show that the community of Milcahuales is located 26.8 kilometers from Álamo Temapache (town with the highest population rate in the municipality of Álamo Temapache, Veracruz) at an elevation of 97 meters above sea level, with a latitude of 21.154444 and longitude of -97.699444. In the DMS system the latitude is 210916 and the longitude is -974158.

Methodological approach

This study proposes a comprehensive methodology with four fundamental phases for the analysis and design of a constructed wetland in the community of Milcahuales. This holistic methodology addresses in a sustainable way the mitigation of negative environmental impacts on the aquatic environment of the area (Figure 3).

Phase 1: Pollution sources

Interviews were conducted with 15 experts on the sub-

trata de captar la luz solar y transformarla en energía química, que es usada en su metabolismo para realizar funciones vitales.

Delimitación del área de estudio

La localidad de Milcahuales se localiza en el municipio de Temapache, perteneciente al estado de Veracruz de Ignacio de la Llave. La localidad cuenta con 281 habitantes de los cuales 147 son hombres y 134 mujeres (INEGI, 2020) y un índice de fecundidad (hijos por mujer) de 3.08, con una población asentada proveniente de fuera del estado de Veracruz del 2.14 %, y un porcentaje de población indígena de 3.91 %; es importante destacar que existe un 38.27 % de viviendas con excusado o sanitario. En las Figuras 1 y 2 se observa que la localidad de Milcahuales se encuentra ubicada a 26.8 kilómetros de Álamo Temapache (localidad con mayor tasa de población del municipio de Álamo Temapache, Veracruz) a una altura de 97 metros sobre el nivel del mar, con una altitud de 21.154444 y longitud

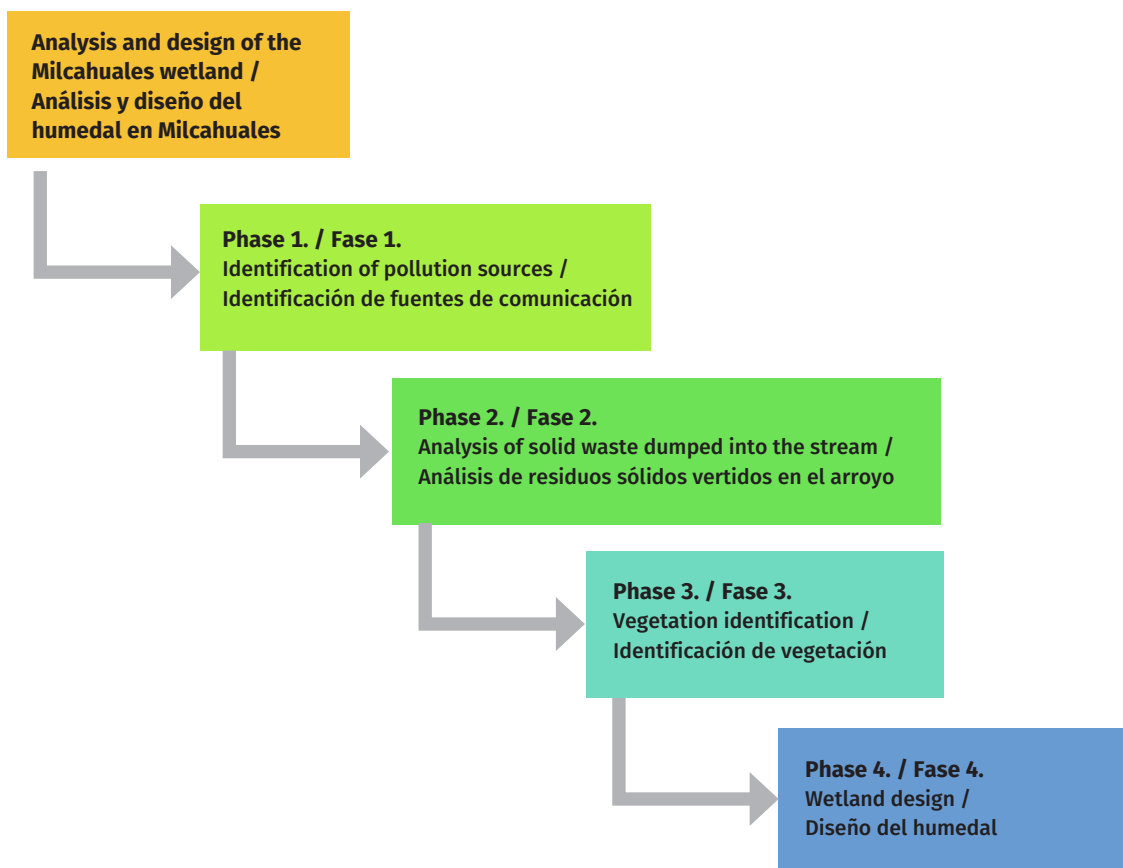


Figure 3. Methodology.
Figura 3. Metodología.

Source: Prepared by the authors.
Fuente: Elaboración propia.

ject. Through this process, information was gathered on human activities that could be contributing to the degradation of the aquatic environment. The interviews elicited community perceptions and specific knowledge about daily practices, industrial activities, and waste disposal patterns. This approach also identifies less obvious practices that could have significant impacts on water quality.

It is important to note that although direct physicochemical characterization of pollutants was not performed at this stage, the information gathered from local experts provides a solid basis for inferring the types of pollutants present. According to Vymazal (2014), local knowledge and community practices are reliable indicators of the types of pollutants that can be expected in a waterbody.

However, we recognize that a complete physicochemical characterization would have provided more accurate data on the nature and concentration of the pollutants. The decision not to conduct this characterization was based primarily on logistical and budgetary constraints. However, for future studies or for the actual implementation of the wetland, a complete physicochemical analysis of the waters of the Tántala Stream is recommended.

Phase 2: Analysis of solid waste dumped into the stream

A tour of the three access points to the Tántala Stream used by the population of Milcahuales was conducted. During this field research process, observation records were made to identify dumping patterns and assess the presence of waste in the aquatic environment. The procedure included planning the route, recording locations using GPS coordinates, making visual observations to identify possible sources of pollution, describing the types of waste visible, and taking photographs.

Waste classification was carried out according to the parameters established in Article 18 of the General Law for the Prevention and Integrated Management of Waste (LGPGIR) (Diario Oficial de la Federación, 2007), which makes it possible to discern between organic, inorganic, hazardous and other wastes, facilitating a more specific analysis of the pollutant load present in the stream.

Although this phase does not include a direct chemical analysis of the waste, the visual classification provided valuable information on the types of pollutants present. According to a study by Zhang et al.

de -97.699444. En el sistema DMS la latitud es 210916 y la longitud es -974158.

Enfoque metodológico

Este estudio propone una metodología integral de cuatro fases fundamentales para el análisis y diseño de un humedal artificial en la localidad de Milcahuales. Esta metodología holística aborda de manera sostenible la mitigación de los impactos ambientales negativos en el entorno acuático de la zona (Figura 3).

Fase 1: Fuentes de contaminación

Se llevaron a cabo entrevistas a 15 personas expertas en el tema. A través de este proceso, se recopiló información sobre las actividades humanas que podrían estar contribuyendo a la degradación del entorno acuático. Las entrevistas permitieron obtener percepciones comunitarias y conocimientos específicos sobre prácticas diarias, actividades industriales y patrones de vertido de residuos. Este enfoque también identifica prácticas menos obvias que podrían tener impactos significativos en la calidad del agua.

Es importante señalar que, aunque no se realizó una caracterización fisicoquímica directa de los contaminantes en esta fase, la información recopilada de expertos locales proporciona una base sólida para inferir los tipos de contaminantes presentes. Según Vymazal (2014), el conocimiento local y las prácticas de la comunidad son indicadores confiables de los tipos de contaminantes que se pueden esperar en un cuerpo de agua.

Sin embargo, reconocemos que una caracterización fisicoquímica completa habría proporcionado datos más precisos sobre la naturaleza y concentración de los contaminantes. La decisión de no realizar esta caracterización se basó principalmente en limitaciones logísticas y presupuestarias. No obstante, para futuros estudios o para la implementación real del humedal, se recomienda realizar un análisis fisicoquímico completo de las aguas del arroyo Tántala.

Fase 2: Análisis de residuos sólidos vertidos en el arroyo

Se realizó un recorrido por los tres puntos de acceso al arroyo Tántala utilizados por la población de Milcahuales. Durante este proceso de investigación de campo, se realizaron los registros de las observaciones para identificar patrones de vertido y evaluar la presencia de residuos en el entorno acuático. El procedimiento incluyó la planificación del recorrido,

(2020), visual waste identification can be correlated with certain physicochemical parameters of the water. For example, the presence of organic waste is often associated with high levels of biochemical oxygen demand (BOD) and nutrients such as nitrogen and phosphorus.

