



Juan Carlos
Gamboa Soto

Propuesta para la implementación de humedales
artificiales como alternativa de gestión hídrica en la
microcuenca Mesa de Ramírez, Tolimán, Querétaro

2024



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ciencias Naturales

"Propuesta para la implementación de humedales
artificiales como alternativa de gestión hídrica en la
microcuenca Mesa de Ramírez, Tolimán, Querétaro".

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener
el Grado de

Maestro en Gestión integral de Cuencas

Presenta

Juan Carlos Gamboa Soto

Dirigido por:

Dr. Juan Pablo Ramírez Herrejón

Querétaro, Qro. a 09 de septiembre de 2024

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ciencias Naturales

Maestría en Gestión Integrada de Cuencas

"Propuesta para la implementación de humedales artificiales como
alternativa de gestión hídrica en la microcuenca
Mesa de Ramírez, Tolimán, Querétaro".

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestro en Gestión Integrada de Cuencas

Presenta

Juan Carlos Gamboa Soto

Dirigido por:

Dr. Juan Pablo Ramírez Herrejón

Dr. Juan Pablo Ramírez Herrejón
Presidente

Dra. Diana Patricia García Tello
Secretario

Dr. Eduardo Luna Sánchez
Vocal

Mtro. Omar Yair Durán Rodríguez
Suplente

Dr. Juan Alfredo Hernández Guerrero
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

Fecha de aprobación por el Consejo Universitario
(septiembre, 2024) México.

1 RESUMEN

El presente estudio expone una propuesta para la implementación de humedales artificiales como una solución innovadora para la gestión hídrica en la microcuenca Mesa de Ramírez, una región caracterizada por la escasez de agua y un clima árido. El objetivo fue diseñar un sistema de humedales que no solo permita el tratamiento eficaz de aguas residuales, sino que también maximice el aprovechamiento hídrico con beneficios tanto ambientales como sociales.

La investigación comenzó con una evaluación del estado del arroyo, las condiciones de calidad del agua y las descargas domiciliarias. Los resultados revelaron una alteración de calidad del agua en la parte baja del arroyo, donde están concentradas las aguas, las cuales presentan altos niveles de contaminación por nutrientes derivados de la actividad de lavado, además meses después el arroyo se secó, debido a las sequías en la región.

En base a estos hallazgos, se desarrolló un modelo conceptual de humedal artificial adaptado a las condiciones locales, donde se propuso un sistema de tratamiento de aguas de origen gris, a una escala domiciliar con un área de 3 m² con 8 especies vegetales a elegir de la zona como el Carrizo (*Phragmites australis*) y Tule (*Typha latifolia*). Este modelo facilita el manejo y hace más conveniente el tratamiento de las aguas y aprovechamiento de la vegetación de acuerdo a las necesidades familiares.

Se definieron estrategias ambientales y sociales para garantizar la sostenibilidad del proyecto, como la integración activa de la comunidad desde la planificación hasta el mantenimiento del sistema. Se destacó la importancia de la educación y la participación comunitaria para asegurar el éxito a largo plazo del proyecto. La implementación de estos sistemas no solo mejoraría la calidad del agua y la disponibilidad de recursos hídricos, sino que también generaría beneficios económicos y sociales significativos para la comunidad local.

Palabras clave: Cuenca, Humedales artificiales, tratamiento de aguas.

ABSTRACT

This study presents a proposal for the implementation of artificial wetlands as an innovative solution for water management in the Mesa de Ramírez micro-watershed, a region characterized by water scarcity and an arid climate. The main objective was to design a wetland system that not only allows for effective wastewater treatment, but also maximizes water use with both environmental and social benefits.

The research began with an assessment of stream condition, water quality conditions, and household discharges. The results revealed an alteration of water quality in the lower part of the stream, where the water is concentrated, with high levels of nutrient contamination from washing activities, and months later the stream dried up due to droughts in the region.

Based on these findings, a conceptual model of an artificial wetland adapted to local conditions was developed, where a gray water treatment system was proposed, at a household scale with an area of 3m² with 8 plant species of the area such as Carrizo (*Phragmites australis*) and Tule (*Typha latifolia*). This model facilitates management and makes water treatment and vegetation use more convenient according to family needs.

Environmental and social strategies were defined to ensure the sustainability of the project, such as the active integration of the community from planning to maintenance of the system. The importance of education and community participation was emphasized to ensure the long-term success of the project.

The implementation of these systems would not only improve water quality and water resource availability, but would also generate significant economic and social benefits for the local community.

Key words: Artificial wetlands, watershed, water treatment.

2 DEDICATORIAS

A mi familia por haberme dado las herramientas adecuadas para seguir mi rumbo; a mi madre por ser un ejemplo de determinación y confianza, a mi padre por enseñarme el valor de la formación y perseverancia, a mis hermanos por ser un ejemplo para mí y estar siempre presentes en todo momento, a mi abuelita por sus cuidados y atenciones, a mi pareja Stephanie que ha sido mi ser incondicional en esta etapa de mi vida, a mis perritos Nala y Merlín que estuvieron siempre a mi lado en la escritura de este trabajo.

3 AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Juan Pablo Ramírez por guiar este estudio y brindarme su conocimiento, consejos tan importantes y los medios que apoyaron este estudio.

A la Dra. Diana por el apoyo y acompañamiento durante la maestría.

Al Dr. Eduardo Luna por sus aportaciones tan valiosas en las clases y en las revisiones del documento.

Al Mtro. Omar Yahir Durán por las observaciones puntuales y consejos que aportaron a este estudio.

Al Dr. Juan Alfredo por su tiempo para revisar y dar seguimiento en la estructura de esta tesis.

Al delegado Julio César Delgado por todo el apoyo brindado y todas las personas de la comunidad de Bomintzá en Tolimán que me abrieron las puertas, compartieron sus saberes y por el valioso tiempo dedicado en los talleres y recorridos.

A mis catedráticos de la maestría que brindaron las bases para la realización de este estudio y valiosas aportaciones desde su experiencia, a mis compañeros y compañeras que admiro e hicieron un grupo sólido de apoyo, confianza y amistad que sobrepasó las aulas.

A la universidad Autónoma de Querétaro, la Facultad de Ciencias Naturales y al personal administrativo de la maestría que apoyaron en los procesos y trámites.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por brindarme el apoyo económico que hicieron posible la realización de esta maestría y estudio de investigación.

A mis amigos de los colectivos de Querétaro que me permitieron tener un involucramiento genuino e inspiraron con sus valores éticos, pasión y cuidado hacia las personas y medio ambiente: Museo bajo tierra, Festival Agua que Corre, Comunidad Bosque Vivo, Casa de Vinculación Social de Carrillo, Proyecto Maleza; además de mis amigos Silvestres de las altas montañas de Veracruz.

4 ÍNDICE

1	RESUMEN	iii
2	DEDICATORIAS	v
3	AGRADECIMIENTOS	vi
4	ÍNDICE	vii
1.	INTRODUCCIÓN.....	1
	JUSTIFICACIÓN	4
2.	ANTECEDENTES.....	6
3.	OBJETIVOS.....	9
	Objetivo General.....	9
	Objetivos Específicos.....	9
	Preguntas de investigación	9
4.	MARCO CONCEPTUAL.....	10
4.1	Gestión de cuencas hidrográficas	10
4.2	Ecología de los humedales.....	12
4.3	Ingeniería ecológica	15
4.3.1	Dimensionamiento del sistema	16
4.4	Aguas residuales	17
4.4.1	Tratamiento de las aguas residuales.....	20
4.4.2	Normatividad para la descarga de efluentes.....	22
4.5	Humedales Artificiales	25
5	ZONA DE ESTUDIO.....	31
5.1	Características geográficas y climáticas	31
5.2	Morfometría de la cuenca	34
5.3	Zonas funcionales	35
5.4	Hidrología.....	37
5.5	Aspectos demográficos.....	39
5.6	Aspectos Culturales y ambientales	40
6	Métodos y herramientas.....	42
6.1	Diagnóstico.....	43
6.1.1	Caracterización de la zona de estudio	43

6.1.2	Identificación de las necesidades y problemáticas del agua	44
6.1.3	Evaluación del estado del cauce y calidad del agua.....	46
6.2	Planeación.....	49
6.2.1	Capacitación sobre humedales artificiales para el tratamiento de aguas	49
6.2.2	Identificación de modelos de aprovechamiento de los humedales artificiales.....	50
6.3	Propuesta	51
6.3.1	Diseño conceptual de un humedal artificial	51
6.3.2	Estrategias para la implementación.....	51
7	Resultados.....	53
7.1	Conocer las condiciones de la microcuenca en el tema hídrico	53
7.1.1	Cartografía social	53
7.1.2	Evaluación de calidad de agua y estado del arroyo	60
	Evaluación del tramo 1: Manantial principal	62
	Evaluación del tramo 2: Zona de lavado bajo puente	63
	Evaluación del tramo 3: Escurrimientos	64
	Análisis físico-químicos	65
7.1.3	Calidad de agua residual doméstica	66
7.2	Propuesta de modelo conceptual de humedal artificial.....	67
7.2.1	Tipo de humedal	69
7.2.2	Dimensionamiento del sistema	73
7.2.3	Factores económicos y financieros.....	80
7.3	Definición de estrategias sociales y ambientales	84
7.3.1	Acción participativa.....	84
7.3.2	Capacitación.....	85
7.3.3	Propuesta integral.....	86
8	Discusión	88
9	Conclusión.....	91
10	Referencias bibliográficas	93
11	Glosario	103
12	Anexos.....	104

Índice de Figuras

Figura 1. Procesos, físicos, químicos y biológicos en los humedales artificiales.	14
Figura 2. Principales plantas de tratamiento residual por proceso en México.	21
Figura 3. Nivel de especificidad de la legislación mexicana en materia de aguas residuales.....	23
Figura 4. Esquema de clasificación de los sistemas de depuración con macrófitas.....	27
Figura 5. Interrelaciones de las macrófitas en los humedales.....	28
Figura 6. Localización de la microcuenca Mesa de Ramírez	32
Figura 7. Uso de suelo y vegetación.....	33
Figura 8. Curva hipsométrica de la microcuenca Mesa de Ramírez.	35
Figura 9. Mapa de zonas funcionales y orden de cauces.....	37
Figura 10. Orden de escurrimientos.	38
Figura 11. Perfil longitudinal del cauce principal.....	38
Figura 12. Mapa de erosión potencial.	41
Figura 13. Metodología del estudio.	42
Figura 14. Fotografías de la primera visita a la localidad de Bomintzá.	44
Figura 15. Segunda visita para formación de grupo	45
Figura 16. Primer taller de Mapeo comunitario.	46
Figura 17. Puntos de localización de evaluación.	47
Figura 18. Mapeo de actores clave acorde a la disposición en colaborar y en la influencia respecto al saneamiento.....	55
Figura 19. Análisis de muestras de campo.....	65
Figura 20. Toma de muestra en descargas de regadera en vivienda.	67
Figura 21. Comparativo de las condiciones del arroyo de las adjuntas.....	68
Figura 22. Ejemplo de humedal artificial de tratamiento de aguas grises domésticas.	69
Figura 23. Esquema de funcionamiento del humedal artificial.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 24. Distribución de lecho filtrante	71
Figura 25. Costo por los litros consumidos de agua.	75
Figura 26. Flujos de agua en un humedal para tratamiento.....	75
Figura 27. Ecuación del método P-K-C*	76
Figura 28. Vista lateral del interior del humedal.	78
Figura 29. Medidas del humedal de tratamiento.	78

Figura 30. Distribución de la vegetación en el HAT.	79
--	----

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Clasificación de aguas residuales	17
Cuadro 2. Composición de aguas residuales y parámetros permisibles.....	18
Cuadro 3. Contaminantes y mecanismos de remoción en los HAFSS.....	26
Cuadro 4. Categorías de uso de aguas residuales.....	28
Cuadro 5. Distribución del uso de suelo y vegetación.	33
Cuadro 6. Parámetros morfométricos de la microcuenca Mesa de Ramírez.....	34
Cuadro 7. Población de la microcuenca.....	39
Cuadro 8. Matriz FODA respecto a la percepción del agua	55
Cuadro 9. Resultados obtenidos de la caracterización, RQI y muestreo en los tres tramos del arroyo de las adjuntas en Bomintzá, Tolimán.	60
Cuadro 10. Resultados de valoración RQI en el primer tramo del arroyo.	63
Cuadro 11. Resultados de valoración RQI en el segundo tramo del arroyo.	64
Cuadro 12. Resultados de valoración RQI en el tercer tramo del arroyo.	65
Cuadro 13. Parámetros analizados de las muestras colectadas en el arroyo y los límites permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-2021 y NOM-127-SSA1-2021.....	65
Cuadro 14. Parámetros analizados de la muestra colectada en la vivienda y los límites permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	67
Cuadro 15. Eficiencia de eliminación de contaminantes en los humedales de tratamiento	70
Cuadro 16. Clasificación de fibras vegetales.....	70
Cuadro 17. Características de la vegetación propuesta para el humedal artificial	72
Cuadro 18. Diseño de parámetros del humedal artificial	77
Cuadro 19. Propuesta de sistemas por localidad.....	80
Cuadro 20. Estimación financiera del proyecto.....	80
Cuadro 21. Cronograma de actividades del proyecto.	81
Cuadro 22. Programas de financiamiento para agua y saneamiento.....	82
Cuadro 23. Acción participativa como estrategia para la implementación de un HAT.	84
Cuadro 24. Capacitación como estrategia para la implementación de un HAT.	85
Cuadro 25. Propuesta integral como estrategia para la implementación de un HAT.	87

1. INTRODUCCIÓN

El agua es considerada un elemento esencial que ha posibilitado el surgimiento de la vida en los ecosistemas y el desarrollo de la humanidad. Sin embargo, el cambio climático, la deforestación, el cambio de uso de suelo, el aumento poblacional y la urbanización han hecho que la gestión del agua sea un desafío en términos de su disponibilidad (UNESCO, 2021).