Phase 3: Vegetation identification

The various plant species present in the aquatic environment of the Milcahuales stream were identified and catalogued. The classification of species was carried out considering not only their presence, but also their ecological function. Plants with filtering properties and the ability to absorb pollutants were identified, with the aim of understanding their role in improving water quality in the wetland.

The feasibility of reintroducing key species that could strengthen the ecosystem's self-purification ability was assessed. This phase allowed obtaining detailed knowledge of the vegetation present and its specific characteristics, which is essential for the optimal design of the constructed wetland, taking advantage of the natural capabilities of the plants for water purification and stabilization of the aquatic ecosystem.

It should be noted that although a physicochemical analysis of the water was not performed, the presence of certain plant species can be an indirect indicator of water quality and the types of pollutants present. According to Rezanía et al. (2019), some macrophyte species are bioindicators of certain pollutants. For example, the abundant presence of duckweed (*Lemna* spp.) often indicates high levels of nutrients, while certain species of rushes (*Juncus* spp.) can tolerate and accumulate heavy metals.

In future stages of the project or in similar studies, it is recommended that these phases be supplemented with a complete physicochemical analysis of the stream water and sediments. This would provide a more robust database for the design of the constructed wetland and allow for a better selection of the most suitable plant species for remediation of the specific pollutant present in the Tantala Stream.

Phase 4. Wetland design

4.1. Evaluation and selection of system type

Based on the specific characteristics of the site and the pollutants identified in the previous phases, a Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetland (HS-

el registro de ubicaciones mediante coordenadas GPS, observaciones visuales para identificar posibles fuentes de contaminación, la descripción de los tipos de residuos visibles y la toma de fotografías.

La clasificación de los residuos se realizó de acuerdo con los parámetros establecidos en el artículo 18 de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR) (Diario Oficial de la Federación, 2007), lo que permite discernir entre residuos orgánicos, inorgánicos, peligrosos y otros, facilitando un análisis más específico de la carga contaminante presente en el arroyo.

Aunque esta fase no incluye un análisis químico directo de los residuos, la clasificación visual proporcionó información valiosa sobre los tipos de contaminantes presentes. Según un estudio realizado por Zhang et al. (2020), la identificación visual de residuos puede correlacionarse con ciertos parámetros fisicoquímicos del agua. Por ejemplo, la presencia de residuos orgánicos suele asociarse con altos niveles de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y nutrientes como nitrógeno y fósforo.

Fase 3: Identificación de vegetación

Se identificaron y catalogaron las diversas especies vegetales presentes en el entorno acuático del arroyo de Milcahuales. La clasificación de especies se realizó considerando no solo su presencia, sino también su función ecológica. Se identifican plantas con propiedades filtrantes y capacidad de absorción de contaminantes, con el objetivo de comprender su papel en la mejora de la calidad del agua en el humedal.

Se evaluó la viabilidad de reintroducir especies clave que pudieran fortalecer la capacidad de autodepuración del ecosistema. Esta fase permitió obtener un conocimiento detallado de la vegetación presente y sus características específicas, lo cual es fundamental para el diseño óptimo del humedal artificial, aprovechando las capacidades naturales de las plantas para la purificación del agua y la estabilización del ecosistema acuático.

Cabe destacar que, aunque no se realizó un análisis fisicoquímico del agua, la presencia de ciertas especies de plantas puede ser un indicador indirecto de dicha calidad y los tipos de contaminantes presentes. Según Rezanía et al. (2019), algunas especies de macrófitas son bioindicadores de ciertos contaminantes. Por ejemplo, la presencia abundante de lentejas de agua (*Lemna* spp.) suele indicar altos niveles de nutrientes,

FCW) system has been selected. This choice is based on the following advantages:

1. Prevents bad odors and the proliferation of harmful fauna.
2. Minimizes direct exposure to wastewater.
3. Requires relatively simple maintenance.
4. Offers high efficiency in the removal of organic pollutants and nutrients.

4.2. Characterization of the influent.

Although a direct physicochemical characterization was not performed due to budgetary constraints, the following parameters were estimated based on previous studies of similar streams in the region (Pérez-Castresana et al., 2018):

- Average flow: 50 m³·day⁻¹
- BOD₅: 200 mg·L⁻¹
- TSS: 150 mg·L⁻¹
- Total nitrogen: 40 mg·L⁻¹
- Total phosphorus: 8 mg·L⁻¹

4.3 Hydraulic design of the wetland.

The following formulas and considerations were used for the hydraulic design of the wetland:

1. Calculation of the wetland surface area:

$$As = Q * (\ln Ci - \ln Ce) / (Kt * d * n)$$

Where:

As: Surface area of the wetland (m²)

Q: Average daily flow (m³·day⁻¹)

Ci: Influent BOD₅ concentration (mg·L⁻¹)

Ce: Effluent BOD₅ concentration (mg·L⁻¹)

Kt: Temperature-dependent first-order reaction constant (d⁻¹)

d: Wetland Depth (m)

n: Porosity of the filter medium

2. Hydraulic retention time:

$$(TRH): TRH = (L * W * d * n) / Q$$

Where:

L: Wetland length (m)

W: Wetland width (m)

3. Surface hydraulic load:

$$(CHS): CHS = Q / As$$

mientras que ciertas especies de juncos (*Juncus* spp.) pueden tolerar y acumular metales pesados.

En futuras etapas del proyecto o en estudios similares, se recomienda complementar estas fases con un análisis fisicoquímico completo del agua y los sedimentos del arroyo. Esto proporcionaría una base de datos más robusta para el diseño del humedal artificial y permitiría una selección más precisa de las especies vegetales más adecuadas para la remediación de los contaminantes específicos presentes en el arroyo Tántala.

Fase 4. Diseño del humedal

4.1. Evaluación y selección del tipo de sistema

Con base en las características específicas del sitio y los contaminantes identificados en las fases anteriores, se ha seleccionado un sistema de Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal (HAFSH). Esta elección se fundamenta en las siguientes ventajas:

1. Evita malos olores y proliferación de fauna nociva.
2. Minimiza la exposición directa a aguas residuales.
3. Requiere un mantenimiento relativamente sencillo.
4. Ofrece una alta eficiencia en la remoción de contaminantes orgánicos y nutrientes.

4.2. Caracterización del afluente.

Aunque no se realizó una caracterización fisicoquímica directa debido a limitaciones presupuestarias, se estimaron los siguientes parámetros basados en estudios previos de arroyos similares en la región (Pérez-Castresana et al., 2018):

- Caudal promedio: 50 m³·día⁻¹
- DBO₅: 200 mg·L⁻¹
- SST: 150 mg·L⁻¹
- Nitrógeno Total: 40 mg·L⁻¹
- Fósforo Total: 8 mg·L⁻¹

4.3. Diseño hidráulico del humedal.

Para el diseño hidráulico del humedal, se utilizaron las siguientes fórmulas y consideraciones:

1. Cálculo del área superficial del humedal:

$$As = Q * (\ln Ci - \ln Ce) / (Kt * d * n)$$

4. Wetland length/width ratio:

A ratio of 3:1 to 5:1 is recommended to ensure adequate flow and avoid hydraulic short circuits.

4.4. Filter media design.

A filter layer system was designed consisting of:

1. Upper level: Fine gravel (8-16 mm)
2. Intermediate layer: Medium gravel (16-32 mm)
3. Lower layer: Coarse gravel (32-64 mm)

The total depth of the filter medium was set at 0.6 m, with variable thicknesses for each layer according to the rooting needs of the selected plants.

Results and discussion

Phase 1: Pollution sources. The main pollution sources were identified based on interviews with 15 experts on the stream in the community of Milcahuales. It is important to note that this information is based on the perceptions and knowledge of the interviewees, and not on direct physicochemical analysis. The pollution sources identified are:

1. Solid waste: including plastics, tires and glass, among others.
2. Domestic wastewater discharges: potentially containing organic matter, detergents and nutrients.
3. Possible industrial discharges: although mentioned, a more detailed study would be required to confirm their presence and composition.
4. Lack of adequate waste management in the area.

The identification of pollution sources, including solid waste, domestic wastewater discharges and possible industrial discharges, is consistent with previous studies conducted in the region. Espinoza-Tenorio et al. (2020) reported solid waste and wastewater pollution problems in several rivers and streams in Veracruz. On the other hand, Pérez-Flores et al. (2019) identified the presence of organic and inorganic pollutants in the Tuxpan River, which shares similar characteristics with the Tantala Stream.

These findings suggest that the design of the constructed wetland should consider the capacity to handle both solid waste and wastewater pollution, which is why Maniquiz-Redillas et al. (2021) point out

Donde:

As: Área superficial del humedal (m²)
 Q: Caudal medio diario (m³·día⁻¹)
 Ci: Concentración de DBO₅ del afluente (mg·L⁻¹)
 Ce: Concentración de DBO₅ del efluente (mg·L⁻¹)
 Kt: Constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura (d⁻¹)
 d: Profundidad del humedal (m)
 n: Porosidad del medio filtrante

2. Tiempo de retención hidráulica:

(TRH): $TRH = (L * W * d * n) / Q$

Donde:

L: Longitud del humedal (m)
 W: Ancho del humedal (m)

3. Carga hidráulica superficial:

(CHS): $CHS = Q / As$

4. Relación largo/ancho del humedal:

Se recomienda una relación de 3:1 a 5:1 para asegurar un flujo adecuado y evitar cortocircuitos hidráulicos.

4.4. Diseño del medio filtrante.

Se diseñó un sistema de capas filtrantes compuesto por:

1. Capa superior: Grava fina (8-16 mm)
2. Capa intermedia: Grava media (16-32 mm)
3. Capa inferior: Grava gruesa (32-64 mm)

La profundidad total del medio filtrante se estableció en 0.6 m, con espesores variables para cada capa según las necesidades de enraizamiento de las plantas seleccionadas.

Resultados y discusión

Fase 1: Fuentes de contaminación. A partir de las entrevistas realizadas a 15 personas expertas en el arroyo de la localidad de Milcahuales, se identificaron las principales fuentes de contaminación. Es importante señalar que esta información se basa en las percepciones y conocimientos de los entrevistados, y no en el análisis fisicoquímico directo. Las fuentes de contaminación identificadas son:

1. Desechos sólidos: Incluyendo plásticos, llantas, vidrio, entre otros.

that adequate pretreatment is crucial to ensure the effectiveness of water treatment systems, including constructed wetlands, by removing pollutants such as solid waste and grease that can clog the system and degrade its performance. However, it is crucial to note that, for optimal wetland design, detailed physicochemical analyses of the stream water would be necessary to accurately determine the types and levels of pollutants present.

The interviewees' perception of the presence of organic matter, fats, grease, oils, nitrogen, and phosphorus in the discharges, while valuable, must be corroborated by laboratory analysis before being used as a basis for wetland design. This limitation in the available data underscores the importance of supplementing local knowledge with rigorous scientific studies in future projects of this type.

Phase 2. Waste identification. A cartographic demarcation of the study area was performed using INEGI's (2020) Hydrographic Basin Water Flow Simulator (SIATL), which made it possible to visualize the Tantala Stream channel as it passes through Milcahuales (Figure 4). This mapping is crucial to understand the dynamics of water flow and possible pollution accumulation points, which will directly influence the location and design of the constructed wetland. López-Hernández et al. (2017) highlight the importance of multi-scale

2. Descargas de aguas residuales domésticas: Potencialmente conteniendo materia orgánica, detergentes y nutrientes.
3. Posibles descargas industriales: Aunque se mencionaron, se requeriría un estudio más detallado para confirmar su presencia y composición.
4. Falta de gestión adecuada de residuos en la zona.

La identificación de las fuentes de contaminación, incluyendo desechos sólidos, descargas de aguas residuales domésticas y posibles descargas industriales, es consistente con estudios previos realizados en la región. Espinoza-Tenorio et al. (2020) reportaron problemas de contaminación por desechos sólidos y aguas residuales en varios ríos y arroyos de Veracruz. Por otro lado, Pérez-Flores et al. (2019) identificaron la presencia de contaminantes orgánicos e inorgánicos en el río Tuxpan, que comparte características similares con el arroyo Tántala.

Estos hallazgos sugieren que el diseño del humedal artificial deberá considerar la capacidad de manejar tanto contaminación por residuos sólidos como por aguas residuales, por lo que Maniquiz-Redillas et al. (2021), señalan que un adecuado pretratamiento es crucial para garantizar la eficacia de los sistemas de tratamiento de aguas, incluyendo humedales artificia-

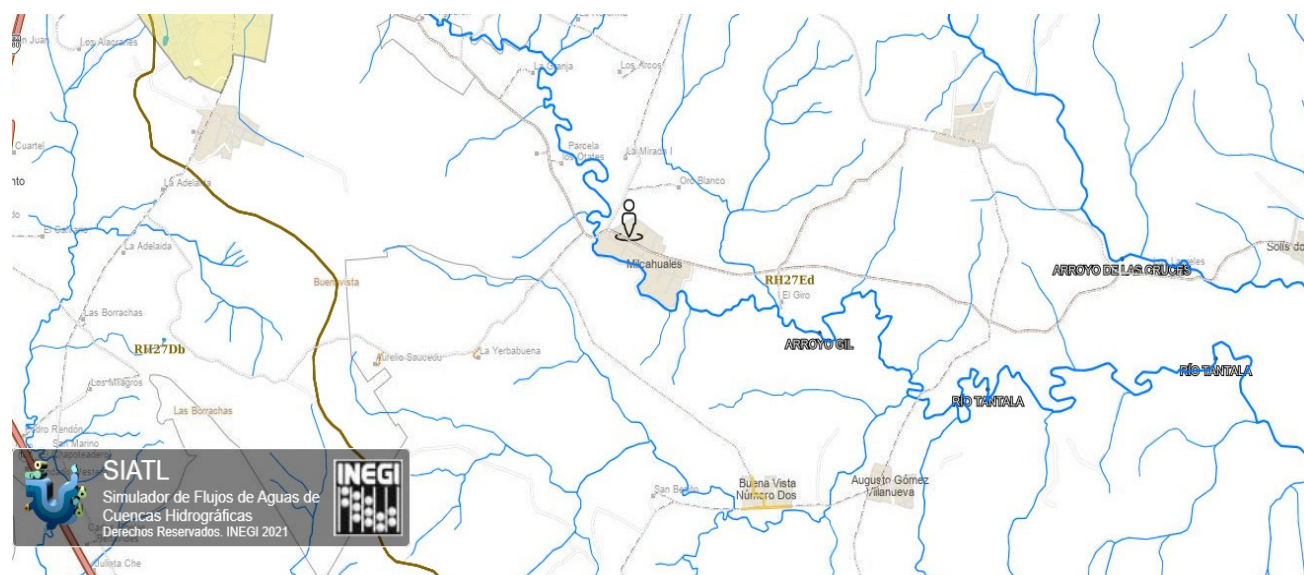


Figure 4. Map of the Tántala Stream at the height of Milcahuales.

Figura 4. Mapa del Arroyo Tántala a la altura de Milcahuales.

Source: (SIATL, 2021).

Fuente: (SIATL, 2021).

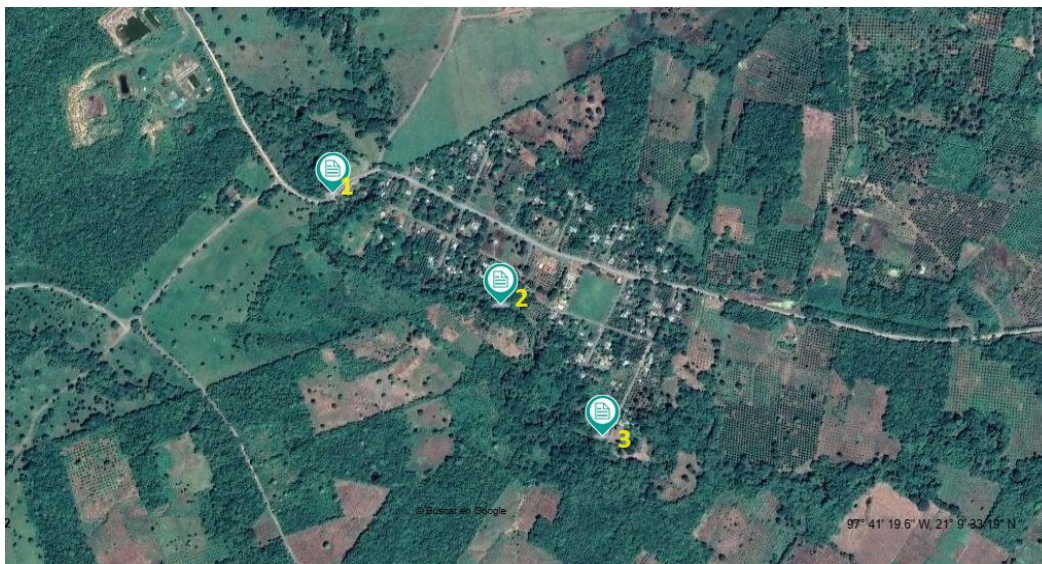


Figure 5. Population access points to the stream.
Figura 5. Puntos de acceso de la población al arroyo.

Fuente: Mapa Digital de INEGI, 2023
 Source: INEGI Digital Map, 2023

analysis, including mapping, to correlate water quality with land uses and understand pollution patterns in watersheds, which is essential for the design of solutions such as constructed wetlands.

During the field survey, three main access points to the stream used by the local population were identified (Figure 2). This information is valuable for the design of the wetland, as these points could be considered for the location of pretreatment structures or as monitoring points once the system is implemented. Maniquiz-Redillas et al. (2021) highlight the importance of adequate pretreatment, such as grids and desanders, to ensure the effectiveness and longevity of water treatment systems, such as constructed wetlands. On the other hand, Gorito et al. (2023) emphasize the need to strategically monitor effluent receiving water bodies, including key sampling points, to assess the performance of the implemented remediation solutions.