Así mismo, el agua disponible para el desarrollo de actividades cotidianas ha causado la degradación ambiental y el deterioro de la salud humana, debido principalmente a las descargas de aguas residuales al medio ambiente sin un tratamiento previo (Álvarez et al., 2019). Se estima que alrededor del 80 % de las aguas residuales a nivel mundial no se tratan (UNESCO, 2017).

Lo anterior está relacionado al rezago económico que impacta significativamente en el saneamiento hídrico, ya que la implementación representa elevados costos en la construcción y operación en los sistemas de tratamiento convencional, siendo las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) las más utilizadas (UNESCO, 2019). Tanto estos sistemas como la disposición de redes de alcantarillado se acentúan en zonas rurales y poblaciones aisladas de Latinoamérica donde la inaccesibilidad imposibilita su implementación (Clichevsky, 2002).

En gran parte de los lugares las aguas residuales se descargan en los cuerpos de agua cercanos, lo cual hace susceptible a la formación de focos infecciosos perjudiciales en la salud de las personas que con frecuencia usan el agua (Zurita et al., 2011). En México las enfermedades infecciosas intestinales fueron la quinta causa de muerte en menores de edad entre uno y cuatro años en 2017, y muchos casos fueron relacionados por la contaminación del agua (INEGI, 2018).

Por otro lado, en la zona norte, noroeste y parte del centro de México tienen un clima árido y semiárido (SSPC, 2002), además de ser la región donde se asienta

el 77 % de la población del país, esto tiene relación con una alta demanda y disponibilidad limitada de agua, de la cual se estima que sólo el 33 % es agua renovable. Debido a estas condiciones, en México la mayoría de las ocasiones las aguas residuales son tratadas para su reutilización (CONAGUA, 2019).

En este escenario, es indispensable la búsqueda de alternativas ecológicas para el tratamiento y aprovechamiento del agua, considerando que sean eficientes, autónomas, de bajo costo y se adapten al entorno rural. En este sentido existen disciplinas que crean soluciones diseñadas para replicar los procesos existentes en la naturaleza, como la ingeniería ecológica que integra principios de ecología y tecnología para diseñar, gestionar y restaurar sistemas ecológicos sostenibles. (Matlock et al., 2018).

Dentro de las soluciones que plantea este enfoque se encuentran los Humedales Artificiales de Tratamiento (HAT), los cuales tienen el propósito de imitar los procesos existentes en los humedales naturales, empleando plantas, sustratos y microorganismos para mejorar la calidad del agua (Sandoval et al., 2016).

Además de los elementos anteriores, también interviene el factor humano como fuerza de trabajo para la construcción y mantenimiento, la participación social, requerida para el aprovechamiento, y las reglas necesarias para la operación en el uso y manejo hídrico, entre otros (Laudino, et al., 2019). La interacción entre los componentes naturales y los beneficios aprovechables por los seres humanos se les considera como sistemas socio-ecológicos (Chapin et al., 2009).

Esta tecnología se ha convertido en una alternativa viable a los sistemas convencionales de tratamiento de aguas debido a su eficiencia, bajo costo de operación y mantenimiento, y su capacidad para integrarse debidamente en el entorno natural y urbano. Estos sistemas son especialmente adecuados para el tratamiento de aguas residuales domésticas, industriales y agrícolas, así como para la remediación de cuerpos de agua contaminados (Kadlec y Wallace, 2008).

La creciente preocupación por la sostenibilidad ambiental y la necesidad de soluciones de tratamiento de aguas más económicas y ecológicas han impulsado el interés y la implementación de humedales artificiales en diversas partes del mundo. Además de la capacidad de depuración del agua, los humedales artificiales proporcionan beneficios adicionales, como la disposición de hábitats para la fauna local, el aumento de la biodiversidad local y el enriquecimiento del paisaje (Vymazal, 2010).

Estos sistemas pueden ser diseñados y adaptados para cumplir con las necesidades específicas de cada lugar, considerando factores como el clima, el tipo de suelo y la disponibilidad de espacio (Mitsch y Gosselink, 2015). Estas características los convierten en una opción de tratamiento sustentable en comunidades rurales, donde el bajo número de habitantes y su dispersión hacen viable su implementación (Zurita et al., 2011).

En resumen, los humedales artificiales ofrecen una solución prometedora para el tratamiento de aguas residuales, combinando eficiencia técnica con beneficios ambientales y sociales. A medida que las comunidades buscan adoptar prácticas más sostenibles y resilientes, la implementación de estos sistemas se presenta como una estrategia clave para mejorar la calidad del agua y protección del medio ambiente.

JUSTIFICACIÓN

Actualmente el acceso, disponibilidad y saneamiento del agua es un problema que afecta principalmente a la población más vulnerable donde los recursos hídricos son limitados ya que a nivel global, se estima que la disponibilidad promedio anual de agua es de 1,386 billones de hectómetros cúbicos (hm³). De esa cantidad, solo 35 billones de hm³ corresponden a agua dulce, representando un 2.5% del total. Sin embargo, el 70% de esta agua dulce no es accesible, ya que está atrapada en glaciares, nieve y hielo. Se estima que 10.5 millones de hm³ están disponibles como agua subterránea, mientras que apenas 0.14 billones de hm³ se encuentran en lagos, ríos, la humedad del suelo y el aire, así como en humedales y plantas (SINA, 2019).

Es indispensable que la población cuente con fuentes de agua óptimas para el desarrollo de actividades básicas que se realizan en las localidades, desde el consumo humano y animal, riego de cultivos y lavado de ropa. En este sentido se habla sobre el derecho humano al agua, el cual es indispensable para una vida digna. Este derecho se refiere a disponer de agua en cantidad suficiente, saludable, aceptable, físicamente accesible y asequible para el uso personal y doméstico (ONU 2002).

En México, la gestión del agua es uno de los desafíos más críticos que enfrentan las comunidades rurales, especialmente en regiones semiáridas como en el municipio de Tolimán en Querétaro. La disponibilidad y calidad del agua son esenciales para la salud pública, desarrollo de actividades y la preservación de los ecosistemas locales. En este contexto, la implementación de humedales artificiales se presenta como una solución innovadora y sostenible para abordar los problemas hídricos de la región.

La realización de esta investigación ofrece la posibilidad de proponer solución a esta problemática de contaminación y acceso al agua en toda la región, al mismo tiempo

crea la posibilidad de un aprovechamiento de la vegetación para las familias con beneficios económicos, de alimentación, recreación, entre muchos otros.

Para esto se plantea en la metodología la integración de las personas como eje rector para la participación y apropiación del proyecto. De esta forma se estarían generando múltiples beneficios, desde el saneamiento del agua, la integración comunitaria, el desarrollo de actividades productivas, la activación económica y un método que se puede adaptar a las diferentes zonas que requieran implementar esta alternativa.

Se plantea tomar un punto de intervención localizado en la parte alta de la microcuenca ya que estratégicamente en proyectos hídricos y de saneamiento es más eficiente iniciar aguas arriba para influir en las zonas más bajas, también porque se ubican algunas de las localidades de mayor población de la zona, como la localidad de Bomintzá, donde además se encuentran los pocos manantiales de la región.

El propósito de este estudio es desarrollar una estrategia para tratar el agua de los domicilios y almacenarla para su reúso, esto permitiría tener una gestión hídrica en la microcuenca. Con el objetivo de promover la participación de los habitantes y organizaciones que buscan dar solución a estas problemáticas, además de generar beneficios en las familias en la reutilización del agua y aprovechamiento para riego en cultivos, así como el saneamiento en los arroyos. Al finalizar este estudio se compartirán los resultados con los habitantes y autoridades de la microcuenca para una futura implementación y posteriormente intercambiar experiencias con la implementación en las diferentes zonas.

2. ANTECEDENTES

En México, actualmente existen condiciones limitadas para el abasto del agua, relacionadas con el crecimiento poblacional, cambio climático, sobreexplotación y contaminación de acuíferos (Ruíz, 2017). En el estado de Querétaro se acentúan más estas problemáticas con el agua, tanto la calidad como la disponibilidad se han visto alteradas debido a la alta demanda derivada del crecimiento exponencial de la urbanización como de zonas industriales que se ha tenido en los últimos años (CONAGUA, 2016; Estrada, 2022).

En la entidad se encuentra la región del semi desierto queretano, caracterizado por la aridez y las escasas lluvias que se presentan con un promedio de 400 mm al año (SMN, 2020). Dentro de esta región se localiza el municipio de Tolimán, donde la mayor parte de las localidades del municipio presentan condiciones de escasez de agua y contaminación en los arroyos en los últimos años (Pineda, 2019).

Anteriormente se ha reportado que los habitantes de las comunidades aledañas a la cabecera municipal de Tolimán han padecido problemas de salud debido a la contaminación del río Tolimán y sus afluentes. Desde el año 1997 hubo un brote de cólera en la zona y en los años posteriores se han presentado cuadros de diferentes enfermedades, así como la muerte de animales que hacen uso de este cauce de agua (Romero, 2023).

Para hacer frente a esta situación, las autoridades instalaron tres plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), ubicadas en San Antonio, Casas Viejas y San Pablo las cuales las primeras dos no están funcionando y la tercera se encuentra en operación con una capacidad rebasada (CONAGUA, 2021).

Al norte de la cabecera municipal de Tolimán, en la parte alta, se localiza la microcuenca Mesa de Ramírez, lugar donde anteriormente se tuvo una participación con instituciones de gobierno en algunas localidades para implementar proyectos relacionados con los sistemas de aprovechamiento, como el “Proyecto de seguridad alimentaria en el estado de Querétaro para comunidades de alta y muy alta

marginación” (SEDEA, 2020) y “Captación y almacenamiento de agua” (DIF del estado de Querétaro, 2022), donde se impartieron talleres, se instalaron huertos de traspatio y sistemas de captación de agua de lluvia para atenuar la escasez de agua y fortalecer la seguridad alimentaria.

En estos proyectos se pudieron observar las necesidades que tienen las localidades para la obtención del agua, ya que para el desarrollo de los cultivos es necesaria una fuente constante de agua y los sistemas de captación sólo resultaban útiles en temporada de lluvias.

Por otro lado, el sistema de distribución de agua proporcionado por la Comisión Estatal de Aguas (CEA) constantemente presenta problemas técnicos en la operación, lo que limita el suministro de agua en la microcuenca en la mayor parte del año, esperando hasta un mes y medio para el restablecimiento de la red.

Aunado a esto, en la mayor parte de las localidades no existen depósitos centralizados con capacidad de almacenamiento suficiente para tolerar estos largos periodos de desabasto, con lo que cada familia depende de sus propios contenedores y hábitos de ahorro que les ayude a subsistir hasta el próximo abasto, mismo que si las condiciones de operación no son favorables, se realiza por medio de pipas de agua, con capacidad insuficiente para cubrir la demanda de todas las familias en la zona.

En este sentido, las personas recurren a los pocos manantiales de agua que hay en algunas localidades, lo que les posibilita tener una fuente alterna cuando el agua escasea. Esta agua es empleada para consumo y en las actividades del hogar, además del lavado de ropa que se realiza sobre el cauce de los arroyos provenientes de los manantiales.

Sin embargo, esta actividad impacta en la calidad de agua y biodiversidad del arroyo, ya que se acumulan los detergentes y otras sustancias empleadas en un bajo caudal, ocasionando la concentración de fósforo y nitrógeno que alteran de forma negativa la calidad del agua (Moreno, 2018).