The identified waste present at the three points is shown in Table 1.

Waste classification

The waste identified at the three access points was classified according to its visible characteristics, following the categories established by the General Law for the Prevention and Integrated Management of Waste (LGPGIR) (Diario Oficial de la Federación, 2007).

les, al remover contaminantes como residuos sólidos y grasas que pueden obstruir y degradar el desempeño del sistema. Sin embargo, es crucial señalar que, para un diseño óptimo del humedal, sería necesario realizar análisis fisicoquímicos detallados de las aguas del arroyo para determinar con precisión los tipos y niveles de contaminantes presentes.

La percepción de los entrevistados sobre la presencia de materia orgánica, grasas, aceites, nitrógeno y fósforo en las descargas, aunque valiosa, debe ser corroborada mediante análisis de laboratorio antes de ser utilizada como base para el diseño del humedal. Esta limitación en los datos disponibles subraya la importancia de complementar el conocimiento local con estudios científicos rigurosos en futuros proyectos de este tipo.

Fase 2. Identificación de residuos. Se realizó una demarcación cartográfica del área de estudio utilizando el Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL) del INEGI (2020), lo que permitió visualizar el cauce del arroyo Tántala a su paso por Milchuales (Figura 4). Este mapeo es crucial para entender la dinámica del flujo de agua y los posibles puntos de acumulación de contaminantes, lo que influirá directamente en la ubicación y diseño del humedal artificial. López-Hernández et al. (2017) resaltan la importancia del análisis multiescalar, incluyendo el mapeo, para correlacionar la calidad del agua con los usos de suelo y comprender los patrones de contaminación en cuen-

Table 1. Identification of waste at the three main access points in Milcahuales.**Cuadro 1. Identificación de residuos en los tres puntos de acceso principales en Milcahuales.**

Access point / Punto de acceso	Identified waste / Residuos identificados	Figure / Figura
Entrance to the community of Milcahuales / Entrada a la localidad de Milcahuales	Blown plastic, PET, Styrofoam, glass, tires, footwear, tele-visions, tree branches / Plástico, soplado, PET, unicel, vidrio, llantas, calzado, televisiones, ramas de árboles	
Street on one side of the elementary school / Calle a un costado de la escuela primaria	PET, plastic bags, blown plastic and tree branches / PET, bolsas de plástico, plástico soplado y ramas de árboles	
End of the community / Final de la comunidad	Tires, plastic bags and PET / llantas, bolsas de plástico y PET	

Source: Prepared by the authors /
Fuente: Elaboración propia.

Table 2. Classification of waste identified in the Tántala Stream in Milcahuales.
Cuadro 2. Clasificación de residuos identificados en el arroyo Tántala de Milcahuales.

Waste / Residuo	Type of waste / Tipo de residuo
Blown plastic / Plástico soplado	Inorganic / Inorgánico
Plastic bags / Bolsas de plástico	Inorganic / Inorgánico
Pet	Inorganic / Inorgánico
Styrofoam / Unicel	Inorganic / Inorgánico
Glass / Vidrio	Inorganic / Inorgánico
Tires / Llantas	Special handling / De manejo especial
Footwear / Calzado	Inorganic / Inorgánico
Televisions / Televisiones	Special handling / De manejo especial
Tree branches / Ramas de árboles	Organic / Orgánico

Source: Cruz Hernández, 2024.

Fuente: Cruz Hernández, 2024.

The resulting classification is presented in Table 2.

This classification is relevant for the design of the constructed wetland for the following reasons:

1. Inorganic waste (plastics, glass, etc.): indicates the need to implement an efficient pretreatment system for the removal of solids before they enter the wetland. This could include screens and sediment traps.
2. Organic waste (tree branches): suggests an organic load that the wetland should be able to process. This will influence the dimensioning of the system and the selection of plant species with a high nutrient uptake capacity.
3. Special handling waste (tires, televisions): indicates the need for a waste management program in parallel with the implementation of the wetland, to prevent these materials from reaching the treatment system.

Identifying this type of waste helps anticipate the challenges that the constructed wetland will face. For example, the presence of plastics and other floating materials may require the incorporation of physical barriers or retention systems at the wetland inlet to prevent clogging and maintain treatment efficiency. Vymazal (2018) notes that the accumulation of solids in constructed wetlands, including floating materials, can lead to clogging of the system and significantly reduce its removal efficiency.

It is important to note that while the General Law for the Prevention and Integrated Management of Waste (LPGIR) provides a legal framework for waste classi-

cas hidrográficas, lo cual es esencial para el diseño de soluciones como humedales artificiales.

Durante el recorrido de campo, se identificaron tres puntos principales de acceso al arroyo utilizados por la población local (Figura 2). Esta información es valiosa para el diseño del humedal, ya que estos puntos podrían ser considerados para la ubicación de estructuras de pretratamiento o como puntos de monitoreo una vez implementado el sistema. Maniquiz-Redillas et al. (2021) resaltan la importancia de un adecuado pretratamiento, como rejillas y desarenadores, para garantizar la eficacia y longevidad de los sistemas de tratamiento de aguas, como los humedales artificiales. Por otro lado, Gorito et al. (2023) enfatizan la necesidad de monitorear estratégicamente los cuerpos de agua receptores de efluentes, incluyendo puntos de muestreo clave, para evaluar el desempeño de las soluciones de remediación implementadas.

Los residuos identificados presentes en los tres puntos se muestran en el Cuadro 1.

Clasificación de residuos

Los residuos identificados en los tres puntos de acceso se clasificaron según sus características visibles, siguiendo las categorías establecidas por la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LPGIR) (Diario Oficial de la Federación, 2007). La clasificación resultante se presenta en el Cuadro 2.

Esta clasificación es relevante para el diseño del humedal artificial por las siguientes razones:

1. Residuos inorgánicos (plásticos, vidrio, etc.): Indican la necesidad de implementar un sistema

fication, its direct application in wetland design is limited. However, this classification helps to better understand the nature of the pollutants that the wetland will need to treat, and the additional measures that might be necessary to ensure its optimal functioning. Masi et al. (2018) state that while regulatory and waste classification frameworks are important, the design of constructed wetlands should be tailored to the specific conditions and needs of the implementation site, transcending general classifications. Likewise, Lutterbeck et al. (2017) emphasize that wetland performance depends on several factors beyond simple waste characterization, such as climatic conditions, system configuration and plant species selected.

In future stages of the project, it would be advisable to conduct a quantitative analysis of the waste, including its generation rate and seasonal variability. This would allow for a more accurate design of the wetland and associated pretreatment structures. Hijosa-Valsero et al. (2011) point out that a thorough assessment of influent composition and loads is crucial to optimize the design and operation of constructed wetlands.

In addition, it is essential to develop environmental education and waste management strategies in the Milcahual community to reduce the amount of waste reaching the stream. This would not only improve the effectiveness of the constructed wetland once implemented, but also contribute to the long-term sustainability of the project and the overall health of the aquatic ecosystem. Britto et al. (2022) emphasize the importance of community education and participation programs as an essential complement to technical remediation solutions, as they allow addressing the underlying causes of pollution. Likewise, Masi et al. (2018) note that community integration and the adoption of circular economy practices are essential to ensure the long-term sustainability of constructed wetlands.

Phase 3. Vegetation identification. To characterize the vegetation present in the stream, a survey was conducted with the aim of identifying the different plant strata in the area. The vegetation identified in the Tantala Stream, dominated by the lime fern (*Pneumatopteris pennigera*) and the dwarf voodoo lily (*Typhonium blumei*), although not the species commonly recommended for constructed wetlands, may have phytoremediation capabilities that have not yet been widely studied. Rezanía et al. (2019) and Brix & Schierup (2015) have reported the potential of various aquatic plant species, including some unconventional ones, for pollutant removal in wetlands.

de pretratamiento eficiente para la remoción de sólidos antes del ingreso al humedal. Esto podría incluir rejillas y trampas de sedimentos.

2. Residuos orgánicos (ramas de árboles): Sugieren una carga orgánica que el humedal deberá ser capaz de procesar. Esto influirá en el dimensionamiento del sistema y la selección de especies vegetales con alta capacidad de asimilación de nutrientes.
3. Residuos de manejo especial (llantas, televisiones): Indican la necesidad de un programa de gestión de residuos paralelo a la implementación del humedal, para prevenir que estos materiales lleguen al sistema de tratamiento.

La identificación de residuos de este tipo ayuda a anticipar los desafíos que el humedal artificial deberá enfrentar. Por ejemplo, la presencia de plásticos y otros materiales flotantes podría requerir la incorporación de barreras físicas o sistemas de retención en la entrada del humedal para prevenir obstrucciones y mantener la eficiencia del tratamiento. Vymazal (2018) señala que la acumulación de sólidos en los humedales artificiales, incluyendo materiales flotantes, puede conducir a la colmatación del sistema y reducir significativamente su eficiencia de remoción.

Es importante señalar que, si bien la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LPGIR) proporciona un marco legal para la clasificación de residuos, su aplicación directa en el diseño del humedal es limitada. Sin embargo, esta clasificación ayuda a comprender mejor la naturaleza de los contaminantes que el humedal deberá tratar, y las medidas adicionales que podrían ser necesarias para garantizar su funcionamiento óptimo. Masi et al. (2018), mencionan que, si bien los marcos regulatorios y de clasificación de residuos son importantes, el diseño de humedales artificiales debe adaptarse a las condiciones y necesidades específicas del sitio de implementación, trascendiendo las clasificaciones generales. Asimismo, Lutterbeck et al. (2017) enfatizan que el desempeño de los humedales depende de diversos factores, más allá de la simple caracterización de los residuos, como las condiciones climáticas, la configuración del sistema y las especies vegetales seleccionadas.

En futuras etapas del proyecto, sería recomendable realizar un análisis cuantitativo de los residuos, incluyendo su tasa de generación y variabilidad estacional. Esto permitiría un diseño más preciso del humedal y de las estructuras de pretratamiento asociadas. Hijo-

Vegetation characterization is crucial for the selection of suitable species for the study area, considering both their aesthetic function (ornamental) and their ability to remove pollutants (purification function). The presence of vegetation in constructed wetlands plays a fundamental role in regulating hydraulic characteristics. Plant stems distribute and reduce water velocity, favoring the sedimentation of suspended solids, decreasing erosion risks and increasing the interaction time between water and the plant surface (Mendoza Chavarría & Párraga Mendoza, 2021).

However, it is important to note that the plants identified in the study area differ significantly from the species typically recommended for vertical subsurface constructed wetlands. The species suggested for the wetland, based on the literature and not on the identified local vegetation, are:

1. Common reed (*Phragmites australis*)
2. Papyrus (*Cyperus papyrus*)
3. Common water hyacinth (*Eichhornia crassipes*)
4. Rootless duckweed (*Wolffia arrhiza*)
5. Yellow iris (*Iris pseudacorus*)
6. Lesser bulrush (*Typha angustifolia*)
7. Common rush (*Juncus effusus*)

This discrepancy between local vegetation and species recommended for the constructed wetland raises important considerations:

1. **Adaptability:** the identified local species are naturally adapted to the environmental conditions of the area, which could favor their survival and growth in the constructed wetland.

sa-Valsero et al. (2011) puntualizan que la evaluación exhaustiva de la composición y cargas de los afluentes es crucial para optimizar el diseño y operación de los humedales construidos.

Además, es fundamental desarrollar estrategias de educación ambiental y gestión de residuos en la comunidad de Milcahuales para reducir la cantidad de desechos que llegan al arroyo. Esto no solo mejoraría la eficacia del humedal artificial una vez implementado, sino que también contribuiría a la sostenibilidad a largo plazo del proyecto y a la salud general del ecosistema acuático (Britto et al., 2022) enfatizan la importancia de los programas de educación y participación comunitaria como complemento esencial a las soluciones técnicas de remediación, ya que permiten abordar las causas subyacentes de la contaminación. Asimismo, Masi et al. (2018) mencionan que la integración de la comunidad y la adopción de prácticas de economía circular son fundamentales para garantizar la sostenibilidad de los humedales artificiales a largo plazo.

Fase 3. Identificación de la vegetación. Para la caracterización de la vegetación presente en el arroyo, se realizó un recorrido con el objetivo de identificar los diferentes estratos vegetales en el área. La vegetación identificada en el arroyo Tántala, predominada por el helecho de cal (*Pneumatopteris pennigera*) y la cala negra (*Typhonium blumei*), si bien no son las especies comúnmente recomendadas para humedales artificiales, pueden tener capacidades de fitorremediación que aún no han sido ampliamente estudiadas. Rezanía et al. (2019) y Brix & Schierup (2015), han reportado el potencial de diversas especies de plantas acuáticas,

Table 3. Plant species identified around the Tántala Stream in Milcahuales.

Cuadro 3. Especies de plantas identificadas alrededor del arroyo Tántala de Milcahuales.

Scientific name /	Nombre científico	Common name / Nombre común
<i>Pneumatopteris pennigera</i>		Lime fern / Helecho de cal
<i>Typhonium blumei</i>		Dwarf voodoo lily / La cala negra
<i>Pennisetum sp</i>		Marafalfa grass / Pasto marafalfa
<i>Megathyrsus maximus</i>		Mombaza grass / Pasto mombaza
<i>Ipomoea cholulensis</i>		Bell grass / Campanilla
<i>Bambusoideae</i>		Bamboo / Bambús
<i>Xanthosoma sagittifolium</i>		Arrowleaf Elephant's ear / Oreja de elefante
<i>Cissus verticillata</i>		Princess vine / Bejuco ubí
<i>Ficus carica</i>		Fig / Higo

2. **Biodiversity:** the use of native species could contribute to the conservation of local biodiversity and provide habitats for native fauna.
3. **Treatment efficiency:** the species recommended in the literature have been widely studied for their phytoremediation capacity in constructed wetlands. However, it is possible that some of the local species also possess significant purification capabilities that have not been fully investigated.
4. **Hybrid approach:** one possible solution would be to consider a hybrid approach, combining some of the identified local species with species tested in constructed wetlands. This could optimize both adaptability and treatment efficiency.
5. **Further research:** it would be advisable to conduct specific studies on the phytoremediation capabilities of the identified local species, especially those showing a dominant presence such as lime fern (*Pneumatopteris pennigera*) and dwarf voodoo lily (*Typhonium blumei*).
6. **Pilot testing:** prior to large-scale implementation, it would be beneficial to conduct pilot testing comparing the performance of local species with species typically recommended for constructed wetlands.

Phase 4. Wetland design and description. Based on the results of the previous phases, specifically the characterization of the waste and local vegetation, it has been determined that the best option for treating the waters of the Tantala Stream in the community of Milcahuales is through a Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland (VSFCW). This choice is based on the following considerations:

1. **Efficiency in pollutant removal:** VSFCWs are highly efficient in removing organic matter, nutrients and suspended solids, which are the main pollutants identified in the previous phases.
2. **Adaptability to local conditions:** this type of wetland adapts well to the topographic and climatic characteristics of the area, as observed in field surveys.
3. **Lower risk of vector proliferation:** being a subsurface system, the risk of proliferation of mosquitoes and other vectors is reduced, which is important considering the location is close to inhabited areas.
4. **Space optimization:** VSFCWs typically require less area than surface flow wetlands, which is advan-

incluyendo algunas no convencionales, para la remoción de contaminantes en humedales.

La caracterización de la vegetación es crucial para la selección de especies adecuadas para el área de estudio, considerando tanto su función estética (ornato) como su capacidad para remover contaminantes (función depuradora). La presencia de vegetación en los humedales artificiales juega un papel fundamental en la regulación de las características hidráulicas. Los tallos de las plantas distribuyen y reducen la velocidad del agua, favoreciendo la sedimentación de sólidos en suspensión, disminuyendo los riesgos de erosión y aumentando el tiempo de interacción entre el agua y la superficie de la planta (Mendoza Chavarría & Párraga Mendoza, 2021).

Sin embargo, es importante notar que las plantas identificadas en el área de estudio difieren significativamente de las especies típicamente recomendadas para humedales artificiales subsuperficiales verticales. Las especies sugeridas para el humedal, basadas en la literatura y no en la vegetación local identificada, son:

1. Carrizo (*Phragmites australis*)
2. Papiro (*Cyperus papyrus*)
3. Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*)
4. Lenteja de agua (*Wolffia arrhiza*)
5. Lirio amarillo (*Iris pseudacorus*)
6. Totorá (*Typha angustifolia*)
7. Junco común (*Juncus effusus*)

Esta discrepancia entre la vegetación local y las especies recomendadas para el humedal artificial plantea importantes consideraciones:

1. **Adaptabilidad:** Las especies locales identificadas están naturalmente adaptadas a las condiciones ambientales del área, lo que podría favorecer su supervivencia y crecimiento en el humedal artificial.
2. **Biodiversidad:** El uso de especies nativas podría contribuir a la conservación de la biodiversidad local y proporcionar hábitats para la fauna autóctona.
3. **Eficiencia de tratamiento:** Las especies recomendadas en la literatura han sido ampliamente estudiadas por su capacidad de fitorremediación en humedales artificiales. Sin embargo, es posible que algunas de las especies locales también posean capacidades depuradoras significativas que no han sido completamente investigadas.
4. **Enfoque híbrido:** Una posible solución sería considerar un enfoque híbrido, combinando algunas de las especies locales identificadas con especies

tageous given the spatial constraints identified in the study area.