Este fenómeno es denominado como eutrofización, se caracteriza por el aumento de nutrientes en el cuerpo de agua, esto tiene como consecuencia el crecimiento acelerado de algas en los alrededores del caudal hídrico, generando la reducción del oxígeno y provocando la muerte a especies acuáticas, lo cual desencadena un desequilibrio entre los organismos acuáticos y, al mismo tiempo, disminuye la calidad del agua del arroyo (Gonzales et al., 2008), misma que podría ser utilizada por los habitantes en zonas más bajas sin riesgo alguno.

Estas condiciones han provocado que el acceso al agua sea un desafío para los habitantes de la microcuenca, lo que imposibilita que puedan desarrollar sus actividades cotidianas. Asimismo, se requiere de una propuesta que represente una solución viable a estas dos problemáticas en el tema hídrico relacionadas a la escasez y contaminación del agua.

En este sentido es posible proponer a los HAT como alternativa a una escala comunitaria o familiar que pueda replicarse a lo largo de toda la microcuenca, con el propósito de tratar las aguas grises ya almacenarlas para su reutilización, además de un aprovechamiento de la vegetación filtrante como insumos en actividades de construcción, elaboración de artesanías, ornato y consumo.

En términos sociales esta propuesta busca detonar un proceso comunitario participativo mediante el intercambio de saberes, reflexiones y adopción de actitudes que permitan cambios de comportamiento en las personas hacia una gestión permanente del agua, para el involucramiento y responsabilidad para resolver las problemáticas hídricas con acciones locales que puedan ser reproducidas en otras zonas.

De forma general, esta propuesta permitiría mejorar las condiciones sanitarias del lugar, dar un abasto de agua, apoyar la economía de las familias y a una escala mayor impactar en la restauración del paisaje, lo cual significaría un mejoramiento en la calidad de vida de los habitantes.

3. OBJETIVOS

Objetivo General

Proponer el diseño de humedales artificiales que permitan el tratamiento y aprovechamiento hídrico en la microcuenca Mesa de Ramírez, con beneficios sociales y ambientales.

Objetivos Específicos

1. Evaluar las condiciones de calidad de agua en el arroyo y en las descargas domiciliarias.
2. Proponer un modelo conceptual de humedal artificial con fines de aprovechamiento, adaptado a las necesidades locales.
3. Definir estrategias ambientales y sociales que aseguren la sostenibilidad del proyecto.

Preguntas de investigación

1. ¿Cuál es el estado actual en la calidad de agua en el arroyo y las descargas domiciliarias?
2. ¿Cuáles serían los elementos de diseño (dimensión, profundidad, sustrato, vegetación) que pueden maximizar la eficiencia del humedal en el tratamiento de agua y su adaptación a las condiciones locales?
3. ¿Qué estrategias pueden maximizar los beneficios ambientales y sociales para asegurar la sostenibilidad del proyecto?

4. MARCO CONCEPTUAL

4.1 Gestión de cuencas hidrográficas

Las cuencas hidrográficas se definen como áreas geográficas que captan y drenan agua hacia un río principal (Vásquez et al., 2016), ofrecen servicios importantes, como abastecimiento de agua y regulación de ecosistemas. Los objetivos de su gestión incluyen el desarrollo, manejo, ordenamiento y protección de cuencas. Para su estudio y manejo, las cuencas se subdividen en subcuencas y microcuencas, y en áreas funcionales de captación, almacenamiento y descarga. (Aguirre, 2011; Walker et al., 2006; Villanueva, 2002).

La cuenca hidrográfica es considerada la unidad territorial más apropiada para la gestión integral de los recursos hídricos. No obstante, debido a que las divisiones político-administrativas (como países, estados, provincias, municipios o regiones) no suelen coincidir con los límites de las cuencas, muchas decisiones que impactan el ciclo hidrológico, el uso del agua y las comunidades dentro de la cuenca no toman en cuenta las interconexiones que se dan en todo este sistema integrado. Tampoco se considera el efecto del drenaje de la cuenca sobre las zonas costeras y el mar (Dourojeanni et al., 2002).

El manejo de cuencas ha evolucionado desde el enfoque de captación de agua a otros diferentes como la protección de recursos naturales, mitigación de desastres naturales, control de erosión, contaminación, conservación y recuperación de suelos, hasta el mejoramiento en distintos procesos de aprovechamiento. Lo cual involucra a especialistas de diferentes áreas, que integren los aspectos técnicos y sociales que se requieren para una gestión integrada (Dourojeanni, 2001).

La gestión integrada de cuencas implica un proceso adaptativo que requiere de la interacción entre diferentes actores (Cotler y Caire, 2009). Este enfoque reconoce la interconexión de flujos hídricos y la relación entre territorios y habitantes de la cuenca alta y baja. La gestión de cuencas es un proceso a largo plazo, que necesita

etapas con resultados que respondan a las necesidades locales y motiven la continuidad del proceso. La participación de las comunidades y el conocimiento de sus intereses y necesidades son esenciales para aplicar tácticas y estrategias efectivas en el manejo de cuencas (Walker et al., 2006).

Existe una estrecha relación al momento de abordar la problemática hídrica de la microcuenca, desde la perspectiva del manejo y gestión, donde se consideran los escurrimientos, los puntos potenciales de contaminación en la cuenca, la composición de las aguas residuales, distribuir el tratamiento con menor concentración de contaminantes, conocer el método de tratamiento de aguas más adecuado para la zona de estudio y la gestión hídrica en diferentes niveles administrativos como la prioridad por una apropiación en el manejo local.

Este tema de manejo de aguas residuales frecuentemente es abordado por especialistas, debido a la complejidad en términos técnicos y administrativos, por lo que es indispensable vincular la participación de múltiples actores como comunidades, autoridades locales, gobierno, academia, instituciones privadas, entre otros, para generar conocimiento y un sentido de responsabilidad compartida, que apoye decisiones más acertadas a futuro.

El enfoque de cuencas aporta a los humedales artificiales una gestión a escala mayor, considerando aspectos dinámicos en la cuenca como los elementos naturales y ambientales, socioculturales y políticos, demográficos y económicos que influyen de manera significativa en la implementación de proyectos comunitarios.

Así mismo, estos sistemas además de cumplir un papel ecológico y ambiental se derivan algunas interacciones sociales que impactan en las comunidades de forma significativa como se describen a continuación:

1. **Participación comunitaria:** Las comunidades locales se pueden involucrar en la planificación y diseño del sistema, aportando conocimientos tradicionales que fomenten un sentido de pertenencia y responsabilidad hacia el proyecto.

2. **Cohesión social:** La integración de estos sistemas en las comunidades puede convertirse en lugares de reunión y recreación, fortaleciendo los lazos sociales entre los miembros de la comunidad, así como también con otros grupos de ciudadanos, académicos, ONGs, y gobiernos locales que promuevan el trabajo conjunto y el fortalecimiento del tejido social.
3. **Gobernanza y gestión:** Implica interacciones constantes en la toma de decisiones entre diferentes actores para la gestión sostenible del agua y la capacidad de solucionar conflictos.
4. **Educación:** como herramientas para llevar a cabo prácticas sostenibles en las comunidades como la gestión del agua, el cuidado de los ecosistemas acuáticos y el saneamiento.
5. **Beneficios Socioeconómicos:** Se pueden generar empleos locales en actividades como la construcción, el mantenimiento, el monitoreo ambiental, y el turismo ecológico.

4.2 Ecología de los humedales

Los humedales se definen como ecosistemas de transición entre ambientes terrestres y acuáticos (Keddy, 2010), su suelo está húmedo o cubierto por agua, dando pie al desarrollo de vegetación adaptada a dichas condiciones (Marín, 2018). Estos ecosistemas se destacan como algunos de los más productivos y dinámicos, ya que proporcionan hábitat a una gran diversidad de especies de flora y fauna, además de contribuir a la regulación del clima local y actuar como importantes almacenes de carbono (Ramsar Convención sobre los Humedales, 2016).

Los humedales han tenido una importancia relevante para el ser humano, desde la provisión de recursos, la protección contra desastres naturales, soporte de ecosistemas, significado cultural, espiritual y han posibilitado la conexión y comercio con otras naciones (Dixon et al., 2016; Junk et al., 2013; Mitsch et al., 2000; Rebelo et al., 2010).

Esto permitió el desarrollo de importantes civilizaciones a su alrededor, tal es el caso en Mesopotamia, el antiguo Egipto, Venecia, Tenochtitlan, Calakmul, Tiwanaku, entre muchas otras, que facilitó el acceso al agua, amortiguamiento en inundaciones, producción de alimentos, combustibles, materiales, incluso para la disposición de aguas residuales (Brix, 1994; Carrasco, 2016; Hritz, 2010; Janusek et al., 2013; McCarthy et al., 2016; Morehart et al., 2014; Wilson, 2011).

Dichos ecosistemas, además de funcionar como filtros naturales, proveen de varios servicios ambientales, como la regulación de los ciclos hidrológicos y del carbono, cumplen la función de hábitat, al brindar refugio a una diversidad de fauna terrestre, acuática, y aves. Por otro lado, ofrecen servicios para el ser humano como materia prima en alimentos, plantas ornamentales y medicinales, actividades recreativas y educativas, (Marín-Muñíz 2017);

Los humedales desempeñan funciones clave en la regulación física del ciclo del agua superficial y de los acuíferos, además de contribuir a la retención de sedimentos, el control de la erosión y la regulación del microclima. También juegan un papel importante en procesos químicos, como la regulación de los ciclos biogeoquímicos mediante la retención, filtración y liberación de sustancias, por otro lado, en las funciones biológicas a través del desarrollo microbiano y de la vegetación (Alarcón, 2018) (Ver figura 1).

Durante cientos de años los humedales habían estado al servicio de la humanidad ofreciendo diferentes beneficios, sin embargo, la tendencia hacia la urbanización ha producido aguas contaminadas que son depositadas en los cuerpos de agua, lo cual ha rebasado la capacidad de filtración de estos sistemas y traído como consecuencia la pérdida de biodiversidad en la zona de humedales (Moreno, 2008; Mitsch et al., 2015). Se estima que en México se han perdido aproximadamente el 62 % de los humedales existentes a consecuencia las acciones antrópicas derivadas de la urbanización y la agricultura (CONANP, 2021).

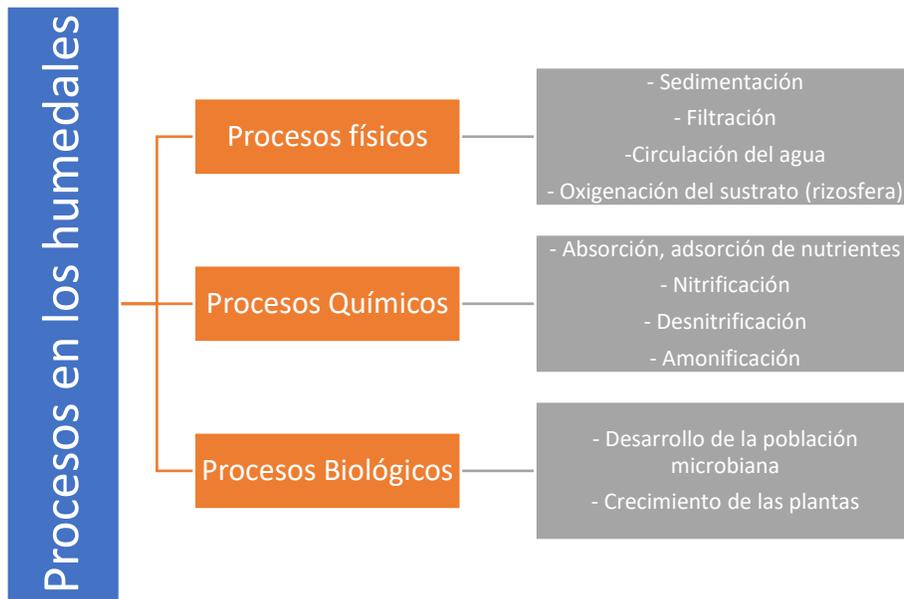


Figura 1. Procesos, físicos, químicos y biológicos en los humedales artificiales.
Fuente: Elaborado a partir de Álvarez et al., (2019).

En este sentido es conveniente replicar estos ecosistemas en ambientes controlados para mejorar la eficiencia, sostenibilidad y multifuncionalidad de estos sistemas de tratamiento. Un humedal artificial que imita la complejidad de un ecosistema natural es menos vulnerable a fallos en el tratamiento, ya que la diversidad biológica y ecológica proporciona redundancia en los procesos de depuración.

El enfoque de ecología de los humedales no solo mejora la calidad del agua tratada, sino que también contribuye a la restauración del medio ambiente y sostenibilidad de los recursos hídricos a largo plazo.

4.3 Ingeniería ecológica

La ingeniería ecológica estudia el diseño de ecosistemas sostenibles alrededor de sociedades humanas y su entorno para un beneficio mutuo con la finalidad de restaurar los ecosistemas afectados por acciones humanas y el desarrollo de nuevos ecosistemas con un valor social y ambiental (Mitsch, 2012). Se enfoca en minimizar el uso de energía, materiales y contaminación a lo largo del ciclo de vida del sistema, aplicando procesos y productos tecnológica y financieramente viables.

La aplicación que tiene sobre los sistemas ecológicos es la posibilidad de resolver problemas ambientales como la contaminación. Un ejemplo común son los humedales artificiales empleados para el tratamiento de aguas residuales que utilizan la energía solar para el crecimiento vegetal y en comparación con una planta de tratamiento (Rodríguez, 2015).

La ingeniería ecológica aborda el diseño desde un enfoque sistémico, lo cual implica la integración de diferentes disciplinas profesionales abarcadas por la ingeniería, arquitectura de paisaje, así como las ciencias sociales que incluyen a las personas para el manejo de ecosistemas (Odum, 2003).

Los humedales desempeñan tres funciones esenciales que los convierten en una opción altamente atractiva para el tratamiento de aguas residuales. (Delgadillo. 2010).

1. Retener físicamente los contaminantes en la superficie del suelo y en la materia orgánica.
2. Emplear microorganismos para transformar y procesar los elementos contaminantes.
3. Alcanzar niveles de tratamiento eficaces con bajo consumo de energía y mínimo mantenimiento.

4.3.1 Dimensionamiento del sistema

Existen diferentes métodos para dimensionar y diseñar un sistema de tratamiento basado en humedales. Los enfoques de diseño para HAT han evolucionado en los últimos años, desde reglas estandarizadas hasta ecuaciones complejas que consideran diferentes variables como la tasa de carga hidráulica, trayectoria de flujo, la concentración de fondo, entre otros.

Es necesario contemplar que los datos en los parámetros de diseño están basados sistemas reales a nivel mundial. Es recomendable verificar la información para garantizar la extrapolación de datos durante el proceso de diseño (Kadlec et al., 2009).

Los parámetros de diseño deben aplicarse únicamente a nuevos proyectos que se encuentren dentro del rango de los conjuntos de datos originales de los que se derivaron. El diseño debe respetar las condiciones físicas y operativas de esos datos, las cuales incluyen:

1. Tipo de humedal destinado al tratamiento
2. Concentraciones de entrada y salida
3. Cargas hidráulicas y másicas
4. Tamaño, relación de aspecto y profundidad
5. Clima y variaciones en el balance hídrico (como lluvia, evapotranspiración, etc.)
6. Ecología y tipo de vegetación
7. Proporción de áreas abiertas de agua (aplicable solo a humedales de flujo superficial)

Entre los enfoques de diseño más comunes se encuentran la regla general, ecuaciones de regresión, modelo de flujo pistón $k-C^*$, gráficos de carga y $P-k-C^*$ (Vera-Puerto et al., 2017).

Para el diseño del sistema se realiza bajo el enfoque P-K-C*, ya que es un marco integral para el diseño de humedales construidos que equilibra la eficiencia técnica del tratamiento de aguas con las consideraciones ambientales y socioeconómicas locales. Este enfoque no solo busca la eficiencia técnica del tratamiento de aguas, sino también la armonización del humedal construido con su entorno natural y socioeconómico.

Al integrar los procesos bioquímicos, las cinéticas de tratamiento, y el contexto específico del sitio, este enfoque permite desarrollar soluciones personalizadas y sostenibles para la gestión hídrica. Este método optimiza la eficiencia en el tratamiento de aguas mediante la integración de tres factores clave: Procesos (P), Cinética (K) y Contexto (C). A continuación, se describe cada uno de estos componentes:

1. **Procesos:** Se identifican y comprenden los procesos biofísicos y químicos que ocurren dentro del humedal construido. Es necesario seleccionar y configurar los procesos clave que optimizan la eliminación de contaminantes específicos presentes en las aguas residuales a tratar.
2. **Cinética:** Se refiere a la velocidad o tasa a la cual los procesos de tratamiento de aguas ocurren dentro del humedal. La cinética influye en la determinación de parámetros como el tiempo de retención hidráulica, la densidad de la vegetación, y la configuración del flujo de agua.
3. **Contexto:** Considera las condiciones específicas del sitio donde se implementará el humedal, así como las necesidades y limitaciones socioeconómicas y ambientales para adaptarse al contexto local y garantizar su viabilidad y sostenibilidad a largo plazo.

4.4 Aguas residuales

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana (NOM-001-SEMARNAT-1996), las aguas residuales tienen una composición diversa y provienen de descargas

municipales, industriales, comerciales, agrícolas y de cualquier otro uso, así como de la mezcla de estas. Estas aguas contienen diferentes contaminantes, cuya naturaleza varía según las actividades del lugar de origen, y al ser vertidas, afectan la calidad de los cuerpos de agua. Las principales fuentes de generación de aguas residuales son de origen doméstico, industrial y agrícola (Haro, 2010), cuyas características se detallan a continuación (Ver cuadro 1).

Cuadro 1. Clasificación de aguas residuales

Origen	Descripción
Doméstico	Este tipo de descargas provienen de viviendas, las sustancias se mezclan con productos orgánicos de origen animal, vegetal, excretas humanas y grasas, e inorgánicos donde se encuentran productos disueltos y elementos inertes como residuos de materiales, tierra, arena y papel, además microorganismos.
Industrial	Producto de las actividades industriales como residuos de materias primas y productos compuestos. En estas aguas pueden aparecer productos tóxicos, iones metálicos, hidrocarburos, detergentes, pesticidas y elementos radioactivos, entre otros.
Agrícola	Son sustancias procedentes de las actividades agrícolas y ganaderas como residuos en pesticidas, herbicidas, estiércol y animales muertos.

Fuente: Haro (2010).

La composición común de las aguas residuales es de 99 % de agua y 1 % de contaminantes. De estos contaminantes el 70 % suelen ser materiales orgánicos como las proteínas y el 30 % de sustancias inorgánicas como grasas, sales, arenas y metales pesados (IMTA, 2022).

Estos elementos se clasifican de acuerdo a su composición física, química y biológica. Los parámetros físicos dan una aproximación de la calidad del agua por medio de indicadores tangibles, los químicos aportan información extensa sobre las características físico-químicas del agua y los biológicos son la variedad de organismos existentes de alta capacidad metabólica.

Para poder estimar la presencia y concentración de los elementos anteriores es necesario realizar mediciones que determinen la calidad del agua, ya sea en las descargas o después de algún proceso de tratamiento. A continuación, se presentan los contaminantes más frecuentes en las aguas residuales domésticas, así como

los efectos que tienen en el entorno y los parámetros para su medición (Ver cuadro 2).

Cuadro 2. Composición de aguas residuales y parámetros permisibles.

Composición	Elementos	Efectos	Parámetros máximos
Física	-Color -Olor -Sólidos -Temperatura	-Turbidez -Depósitos de lodos -Condiciones anaerobias.	- SDT= 140 mg/lit - CE= <1000 μ S/cm - Temp: 20-35° C.
Química	Orgánicos: -Grasas y aceites -Nutrientes -Pesticidas	-Olor desagradable -Muerte de fauna. -Bioacumulación	- DQO= 210 mg/lit - DBO= 200 mg/lit -Grasas y aceites= 21 mg/lit
	Inorgánicos -PH -Nitrógeno -Fósforo -Oxígeno disuelto -Metales pesados -Tensoactivos	-Agotamiento del oxígeno disuelto, eutrofización, efectos tóxicos. -Propagación de especies invasoras. -Bioacumulación -Toxicidad	- PH= 6.5 - 8.4 - COT= 53 mg/lit - OD= 5 mg/lit - NT= 35 mg/lit - PT= 21 mg/lit - CE= <1000 μ S/cm
Biológica	- Algas - Hongos - Bacterias - Virus - Parásitos - Protozoos	-Riesgos para actividades acuáticas y de consumo- -Enfermedades	- Huevos de helminto=1/lit - E. Coli= 600/100 ml. - Enterococos Fecales= 500/100 ml)

*SDT=Sólidos disueltos totales, CE=Conductividad eléctrica, DBO=Demanda bioquímica de oxígeno, DQO=Demanda química de oxígeno, OD=Oxígeno disuelto, COT=Carbono orgánico total, NT=Nitrógeno total, PT=Fósforo total, PH=Potencial de hidrógeno.

Fuente: (Henze et al. 2001; NOM-001-SEMARNAT-2021).

Para la determinación de dichos parámetros es necesario consultar la normatividad aplicable de acuerdo al destino que se le darán a las aguas residuales. En este caso aplica los límites permisibles para las descargas de aguas en los cuerpos receptores. De acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-2021 (Ver anexo 1).

4.4.1 Tratamiento de las aguas residuales

Las aguas residuales requieren ser sometidas a un proceso de tratamiento que elimine los contaminantes, permitiendo su reintegración a los cuerpos de agua o su reutilización. No tratar estas aguas conlleva graves repercusiones ambientales, económicas y sociales, como la contaminación y destrucción de ecosistemas, además de la creación de focos de enfermedades que afectan la salud. (INCYTU, 2019).

Existen distintos métodos para el tratamiento de aguas residuales, su implementación depende de distintos factores como la procedencia de las descargas de aguas, los procesos necesarios para la eliminación de contaminantes, el área requerida y el presupuesto económico disponible. El tratamiento de aguas residuales consta generalmente de las siguientes fases:

1. Pretratamiento: Se eliminan los elementos más grandes, como rocas, papel y troncos.
2. Tratamiento primario: Se remueven partículas más pequeñas, como arena, grava, limo y arcilla.
3. Tratamiento secundario: Se emplean lodos para transformar los microorganismos en componentes que puedan ser fácilmente eliminados.
4. Manejo de biosólidos: Los lodos excedentes se tratan mediante incineración, oxidación o digestión aeróbica, se deshidratan y almacenan para su manejo posterior.
5. Desinfección: Se inactivan bacterias, virus y otros patógenos para proteger la salud humana.
6. Producto final: El agua tratada se destina principalmente a usos agrícolas y ganaderos, y el excedente se devuelve al medio ambiente (INCYTU, 2019).

En cuanto a los métodos para el tratamiento de las aguas residuales, en la figura 2 se pueden observar algunos tipos. Según el inventario nacional de aguas residuales del 2021, en México existen 2,872 plantas en funcionamiento, entre los más

utilizados están las lagunas de estabilización y los lodos activados en un 29 %, los reactores anaerobios de flujo ascendente en un 14 % y los humedales artificiales con un 8 % (CONAGUA, 2021).

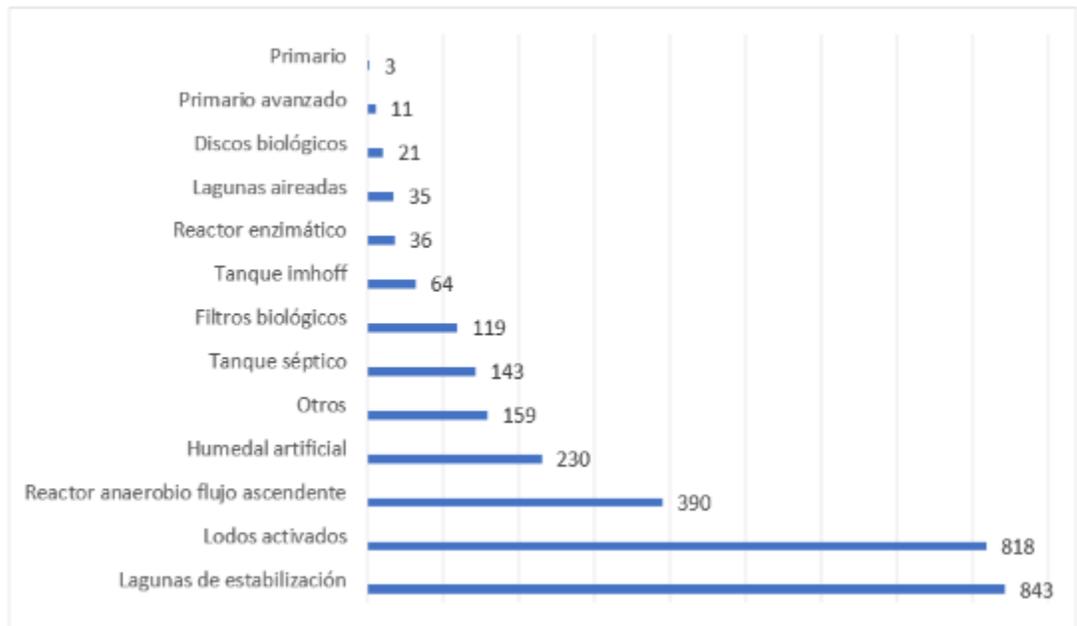


Figura 2. Principales plantas de tratamiento residual por proceso en México.
Fuente: Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. CONAGUA, (2021).