The design of a Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland (VSFCW) is justified for several reasons. Previous studies have demonstrated the high efficiency of this type of wetland in removing common pollutants in wastewater, such as organic matter, nutrients, and suspended solids (Vymazal, 2010; Wu et al., 2015; Ilyas & Masih, 2017). In addition, VSFCWs are well suited to the topographic and climatic conditions of the region, as noted by Langergraber et al. (2020) and Zhang et al. (2020) in their reviews on the application of constructed wetlands in tropical and subtropical climates.

The VSFCW design proposed in this study is based on experiences documented in the literature. Several authors have reported the implementation and effectiveness of this type of wetland in wastewater treatment in different contexts. For example, Hijosa-Valsero et al. (2011, 2016) evaluated the performance of vertical subsurface wetlands for the removal of emerging pollutants in small communities. Likewise, Sehar & Nasser (2019) reviewed the application of constructed wetlands, including VSFCW, for the treatment of food industry wastewater.

Wetland dimensioning

For wetland dimensioning, the data estimated in the influent characterization phase were used:

- Average flow: 50 m³·day⁻¹
- BOD₅: 200 mg·L⁻¹
- TSS: 150 mg·L⁻¹
- Total nitrogen: 40 mg·L⁻¹
- Total phosphorus: 8 mg·L⁻¹

Using the design formula for vertical flow wetlands (Reed et al., 1995):

Assuming a removal efficiency of 90 % for BOD₅, a depth of 0.8 m and a porosity of 0.35, a required surface area of approximately 250 m² was obtained (Figure 6).

Wetland configuration

The wetland was designed with the following features:

a) Distribution system: Water from the stream will be conveyed through a lined inlet channel into a distribution chamber. From there, a perforated pipe system will be used to distribute the water evenly over the wetland surface. According to Langergraber et al. (2020), this type of distribution system helps to ensure

probadas en humedales artificiales. Esto podría optimizar tanto la adaptabilidad como la eficiencia del tratamiento.

5. Investigación adicional: Sería recomendable realizar estudios específicos sobre las capacidades de fitorremediación de las especies locales identificadas, especialmente aquellas que muestran una presencia dominante como el helecho de cal (*Pneumatopteris pennigera*) y la cala negra (*Typhonium blumei*).

6. Pruebas piloto: Antes de la implementación a gran escala, sería beneficioso realizar pruebas piloto comparando el rendimiento de las especies locales con las especies típicamente recomendadas para humedales artificiales.

Fase 4. Diseño y descripción del humedal. Basándose en los resultados de las fases anteriores, específicamente la caracterización de los residuos y la vegetación local se ha determinado para el tratamiento de las aguas del arroyo Tántala en la localidad de Milcahual, sea a través de un Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Vertical (HAFSV). Esta elección se fundamenta en las siguientes consideraciones:

1. Eficiencia en la remoción de contaminantes: Los HAFSV son altamente eficientes en la eliminación de materia orgánica, nutrientes y sólidos suspendidos, que son los principales contaminantes identificados en las fases anteriores.

2. Adaptabilidad a las condiciones locales: Este tipo de humedal se adapta bien a las características topográficas y climáticas de la zona, según lo observado en los recorridos de campo.

3. Menor riesgo de proliferación de vectores: Al ser un sistema subsuperficial, se reduce el riesgo de proliferación de mosquitos y otros vectores, lo cual es importante considerando la ubicación cercana a las áreas habitadas.

4. Optimización del espacio: Los HAFSV suelen requerir menos superficie que los humedales de flujo superficial, lo cual es ventajoso dadas las limitaciones espaciales identificadas en el área de estudio.

El diseño de un Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Vertical (HAFSV) se justifica por varias razones. Estudios previos han demostrado la alta eficiencia de este tipo de humedales en la remoción de contaminantes comunes en aguas residuales, como materia orgánica, nutrientes y sólidos suspendidos (Vymazal,

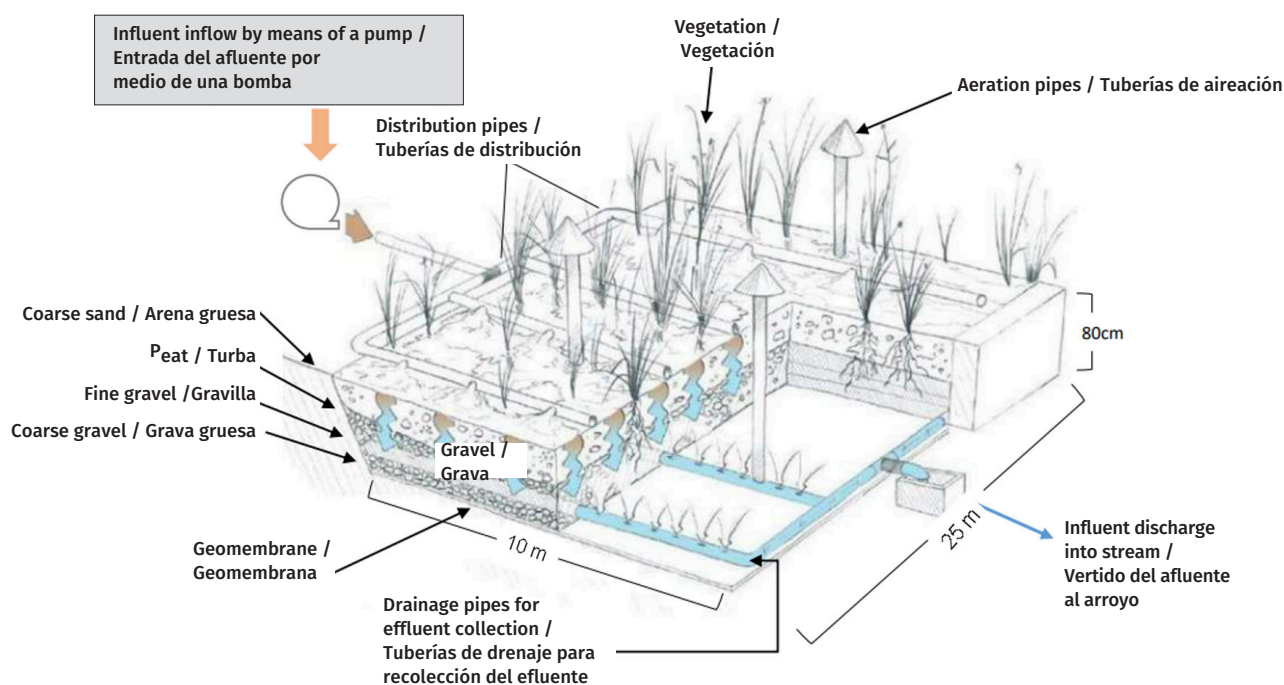


Figure 6. Design of a vertical flow constructed wetland modified to the dimensions of the Milcahuales stream, municipality of Álamo Temapache, Veracruz.

Figura 6. Diseño de un humedal artificial de flujo vertical modificado a las dimensiones del arroyo de Milcahuales, municipio de Álamo Temapache, Veracruz.

Source: Prepared by the authors.

Fuente: Elaboración propia.

homogeneous feeding of the wetland, avoiding the formation of preferential paths and ensuring efficient treatment.

b) Filter medium: A filter layer system was designed consisting of:

- Upper layer (20 cm): Coarse sand (1-4 mm)
- Intermediate layer (40 cm): Fine gravel (4-8 mm)
- Lower layer (20 cm): Coarse gravel (16-32 mm)

The design of a filter medium with layers of coarse sand, fine gravel and coarse gravel is a typical configuration for vertical subsurface flow constructed wetlands. Stefanakis et al. (2021) note that this type of filter medium layering improves pollutant removal by providing a larger contact surface area and favoring physical, chemical, and biological processes.

c) Drainage system: A system of 100 mm diameter perforated pipes, spaced every two meters, will be placed at the base of the wetland to collect treated water. Vymazal (2014) points out that this drainage system facilitates the uniform outflow of effluent and allows monitoring of wetland performance.

2010; Wu et al., 2015; Ilyas & Masih, 2017). Además, los HAFSV se adaptan bien a las condiciones topográficas y climáticas de la región, tal como lo señalan Langergraber et al. (2020) y Zhang et al. (2020) en sus revisiones sobre la aplicación de humedales construidos en climas tropicales y subtropicales.

El diseño de HAFSV propuesto en este estudio se basa en experiencias documentadas en la literatura. Varios autores han reportado la implementación y eficacia de este tipo de humedales en el tratamiento de aguas residuales en diferentes contextos. Por ejemplo, Hijo-sa-Valsero et al. (2011, 2016) evaluaron el desempeño de humedales subsuperficiales verticales para la remoción de contaminantes emergentes en pequeñas comunidades. Asimismo, Sehar & Nasser (2019) revisaron la aplicación de humedales construidos, incluyendo HAFSV, para el tratamiento de aguas residuales de la industria alimentaria.