Los problemas para el tratamiento de aguas inician principalmente con la infraestructura para dirigir las aguas residuales a las plantas de tratamiento, donde se derivan algunas dificultades como la capacidad de traslado, fugas en la red de agua potable, sistemas ineficientes de monitoreo, recursos municipales insuficientes para continuar la operación. Esto obliga a cancelar el suministro y dejar abandonados los proyectos (De la Peña et al., 2023; Hogenboom, 2018).

Por otro lado, existen cinco características que afectan el desarrollo sustentable de un proyecto de agua y saneamiento de las aguas residuales: 1) el respeto sociocultural; 2) la participación comunitaria; 3) la cohesión política; 4) la sustentabilidad económica; y 5) la sustentabilidad ambiental (McConville y Mihelcic, 2007).

Los sistemas administrativos, sociales y tecnológicos emergentes deberán tener en cuenta las particularidades y oportunidades de cada región, incorporando un alto grado de innovación y adaptabilidad, alejándose en muchos casos de las soluciones tradicionales (Noyola et al., 2013).

Los sistemas descentralizados o en redes comunitarias para el tratamiento de aguas residuales están diseñados para funcionar a pequeña escala. Estos sistemas no solo minimizan los impactos en el medio ambiente y la salud pública local, sino que también incrementan las oportunidades de reutilización de las aguas residuales, según las características de la población, las opciones técnicas disponibles y las condiciones locales.

Por ello, son especialmente adecuados para comunidades con baja densidad urbana, como las zonas rurales o periurbanas (Wang y Smith, 1994; Massoud et al., 2009; Singh et al., 2015).

4.4.2 Normatividad para la descarga de efluentes.

La gestión adecuada de las aguas residuales es un componente esencial para la protección del medio ambiente y la salud pública. En México, la normatividad para las descargas de aguas residuales ha sido desarrollada y actualizada con el fin de establecer estándares claros y precisos que regulen la calidad de las aguas residuales vertidas en cuerpos receptores, sean estos naturales o artificiales.

Esta normativa no solo busca minimizar el impacto negativo de las descargas en los ecosistemas acuáticos, sino también proteger los recursos hídricos utilizados para consumo humano, agrícola e industrial.

La legislación en materia de control de descargas de aguas residuales en México se organiza en varios niveles de especificidad representados mediante un triángulo inverso con principios y disposiciones generales hasta normas técnicas muy detalladas (Ver figura 3). Estos niveles de especificidad permiten una regulación

comprensiva y adecuada de la gestión, tratamiento, y disposición de aguas residuales (Domínguez et al., 2024).



Figura 3. Nivel de especificidad de la legislación mexicana en materia de aguas residuales.
Fuente: Elaborado a partir de Domínguez et al., (2024).

1. Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (Nivel Constitucional) La Constitución establece el derecho al agua en cuanto al acceso, disposición, y saneamiento para consumo humano y doméstico, en forma suficiente, salubre, aceptable, y asequible. El agua es considerada propiedad de la nación, y el Estado tiene la facultad de regular su uso y aprovechamiento.

2. Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) Proporciona un marco regulatorio para la protección del medio ambiente, incluyendo la regulación de la calidad del agua y la gestión de aguas residuales. Establece las bases para la política ambiental en el país, incluyendo el control de la contaminación de cuerpos de agua.

3. Ley de Aguas Nacionales (LAN) Es la ley principal que regula el uso y aprovechamiento de las aguas nacionales, incluyendo el tratamiento y disposición de aguas residuales. La CONAGUA y las autoridades locales regulan la concesión

de permisos para la descarga de aguas residuales y establece las disposiciones para la autorización de infraestructura de tratamiento.

4. Reglamentos de la ley de aguas nacionales Son normas jurídicas que desarrollan y detallan las disposiciones establecidas en la Ley de Aguas Nacionales (LAN), proporcionando reglas más específicas para su aplicación y cumplimiento. Estos reglamentos son fundamentales para la gestión y regulación de los recursos hídricos en México, incluyendo el uso, aprovechamiento, conservación, administración, y protección de las aguas nacionales.

5. Las normas oficiales mexicanas (NOM) son la regulación técnica de observancia obligatoria que establece los criterios técnicos específicos para el tratamiento, manejo, y disposición de aguas residuales.

- NOM-001-SEMARNAT-2021: Define los límites máximos permitidos de contaminantes en las descargas de aguas residuales hacia cuerpos receptores bajo jurisdicción nacional.

- NOM-002-SEMARNAT-1996: Regula los límites máximos permitidos de contaminantes en las descargas de aguas residuales hacia sistemas de alcantarillado urbano o municipal.

- NOM-003-SEMARNAT-1997: Especifica los límites máximos permitidos de contaminantes en las aguas residuales tratadas que se reutilizan en servicios públicos.

Cada nivel de especificidad está interconectado, proporcionando un marco legal coherente que va desde principios constitucionales amplios hasta detalles técnicos específicos. La estructura jerárquica asegura que los principios generales de derecho y protección ambiental sean operativizados a través de normativas y disposiciones técnicas adecuadas para la gestión eficiente de las aguas residuales en el país.

Desde 2010, ha habido avances significativos en la actualización y fortalecimiento de estas normativas. Por ejemplo, la actualización de la NOM-001-SEMARNAT-2021 introduce criterios más estrictos y metodologías mejoradas para el monitoreo y control de contaminantes, reflejando un compromiso creciente con la protección ambiental y la sostenibilidad (SEMARNAT, 2021).

Además, la implementación de la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) y la Ley de Aguas Nacionales ha sido reforzada mediante programas y políticas públicas que promueven el tratamiento y reutilización de aguas residuales. Estas políticas se vinculan con los objetivos de desarrollo sostenible implantados por la Agenda 2030 de las Naciones Unidas, específicamente con el Objetivo 6, que busca garantizar la disponibilidad y gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos (CONAGUA, 2020).

4.5 Humedales Artificiales

Los humedales artificiales comúnmente son nombrados como humedales construidos, de tratamiento, biofiltros o biojardineras, son sistemas de fitorremediación empleados en aguas residuales. Están diseñados para imitar los procesos que ocurren dentro de un humedal natural (Kadlec et al., 1996; Osnaya, 2012).

Estas condiciones de autodepuración son replicadas de los humedales naturales (Kadlec y Knight, 1996). En comparación con los sistemas intensivos, presentan la ventaja de emitir menos malos olores y ruido, requieren una operación y mantenimiento sencillos, son estéticamente agradables y tienen costos de tratamiento más bajos al no depender de energía eléctrica para su funcionamiento. (CONAGUA, 2015).

En la actualidad estos sistemas se aplican con mayor frecuencia en comparación a décadas anteriores con el objetivo de tratar aguas residuales diversas, entre ellas

las domésticas, agrícolas y ganaderas, industriales, lixiviados de rellenos sanitarios, y la degradación de compuestos orgánicos (Alarcón, 2018).

A continuación, se muestran los contaminantes existentes, así como los mecanismos de remoción que ocurren dentro los humedales artificiales de flujo superficial (Cuadro 3).

Cuadro 3. Contaminantes y mecanismos de remoción en los HAFSS.

Contaminante	Mecanismo		
	Físico	Químico	Biológico
Materia orgánica (DBO, DQO, COT)	- Sedimentación - Filtración - Descomposición	- Mineralización - Filtración - Radiación UV	-Degradación microbiana
Sólidos suspendidos totales (TSS, TDS)	- Filtración - Sedimentación		-Degradación microbiana
Nitrógeno (NH ₃ , NH ₄ , + NO ₃ , NO ₂)	- No aplica	- Amonificación - Nitrificación - Desnitrificación	- Asimilación vegetal -Degradación microbiana
Fósforo	- Sedimentación - Adsorción	- Precipitación con Al, Fe y Ca. - Asimilación	- Asimilación vegetal -Degradación microbiana
Metales pesados	- Fijación al sedimento		- Adsorción vegetal
Patógenos (bacterias, virus, protozoarios, helmintos)	- Sedimentación	- Radiación UV	- Mortandad -Depredación microbiana

Fuente: Adaptado de Lahora, (2003).

Los HAT se pueden clasificar en relación a diferentes principios: hidrología (flujo superficial y flujo subsuperficial); tipos de macrófitas (flotante, emergente y sumergida), y recorrido de flujo (horizontal o vertical). Las clasificaciones más típicas en los humedales artificiales las presenta (Delgadillo et al., 2010), basada en el tipo de vegetación, y de ésta, se derivan varias subclasificaciones (Ver figura 4).

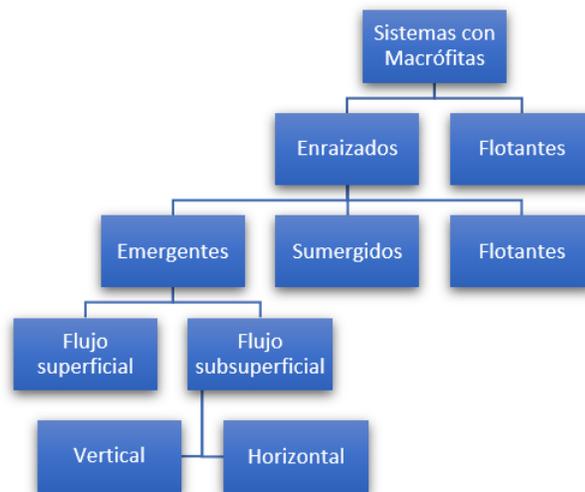


Figura 4. Esquema de clasificación de los sistemas de depuración con macrófitas.
Fuente: Elaborado a partir de Delgadillo et al. (2010).

Dentro los humedales artificiales ocurren diversas interacciones complejas y multifacéticas, involucrando elementos físicos, químicos y biológicos que contribuyen no sólo a la purificación del agua, sino que también forman una red de interrelaciones con otros componentes, que involucran a las plantas, microorganismos, fauna, agua, suelo, viento, entre otros, los cuales intervienen en la eficiencia y sostenibilidad del sistema (Ver Figura 5).

Se puede decir que los humedales artificiales están conformados principalmente por el influente, sustrato, vegetación, microorganismos, flujo hidráulico y afluyente que se describen a continuación.

Influente: Es el agua residual que ingresa al humedal de tipo doméstica, industrial, o combinada entre otras, incluso drenajes pluviales.

Sustrato: Compuesto por materiales como arena, grava, suelo y composta, que soportan las plantas y promueven el desarrollo microbiano, actuando como agente filtrador de contaminantes, formando una biopelícula (Ji et al., 2022). Los sustratos son clave para la eliminación de contaminantes, ya que la mayor parte de las reacciones físicas, químicas y biológicas ocurren en este medio (Almuktar et al., 2018).

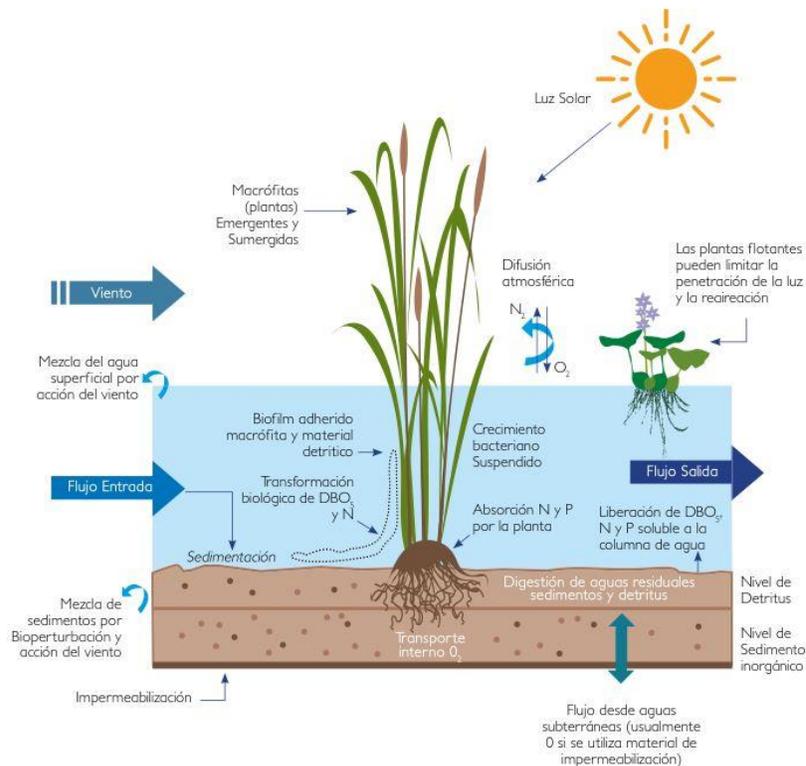


Figura 5. Interrelaciones de las macrófitas en los humedales.
Fuente: Gladys (2018).

Vegetación: Las plantas nativas de humedales, conocidas como macrófitas, cumplen múltiples funciones como la adsorción y fijación de contaminantes, facilitan la disposición de oxígeno y controlan el crecimiento de algas, limitando la penetración de la luz solar (Mitsch y Gosselink, 2015).

El tipo de vegetación en los humedales es fundamental, ya que existen variedades de plantas adaptadas al medio húmedo pero no todas son aptas para la fitodepuración, para esto la vegetación debe tener características como la tolerancia a un suelo saturado anaerobio, altas cargas orgánicas y de nutrientes, tener raíces abundantes como medio de soporte para las bacterias y de oxigenación, así como producir abundante biomasa aérea para el almacenaje de nutrientes (Wallace y Knight, 2006).

Microorganismos: Estos desempeñan un papel crucial en la descomposición de materia orgánica y la eliminación de contaminantes a través de procesos biológicos.

Flujo hidráulico: Es un factor que determina la distribución del agua y los contaminantes a través del sistema, influenciando las interacciones que ocurren dentro del humedal. Para mejorar la eficiencia en el tratamiento es necesario minimizar las zonas de flujos muertos y aumentar el contacto entre los contaminantes y el medio de soporte y las raíces de las plantas (Stairs, 1993).

Afluente: Una vez tratada, el agua puede ser destinada para diferentes usos, la reutilización de esta agua tiene diferentes beneficios para el público y el medio ambiente (Cuadro 4).

La reutilización del agua residual tratada en agricultura es una alternativa que se está investigando y está siendo utilizada cada vez más en regiones de estrés hídrico que cubren cada vez más los territorios. Esto debido al aumento exponencial en la demanda de agua contra unos recursos hídricos limitados en disminución y a las sequías periódicas a consecuencia de factores climáticos (De Anda, 2017).

Cuadro 4. Categorías de uso de aguas residuales.

Categoría	Ejemplos de uso
Riego en la agricultura	Riego de cultivos y viveros comerciales.
Riego de áreas verdes	Campos deportivos, parques y jardines públicos.
Reciclaje industrial	Agua de procesos industriales, para construcción.
Recarga de acuíferos	Recarga subterránea.
Usos recreacionales y ambientales	Lagunas y lagos, reservas naturales, albercas, pesca.
Usos urbanos no potables	Agua para sanitarios, provisión contra incendios.
Reúso potable	Mezcla con agua natural para potabilización, ablandamiento del agua.

Fuente: Adaptado de Asano (2005) y Metcalf and Eddy (2007).

Esta tecnología ha sido la menos utilizada, a pesar del potencial que tienen para resolver problemas de contaminación (Zurita, 2012, García et al., 2013). Sin

embargo, su implementación tiene algunas décadas en países de Europa como Alemania, Holanda y Dinamarca para tratar las aguas residuales de pequeños municipios.

Por otro lado, es común observar que el uso de humedales artificiales está pensado para zonas rurales, con menor población y mayores áreas disponibles. Si se cuenta con un espacio adecuado en una población urbana, la construcción sería más accesible que una planta de tratamiento convencional, además de la fácil operación (Muñiz, 2017).

5 ZONA DE ESTUDIO

Esta sección se enfoca en describir de manera detallada los aspectos geográficos, demográficos, socioeconómicos, culturales y ambientales de la zona, estableciendo así una base sólida para la interpretación de datos y resultados en el estudio.

Al caracterizar la zona de estudio, se busca identificar los factores que pueden influir en la problemática investigada y, a su vez, establecer un marco de referencia que permita evaluar la relevancia y aplicabilidad de los hallazgos. Este enfoque integral no solo facilita una comprensión más profunda de la dinámica local, sino que también garantiza que las intervenciones propuestas sean pertinentes y efectivas para la comunidad.

5.1 Características geográficas y climáticas

El estudio se realizó en el municipio de Tolimán, ubicado en el centro oeste del estado de Querétaro. Referente al nombre del municipio, se deriva de la palabra náhuatl “Tolimani” que significa “lugar donde hay tule”.

Debido a que el municipio se encuentra dentro de la Sierra Madre Oriental su geografía está conformada por montañas y lomas, el clima predominante es semiseco semicálido, el promedio de temperatura anual es de 19° C., la precipitación promedio anual es de 400 mm. (SMN, 2020).

La zona donde se realiza el estudio es en la microcuenca llamada Mesa de Ramírez, según el Programa Nacional de Microcuencas (PNM), está ubicada a 8 km al norte de la cabecera municipal, colinda al oeste con Guanajuato y cubre una superficie total de 62.32 km² que representa el 9 % del total del área del municipio (Ver figura 6).

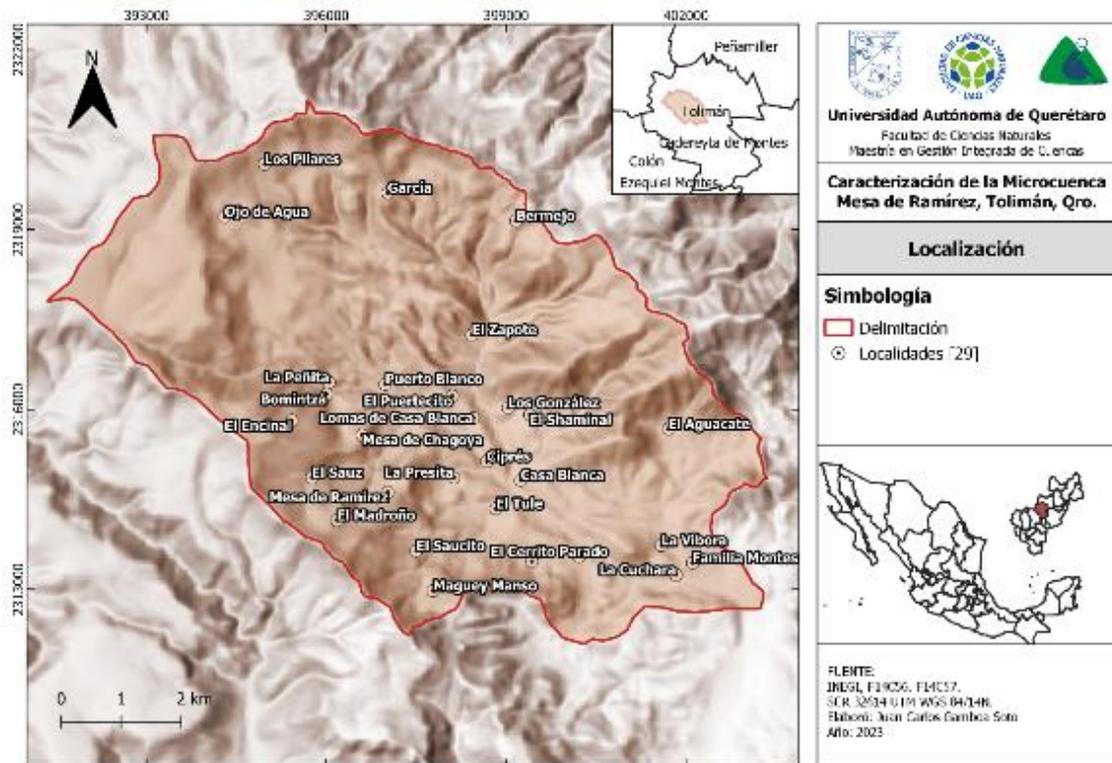


Figura 6. Localización de la microcuenca Mesa de Ramírez
 . Fuente: Elaboración propia a partir de datos del INEGI (2016)

La vegetación predominante es el matorral subinermes con un área de 24.73 km² que corresponde casi el 40 % de la superficie total (ver figura 7), donde se encuentra vegetación como órganos, biznagas, pitayos, garrambullos, magueyes, garrambullos, huizaches, lechugilla y huizache sábila. huizache Las especies animales que habitan la zona incluyen venados, coyotes, armadillos, liebres, conejos, ardillas, tejones y zorrillos, así como aves como el gavián, el cuervo y el zopilote. También hay varios reptiles, incluidas serpientes (Rzedowski, 2006).

También se puede encontrar matorral inermes con 19.5 % del total de la microcuenca, así como asentamientos humanos que corresponde a un 10.93 % (Ver cuadro 5). La pendiente media de la microcuenca es de 34.41%, lo cual indica un relieve fuertemente accidentado.

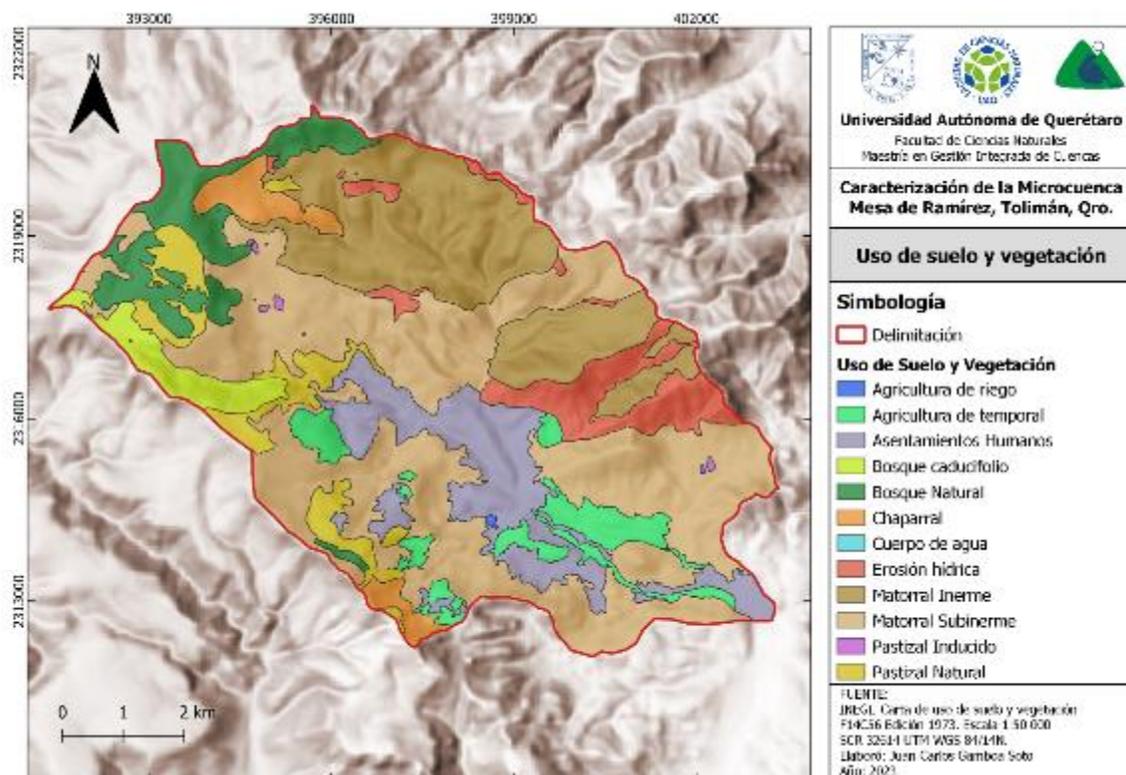


Figura 7. Uso de suelo y vegetación.
 Fuente: Elaboración propia a partir de datos del INEGI (1973) y corrección a partir de imágenes satelitales (2023).

Cuadro 5. Distribución del uso de suelo y vegetación.

Uso de suelo y vegetación	km ²	% MC
Matorral Subinorme	24.73	39.68%
Matorral Inerme	12.18	19.55%
Asentamientos Humanos	6.81	10.93%
Bosque Natural	4.40	7.06%
Erosión hídrica	3.87	6.20%
Pastizal natural	3.37	5.40%
Agricultura de temporal	3.15	5.05%
Chaparral	1.85	2.97%
Bosque caducifolio	1.83	2.93%
Pastizal Inducido	0.09	0.14%
Agricultura de riego	0.04	0.06%
Cuerpo de agua	0.01	0.02%
	62.33	100%

Fuente: Elaboración propia con datos de uso de suelo y vegetación (2023).

5.2 Morfometría de la cuenca

La morfometría de la cuenca es el análisis cuantitativo de las características geométricas y topográficas de una cuenca hidrográfica. Este análisis proporciona información importante sobre la forma y la estructura de la cuenca, lo que es fundamental para comprender su comportamiento hidrológico y geomorfológico. La morfometría de la cuenca implica medir y cuantificar una serie de parámetros que describen su tamaño, forma, relieve y distribución de recursos hídricos. (Cuadro 6).

Cuadro 6. Parámetros morfométricos de la microcuenca Mesa de Ramírez.