Dimensionamiento del humedal

Para el dimensionamiento del humedal, se utilizaron los datos estimados en la fase de caracterización del afluente:

d) Waterproofing: A 1.5 mm thick HDPE geomembrane will be used to prevent the infiltration of wastewater into the soil. Langergraber et al. (2020) emphasize the importance of this impermeable barrier to isolate the treatment system and prevent soil and groundwater contamination.

e) Vegetation: Based on the evaluation of the local vegetation and the species recommended for artificial wetlands, a hybrid approach is proposed using:

- Common reed (*Phragmites australis*)
- Papyrus (*Cyperus papyrus*)
- Common rush (*Juncus effusus*)
- Lime fern (*Pneumatopteris pennigera*) - local species identified

The proposed hybrid approach, combining recommended wetland species (common reed, papyrus, rush) with identified local species (lime fern), is an innovative strategy. Brix & Schierup (2015) and Reznia et al. (2019) have highlighted the potential of various aquatic plant species, including some unconventional ones, for pollutant removal in constructed wetlands.

Pretreatment system

Considering the solid waste identified in Phase 2, a pretreatment system will be included consisting of:

1. **Coarse grate:** for the retention of large waste such as branches and large plastics.
2. **Desander:** for the removal of sands and heavy solids.
3. **Grease and oil trap:** for the retention of floating grease and oils.

Conclusions

This study addressed the design of a constructed wetland system for the treatment of polluted water from the Tantala Stream in the community of Milcahual, municipality of Alamo Temapache, Veracruz. Through a comprehensive methodological approach, the following conclusions have been reached:

1. The four-phase methodology applied in this study has proven to be effective for the collection of crucial information on the sources of pollution, the types of waste present, and the local vegetation. This holistic approach has allowed for a design more adapted to the specific site conditions.
2. The identification of pollution sources and the characterization of solid waste dumped into the stream reveal a complex problem that includes

- Caudal promedio: 50 m³·día⁻¹
- DBO₅: 200 mg·L⁻¹
- SST: 150 mg·L⁻¹
- Nitrógeno total: 40 mg·L⁻¹
- Fósforo total: 8 mg·L⁻¹

Utilizando la fórmula de diseño para humedales de flujo vertical (Reed et al., 1995):

Assumiendo una eficiencia de remoción del 90 % para DBO₅, una profundidad de 0.8 m y una porosidad de 0.35, se obtuvo un área superficial requerida de aproximadamente 250 m² (Figura 6).

Configuración del humedal

El humedal se diseñó con las siguientes características:

a) Sistema de distribución: El agua del arroyo se conducirá mediante un canal de entrada revestido hacia una cámara de distribución. Desde allí, se utilizará un sistema de tuberías perforadas para distribuir el agua uniformemente sobre la superficie del humedal. De acuerdo con Langergraber et al. (2020), este tipo de sistema de distribución ayuda a garantizar una alimentación homogénea del humedal, evitando la formación de caminos preferenciales y asegurando un tratamiento eficiente.

b) Medio filtrante: Se diseñó un sistema de capas filtrantes compuesto por:

- Capa superior (20 cm): Arena gruesa (1-4 mm)
- Capa intermedia (40 cm): Grava fina (4-8 mm)
- Capa inferior (20 cm): Grava gruesa (16-32 mm)

El diseño de un medio filtrante con capas de arena gruesa, grava fina y grava gruesa es una configuración típica para humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical. Stefanakis et al. (2021) señalan que este tipo de estratificación del medio filtrante mejora la remoción de contaminantes al proporcionar una mayor superficie de contacto y favorecer procesos físicos, químicos y biológicos.

c) Sistema de drenaje: En la base del humedal se colocará un sistema de tuberías perforadas de 100 mm de diámetro, espaciadas cada dos metros, para la recolección del agua tratada. Vymazal (2014), puntualiza que este sistema de drenaje facilita la salida uniforme del efluente y permite el monitoreo del desempeño del humedal.

d) Impermeabilización: Se utilizará una geomembrana de HDPE de 1.5 mm de espesor para evitar la infiltración del agua residual al suelo. Langergraber et al. (2020)

solid waste, domestic wastewater discharges, and possible industrial discharges. This situation underscores the urgent need to implement water treatment solutions in the area.

3. The proposed design of a Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland (VSFCW) is presented as a viable solution adapted to local conditions. This system offers significant advantages in terms of treatment efficiency, adaptability to the environment and optimization of available space.
4. The incorporation of a pretreatment system, including screens, a grit trap and a grease trap, directly responds to the types of waste identified in the study. This measure is crucial to ensure the effectiveness and longevity of the constructed wetland.
5. The proposed hybrid approach to vegetation selection, combining species recommended for constructed wetlands with identified local species, represents a potential innovation in the design of these systems. This approach could optimize both adaptability and treatment efficiency.
6. The limitation of the study in terms of the lack of detailed physicochemical analyses of the water and stream is acknowledged. For future stages of the project, it is recommended that these analyses be conducted to fine-tune the wetland design and ensure maximum efficiency.
7. The long-term success of this project will depend not only on the technical implementation of the wetland, but also on the active participation of the Milcahuales community. It is suggested that environmental education and waste management programs be developed to complement the proposed technical solution.
8. This study lays the groundwork for a pilot project that could have significant implications for wastewater management in similar rural communities in the region. The proposed methodology and design could serve as a model for future remediation projects for polluted waterbodies.

End of English version

destacan la importancia de esta barrera impermeable para aislar el sistema de tratamiento y prevenir la contaminación del suelo y aguas subterráneas.

e) Vegetación: Basándonos en la evaluación de la vegetación local y las especies recomendadas para humedales artificiales, se propone un enfoque híbrido utilizando:

- Carrizo (*Phragmites australis*)
- Papiro (*Cyperus papyrus*)
- Junco común (*Juncus effusus*)
- Helecho de cal (*Pneumatopteris pennigera*) - especie local identificada

La propuesta de un enfoque híbrido, combinando especies recomendadas para humedales (carrizo, papiro, junco) con especies locales identificadas (helecho de cal), es una estrategia innovadora. Brix & Schierup (2015) y Rezanía et al. (2019) han resaltado el potencial de diversas especies de plantas acuáticas, incluyendo algunas no convencionales, para la remoción de contaminantes en humedales construidos.

Sistema de pretratamiento

Considerando los residuos sólidos identificados en la fase 2, se incluirá un sistema de pretratamiento consistente en:

1. **Rejilla gruesa:** Para la retención de residuos de gran tamaño como ramas y plásticos grandes.
2. **Desarenador:** Para la remoción de arenas y sólidos pesados.
3. **Trampa de grasas y aceites:** Para la retención de grasas y aceites flotantes.

Conclusiones

Este estudio abordó el diseño de un sistema de humedal artificial para el tratamiento de las aguas contaminadas del arroyo Tántala en la localidad de Milcahuales, municipio de Álamo Temapache, Veracruz. A través de un enfoque metodológico integral, se han alcanzado las siguientes conclusiones:

1. La metodología de cuatro fases aplicada en este estudio ha demostrado ser efectiva para la recopilación de información crucial sobre las fuentes de contaminación, los tipos de residuos presentes y la vegetación local. Esta aproximación holística ha permitido un diseño más adaptado a las condiciones específicas del sitio.