Parámetro	Indicador	Resultado	Unidades
Forma	área de la cuenca (Ac)	62.33	km ²
	perímetro de la cuenca (Pc)	37.49	km
	longitud axial de la cuenca (Lc)	12.83	km
	ancho promedio de la cuenca (W)	4.86	km ² /km
	coeficiente de compacidad o índice de Gravelius (K)	1.34	-
	Factor de forma (Rf)	0.38	-
	Relación de Elongación (Re)	0.69	-
	Índice de Alargamiento (Ia)	1.60	-
	Índice de Homogeneidad (Ih)	0.87	-
Relieve	Curva hipsométrica (Ch)	Figura	-
	Altura media (A)	513.55	msnm
	Elevación media (E)	2150	msnm
	Pendiente de la Cuenca (S)	34.41	%
	Orientación de la cuenca	Sur (36%)	Dirección
Drenaje	longitud del cauce principal (Lcp)	16.67	km
	Pendiente media del Cauce principal (P)	8.55	%
	Densidad de Drenaje (Dd)	4.15	km/km ²
	Densidad de Corriente (Dc)	14.55	corr/km ²
	Orden de la cuenca	6	-
	Relación de Bifurcación (Rb)	3.14	-
	Tiempo de concentración (tc)	0.15	hrs

Fuente: Elaboración propia.

Estos parámetros se obtuvieron por medio de ecuaciones con base en la delimitación de la microcuenca y las corrientes determinadas de las curvas de

nivel a cada 20 metros. Estos parámetros morfométricos se calculan a partir de datos topográficos y geográficos, como mapas de elevación y mapas de uso del suelo.

La curva hipsométrica permite identificar el relieve y las zonas funcionales de la microcuenca (ver figura 8). La gráfica indica que la microcuenca se encuentra en etapa de madurez, lo que significa un estado de equilibrio, donde predomina el transporte de agua y agua sedimentos, por otro lado, se presenta erosión hídrica en las zonas altas.

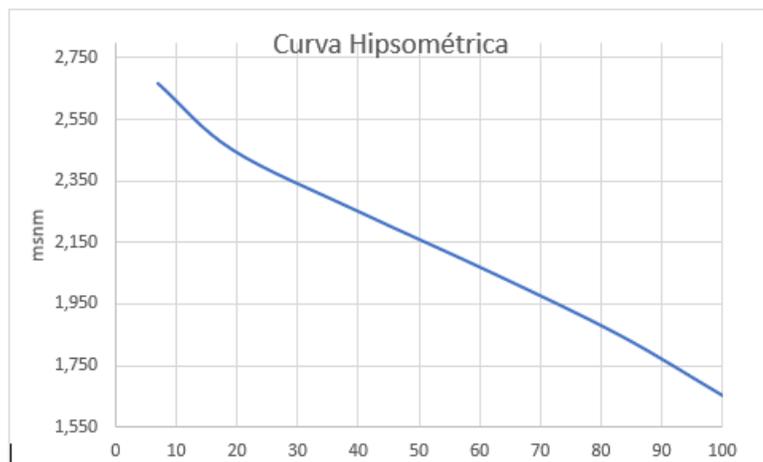


Figura 8. Curva hipsométrica de la microcuenca Mesa de Ramírez.
Fuente: Elaboración propia a partir del modelo digital de elevación.

5.3 Zonas funcionales

Las zonas funcionales de una cuenca son las diferentes áreas dentro de una cuenca hidrográfica que cumplen funciones específicas en el ciclo hidrológico y en la dinámica ambiental. Estas zonas son clave para el manejo integral de los recursos hídricos. Las principales zonas funcionales de una cuenca son:

A) Zona de captación hídrica (cuenca alta): Se origina el flujo de agua proveniente de precipitaciones o deshielos, con corrientes de 1er y 2do orden, corresponde a la zona de mayor altitud y pendiente, por lo que la vegetación y suelos son importantes para la infiltración del agua y para evitar la erosión.

B) Zona de captación-transporte hídrico (cuenca media): Esta zona canaliza el agua a lo largo de ríos y arroyos, facilitando el transporte de sedimentos y nutrientes. Corresponde a las corrientes de 2do, 3ero, y 4to orden. Suele contar con valles más amplios, pendientes moderadas y mayor estabilidad en los cauces. Se pueden ubicar las actividades agrícolas o urbanas que interactúan con el flujo hídrico.

C) Zona de emisión hídrica (cuenca baja): Es la parte más baja de la cuenca, donde los ríos pierden velocidad y depositan los sedimentos que han transportado. Incluye el área del cauce principal en su desembocadura a un cuerpo colector interno más importante como llanuras de inundación, humedales y deltas que desempeñan un papel clave en la retención de agua, la filtración de contaminantes y el control de inundaciones. Es un área fértil y de gran biodiversidad, pero también vulnerable a cambios climáticos y al impacto humano.

En la microcuenca de estudio, la zona alta constituyó el área de captación con la mayor superficie dentro de la microcuenca donde se presentaron las corrientes de primer y segundo orden, con procesos erosivos predominantes, la superficie cubre 3,597.46 ha. y se ubica a una altitud de 1,960 msnm, teniendo como máximo 2,780 msnm.

En zona media existen mayor erosión y transporte de sedimentos, existen corrientes de tercer y cuarto orden que benefician la captación, el área corresponde a 1,532.43 ha. ubicándose entre los 2,180 y 1,760 msnm.

En la zona baja se concentran la deposición de materiales en el río, la altitud se encuentra entre 1,560 y 1,780 msnm, lo que indica una menor superficie en la microcuenca con 1,102.99 ha. (Figura 9).

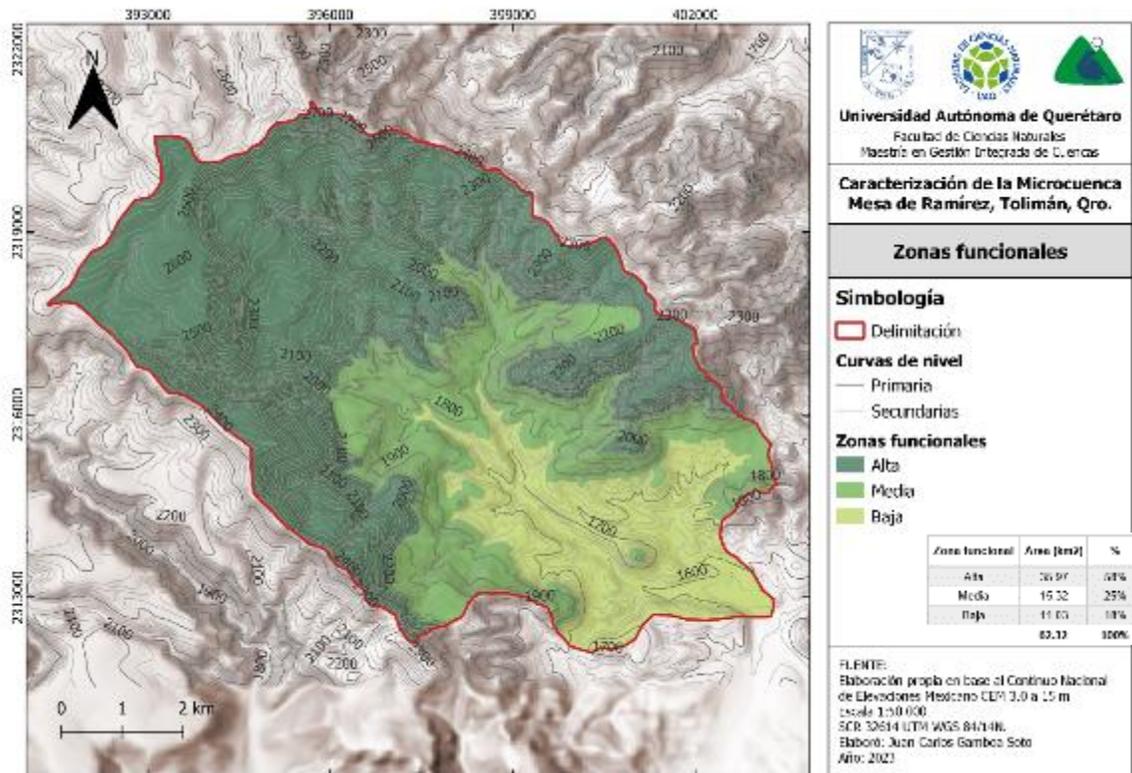


Figura 9. Mapa de zonas funcionales y orden de cauces.
 Fuente: Elaboración propia a partir de datos del INEGI (2013).

5.4 Hidrología

La microcuenca se ubica en la Región hidrológica N° 26 de Pánuco (RH26), y pertenece a la cuenca del Río Moctezuma (D) y a la Subcuenca del Río Pánuco. Posee una red hídrica de sexto orden, con una relación de bifurcación de 3.14 y una alta densidad de drenaje de 4.15 km/km². Esto le confiere a la microcuenca una estructura de drenaje eficiente, con un tiempo de concentración de 0.15 horas (8.90 minutos), lo que indica su capacidad para evacuar rápidamente el agua generada por una precipitación extrema hacia su exutorio. (Figura 10).

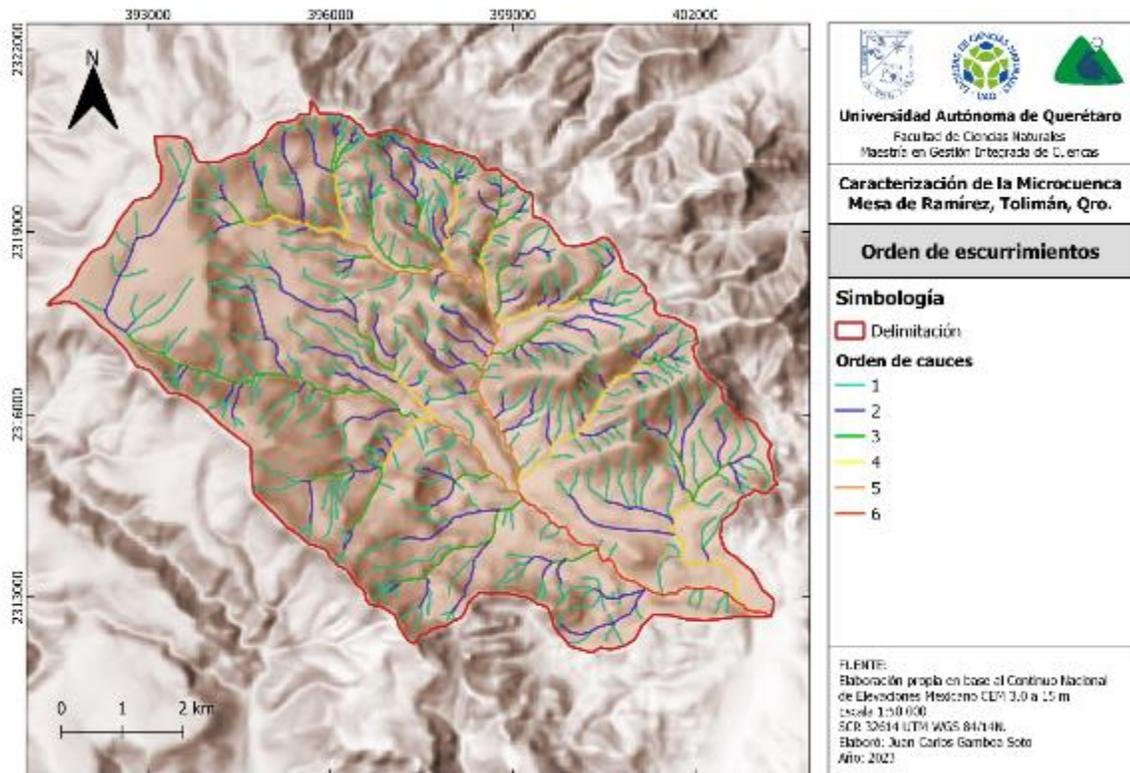


Figura 10. Orden de escurrimientos.

Fuente: Elaboración propia a partir de curvas de nivel del modelo digital de elevación.

La microcuenca se clasificó como endorreica con drenaje dendrítico, el cual es colectado por un cauce mediano principal con una longitud de 16.67 kilómetros y una pendiente de 8.55 % que se puede apreciar en el perfil longitudinal, identificando un relieve poco accidentado (Ver figura 11). Esto sugiere que la cuenca experimenta erosión y transporte de sedimentos, los cuales se acumulan en su zona media y baja.

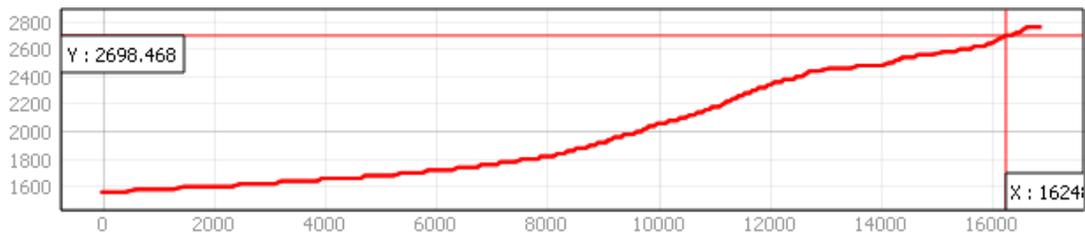


Figura 11. Perfil longitudinal del cauce principal.