References / Referencias

- Britto, R. M., Alves, L. G. S., Machado, A. R. T., & Lima, J. C. F. (2022). Water pollution in developing countries: Challenges and perspectives. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(15), 21725-21740.
- Brix, H., & Schierup, H. H. (2015). The use of aquatic macrophytes in water-pollution control. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 44(2), 100-111.
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2018). Inventario Nacional de Descargas de Aguas Residuales. <https://www.gob.mx/conagua/documentos/inventario-nacional-de-descargas-de-aguas-residuales>
- Cruz Hernández, Y. (2024). *Diseño de prototipo de un humedal para la recuperación del arroyo en la localidad de Milcahuales, municipio de Álamo Temapache, Ver.* (Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico Superior de Álamo Temapache).
- Diario Oficial Federación (2007). Artículo 18 de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos .
- Espinoza-Tenorio, A., Esquivel-Basaldo, D., Alcántara-Concepción, V., & Lok-Núñez, A. (2020). Contaminación de ríos y arroyos en Veracruz, México. *Revista de la Universidad Veracruzana*, 20(1), 35-46. <https://doi.org/10.25009/run.v0i0.2598>
- García-García, P. L., Ruiz-Picos, R. A., & Sedeño-Díaz, J. E. (2023). Macroinvertebrate community structure as an indicator of water quality in Veracruz rivers. *Ecological Indicators*, 146, 110046.
- Gorito, A. M., Ribeiro, A. R., Almeida, C. M. R., & Silva, A. M. T. (2023). A review on the application of constructed wetlands for microplastics removal from water. *Science of The Total Environment*, 856, 159091.
- Hijosa-Valsero, M., Matamoros, V., Martín-Villacorta, J., Bécares, E., & Bayona, J. M. (2011). Assessment of full-scale natural systems for the removal of PPCPs from wastewater in small communities. *Water Research*, 44(5), 1429-1439. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.10.032>
- Hijosa-Valsero, M., Reyes-Contreras, C., Domínguez-Espinosa, R., Bécares, E., & Bayona, J. M. (2016). Behaviour of pharmaceuticals and personal care products in constructed wetland compartments: Influent, effluent, pore water, substrate and plant roots. *Chemosphere*, 145, 508-517.
- Ilyas, H., & Masih, I. (2017). The performance of the intensified constructed wetlands for organic matter and nitrogen removal: A review. *Journal of Environmental Management*, 198, 372-383.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). Censo de Población y Vivienda 2020, Tabulados básicos por localidad (Milcahuales). <https://www.inegi.org.mx/app/tabulados/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2023). Mapa Digital de México. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/>
- Langergraber, G., Dotro, G., Nivala, J., Rizzo, A., & Stein, O. R. (2020). *Wetland Technology: Practical Information on the Design and Application of Treatment Wetlands*. IWA Publishing.
- Li, Y., Zhu, G., Ng, W. J., & Tan, S. K. (2022). Emerging contaminants removal by constructed wetlands: A critical review. *Science of The Total Environment*, 805, 150355.
2. La identificación de las fuentes de contaminación y la caracterización de los residuos sólidos vertidos en el arroyo revelan una problemática compleja que incluye desechos sólidos, descargas de aguas residuales domésticas y posibles descargas industriales. Esta situación subraya la urgente necesidad de implementar soluciones de tratamiento de agua en la zona.
 3. El diseño propuesto de un Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Vertical (HAFSV) se presenta como una solución viable y adaptada a las condiciones locales. Este sistema ofrece ventajas significativas en términos de eficiencia de tratamiento, adaptabilidad al entorno y optimización del espacio disponible.
 4. La incorporación de un sistema de pretratamiento, que incluye rejillas, desarenador y trampa de grasas, responde directamente a los tipos de residuos identificados en el estudio. Esta medida es crucial para garantizar la eficacia y longevidad del humedal artificial.
 5. La propuesta de un enfoque híbrido en la selección de vegetación, combinando especies recomendadas para humedales artificiales con especies locales identificadas, representa una innovación potencial en el diseño de estos sistemas. Este enfoque podría optimizar tanto la adaptabilidad como la eficiencia del tratamiento.
 6. Se reconoce la limitación del estudio en cuanto a la falta de análisis fisicoquímicos detallados del agua y del arroyo. Para futuras etapas del proyecto, se recomienda realizar estos análisis para afinar el diseño del humedal y asegurar su máxima eficacia.
 7. El éxito a largo plazo de este proyecto dependerá no solo de la implementación técnica del humedal, sino también de la participación activa de la comunidad de Milcahuales. Se sugiere desarrollar programas de educación ambiental y gestión de residuos para complementar la solución técnica propuesta.
 8. Este estudio sienta las bases para un proyecto piloto que podría tener implicaciones significativas para la gestión de aguas residuales en comunidades rurales similares en la región. La metodología y el diseño propuestos podrían servir como modelo para futuros proyectos de remediación de cuerpos de agua contaminados.

Fin de la versión en español

- Liu, L., Zhao, X., Zhao, N., Shen, Z., Wang, M., Guo, Y., & Xu, Y. (2021). Effect of aeration modes on pollutant removal and microorganism distribution in constructed wetland mesocosms treating rural household wastewater. *Journal of Environmental Sciences*, 99, 249-259.
- López-Hernández, M., Ramos-Espinosa, M. G., & Carranza-Fraser, J. (2017). Multi-temporal analysis of water quality and its relationship to land use and land cover in a coastal watershed of Veracruz, Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(4), 200.
- López-Ramírez, M. A., Sánchez-González, A., & Rodríguez-Castro, V. (2024). Microplastic pollution in Mexican rivers: A five-year assessment and implications for aquatic ecosystems. *Water Research*, 215, 119234.
- Lutterbeck, C. A., Kist, L. T., Lopez, D. R., Zerwes, F. V., & Machado, Ê. L. (2017). Life cycle assessment of integrated wastewater treatment systems with constructed wetlands in rural areas. *Journal of Cleaner Production*, 148, 527-536.
- Maniquiz-Redillas, M. C., Geronimo, F. K. F., & Kim, L. H. (2021). Investigation on the effectiveness of pretreatment in stormwater management technologies: A review. *Journal of Environmental Management*, 278, 111554.
- Martínez-Austria, P. F., Bandala, E. R., & Patiño-Gómez, C. (2021). Temperature and precipitation trends in Mexico and their potential impacts on water availability. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(9), 4669.
- Martínez-Tavera, E., Rodríguez-Espinosa, P. F., Shruti, V. C., Sujitha, S. B., Morales-García, S. S., & Muñoz-Sevilla, N. P. (2018). Monitoring the seasonal dynamics of physicochemical parameters from Atoyac River basin (Puebla), Central Mexico: multivariate approach. *Environment, Development and Sustainability*, 20(2), 511-532.
- Masi, F., Rizzo, A., & Regelsberger, M. (2018). The role of constructed wetlands in a new circular economy, resource oriented, and ecosystem services paradigm. *Journal of Environmental Management*, 216, 275-284.
- Mendoza Chavarría, J. F., & Párraga Mendoza, M. E. (2021). Análisis de la contaminación Ambiental por residuos sólidos en la ciudad de Guayaquil. *Revista Científica FIPCAEC (Fomento de la investigación y publicación en Ciencias Administrativas, Económicas y Contables)*, 6(1), 3-25
- Morales-Hernández, F., Guzmán-García, X., & Ortiz-Lozano, L. (2022). Increasing occurrence of harmful algal blooms in the coastal waters of Veracruz: Linkages with urban and agricultural pollution. *Harmful Algae*, 113, 102196.
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [UNESCO]. (2017). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017: Aguas Residuales, el Recurso Desaprovechado. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247647>
- Pérez-Castresana, G., Castrejón-Godínez, M. L., Ortiz-Hernández, M. L., Garibay-Orijel, C., Casas Flores, S., Folch-Mallof, J. L., & Batista García R. A. (2018). Microbiota of mining environments: Characterization and implications for potential applications. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 34(11), 169.
- Pérez-Flores, L. S., Barajas-Martínez, J. A., & García-Barrios, R. (2019). Evaluación de la contaminación en el río Tuxpan, Veracruz, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(4), 767-775.
- Ramírez-Sánchez, A., Vázquez-Leal, H., & Hernández-Martínez, L. (2024). Temporal analysis of organic pollutants in the Tántala stream: A case study in Veracruz, Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(2), 1-18.
- Reed, S. C., Crites, R. W., & Middlebrooks, E. J. (1995). *Natural Systems for Waste Management and Treatment* (2nd ed.). McGraw-Hill.
- Rezania, S., Taib, S. M., Din, M. F. M., Dahalan, F. A., & Kamyab, H. (2019). Comprehensive review on phytotechnology: Heavy metals removal by diverse aquatic plants species from wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 318, 587-599.
- Sehar, S., & Nasser, M. (2019). Wastewater treatment of food industries through constructed wetland: a review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(10), 6453-6472.
- Stefanakis, A., Akrotos, C. S., & Tsihrintzis, V. A. (2021). Vertical flow constructed wetlands: eco-engineering systems for wastewater and sludge treatment. Elsevier.
- Vymazal, J. (2010). Constructed wetlands for wastewater treatment. *Water*, 2(3), 530-549. <https://doi.org/10.3390/w2030530>
- Vymazal, J. (2014). Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: A review. *Ecological Engineering*, 73, 724-751. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.034>
- Vymazal, J. (2018). Does clogging affect long-term removal of organics and suspended solids in gravel-based horizontal subsurface flow constructed wetlands? *Chemical Engineering Journal*, 331, 663-674.
- Wang, M., Zhang, D. Q., Dong, J. W., & Tan, S. K. (2020). Application of constructed wetlands for treating agricultural runoff and agro-industrial wastewater: a review. *Hydrobiologia*, 847(2), 647-666.
- Wu, H., Zhang, J., Ngo, H. H., Guo, W., Hu, Z., Liang, S., ... & Liu, H. (2015). A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: design and operation. *Bioresource Technology*, 175, 594-601.
- Zhang, D. Q., Jinadasa, K. B. S. N., Gersberg, R. M., Liu, Y., Tan, S. K., & Ng, W. J. (2020). Application of constructed wetlands for wastewater treatment in tropical and subtropical regions (2000–2019). *Journal of Environmental Sciences*, 39, 30-43.
- Zhao, Y., Qin, X., Guo, J., & Zhang, Y. (2023). Emerging contaminants in water resources: Occurrence, impacts, and treatment challenges. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(15), 34567-34582.