Fuente: Elaboración propia

5.5 Aspectos demográficos

La microcuenca comprende de dos delegaciones; la delegación de higuierillas y Sabino de San Ambrosio, donde existen 29 localidades de las que 27 se encuentran pobladas por 5,950 habitantes, de los cuales 3,234 son mujeres que representan el 54 % del total de la población y 2,716 son hombres con el 46 %. Las localidades con mayor número de habitantes son Casa blanca, Los González, Bomintzá, Mesa de Chagoya, Mesa de Ramírez y Sabino de San Ambrosio. (Ver cuadro 7).

Cuadro 7. Población de la microcuenca.

No	Localidad	Mujeres	Hombres	Total	Viviendas
1	Bermejo	8	6	14	5
2	Bomintzá	343	250	593	173
3	Casa Blanca	388	344	732	216
4	Ciprés	42	62	104	30
5	El Aguacate	1	1	2	3
6	El Cerrito Parado	347	245	592	167
7	El Madroño	38	30	68	21
8	El Puertecito	2	5	7	3
9	El Saucito	67	86	153	47
10	El Sauz	4	2	6	2
11	El Shaminal	59	56	115	32
12	El Tule	232	220	452	139
13	El Zapote (de los Uribe)	7	8	15	6
14	Familia Montes	5	6	11	5
15	García	3	3	6	3
16	La Cuchara	5	5	10	6
17	La Peñita	29	24	53	10
18	La Presita	65	60	125	35
19	La Víbora	10	9	19	5
20	Lomas de Casa Blanca	99	82	181	54
21	Los González	318	284	602	156
22	Maguey Manso	155	155	310	103
23	Mesa de Chagoya	102	99	201	59
24	Mesa de Ramírez	385	299	684	212
25	Ojo de Agua	3	2	5	2
26	Puerto Blanco	191	151	342	86
27	Sabino de San Ambrosio	326	222	548	181
TOTAL		3,234	2,716	5,950	1,761
PORCENTAJE		54 %	46 %		

Fuente: Elaboración propia a partir del Censo y conteo de población y vivienda INEGI (2020).

El municipio de Tolimán está localizado en la región otomí Chichimeca del semidesierto de Querétaro y Guanajuato, de acuerdo con el catálogo de localidades indígenas de la Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas (CDI, 2010) Dentro de la zona casi en su totalidad están conformadas por comunidades otomíes originarias, quienes conservan en buena medida sus costumbres y sus tradiciones, entre ellas su lenguaje, que es la lengua indígena más hablada (INEGI, 2020). La localidad de Mesa de Ramírez cuenta con 723 pobladores indígenas y Casa Blanca con 651 personas, las cuales ocupan el segundo y tercer lugar respectivamente con la mayor población indígena del municipio.

5.6 Aspectos Culturales y ambientales

Para conocer más sobre las creencias religiosas que surgieron de la fusión entre el catolicismo español y las tradiciones indígenas, se pueden visitar diversos templos en el municipio, como los de San Pedro, San Pablo y la Capilla de San Miguel. En esta última se celebra la festividad más importante de Tolimán en honor a San Miguel Arcángel. Las celebraciones comienzan en julio e incluyen danzas, rezos, y el 27 de septiembre se realiza el levantamiento de El Chimal, una estructura de más de 20 metros adornada con cucharilla, flores y alimentos. Esta festividad, de origen otomí, es parte del Patrimonio Cultural Inmaterial.

Es importante analizar las zonas de la cuenca, identificando áreas propensas a la erosión, así como el grado de avance y las fuentes potenciales de contaminación. La instalación de humedales artificiales puede ser estratégica para mitigar estos impactos dentro la microcuenca y de esta manera comprender y gestionar adecuadamente los suelos y prevenir la degradación del terreno.

Para determinar el grado de erosión se utiliza la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) desarrollada por Wischmeier (1976), este modelo que permite estimar la erosión actual y potencial de los suelos dentro de una microcuenca.

De acuerdo a los resultados que se obtuvieron, se pudo identificar que el 61% de la microcuenca presenta un grado de erosión moderado con 37.7 km², el 24 % presenta una erosión alta en las partes altas de la microcuenca con un área de 14.7 km², el 15 % presenta una erosión muy alta en la zona donde se encuentran establecidas las localidades con una extensión de 9.8 km². (Figura 12).

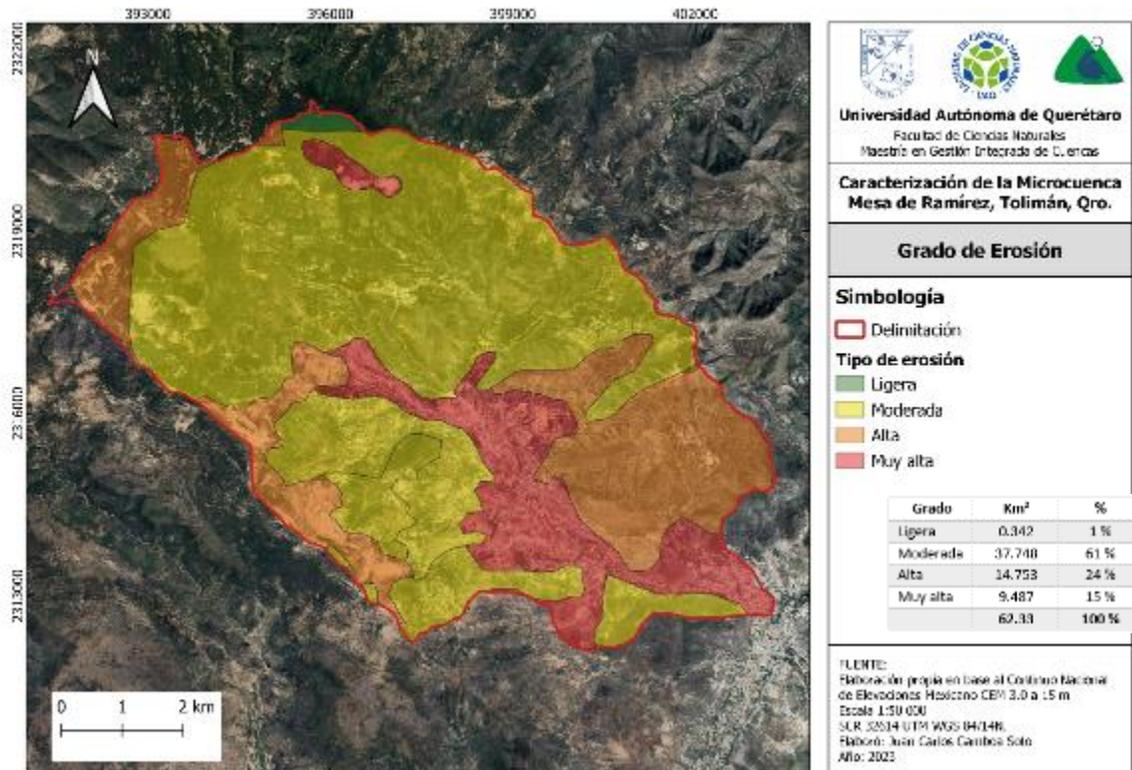


Figura 12. Mapa de erosión potencial.
 Fuente: Elaboración propia a partir de datos del INEGI (2013).

6 Métodos y herramientas

Para realizar el presente estudio de investigación, se toma como base una metodología fundamentada en tres etapas críticas: el diagnóstico, la planeación y la propuesta. En la etapa de diagnóstico, se realizó una evaluación exhaustiva del contexto y se identificaron las necesidades y problemas clave mediante el análisis de datos cualitativos y cuantitativos.

A continuación, en la fase de planeación, se desarrollaron estrategias y planes de acción específicos que buscan abordar las problemáticas identificadas, utilizando enfoques teóricos y prácticos que aseguraron la efectividad y viabilidad de las soluciones. Finalmente, en la etapa de propuesta, se presentan las soluciones diseñadas de manera detallada, incluyendo los recursos necesarios, el cronograma de implementación y los indicadores de éxito (Figura 13).

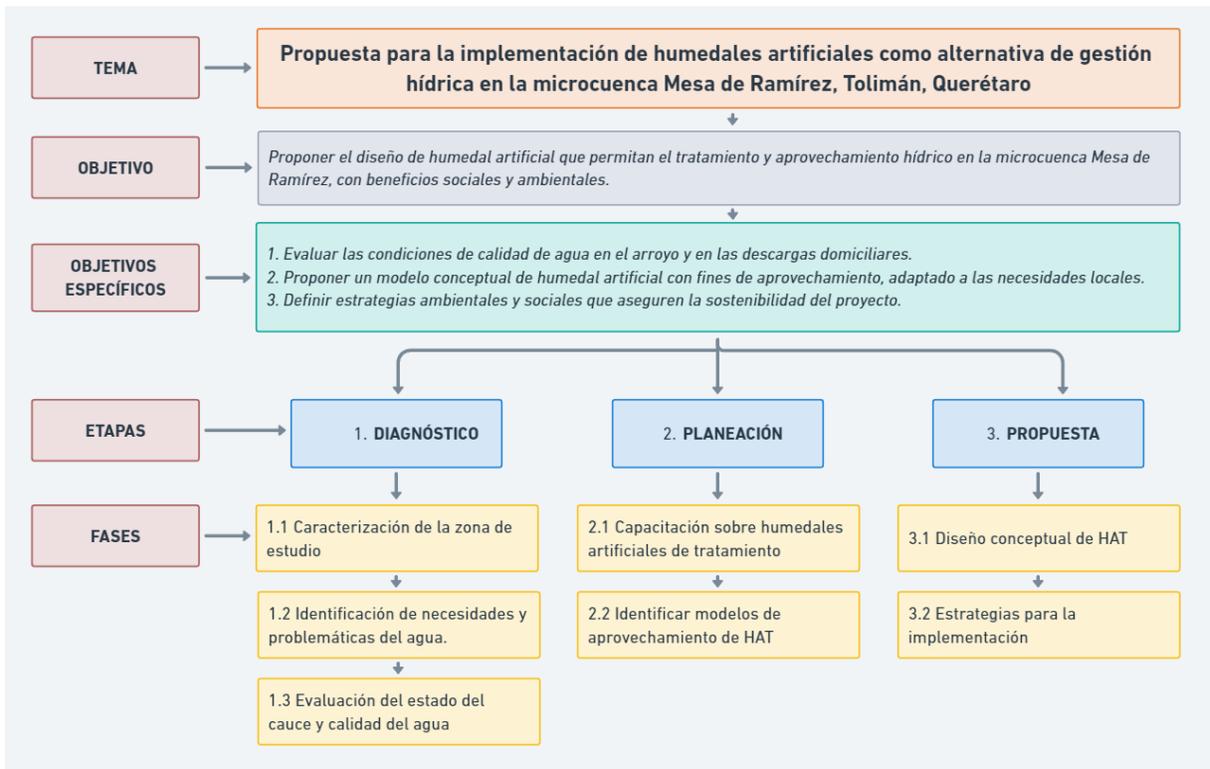


Figura 13. Metodología del estudio.
Fuente: Elaboración propia.

6.1 Diagnóstico

Esta primera etapa se obtiene un conocimiento en contexto al territorio, así como un acercamiento a la problemática en base a datos existentes y la recopilación de información en campo. Desde la caracterización de la zona de estudio, recorridos exploratorios, evaluaciones y muestreos para determinar el estado actual que presenta el arroyo, los manantiales y descargas de agua en la comunidad.

6.1.1 Caracterización de la zona de estudio

Como primera fase se determinan las características de la zona de estudio, por medio de la recolección de información sobre características biofísicas como la delimitación del área de la microcuenca, la elevación, aspectos climatológicos, hidrológicos, edafológicos, demográficos y económicos, con información obtenida de fuentes como INEGI, CONABIO, CONAGUA, SEMARNAT, entre otros. Se sintetiza la información por medio de tablas de datos sobre la clasificación de la población, áreas predominantes de uso de suelo y vegetación y los parámetros morfométricos de la cuenca.

Para la elaboración de las cartografías digitales se emplea la plataforma de sistemas de información geográfica (SIG) empleando el software Qgis versión 3.16.16, para obtener salidas cartográficas de localización, tipos de suelo, uso de suelo y vegetación, orden de los cauces, las zonas funcionales y el grado de erosión dentro la microcuenca de estudio.

En cuanto al trabajo de campo es necesario optimizar los recursos disponibles y determinar una comunidad para realizar esta intervención, en este sentido se elige la comunidad de Bomintzá, ya que se localiza en la parte más alta de la microcuenca, es la de mayor población ubicada en esta zona alta y cuenta con manantiales intermitentes que proporciona agua a la zona.

6.1.2 Identificación de las necesidades y problemáticas del agua

La segunda fase consiste en conocer las necesidades que tienen las personas respecto al tema hídrico, para lo cual se llevaron a cabo dos visitas exploratorias, la primera en enero de 2022 por medio de una reunión con el delegado de la localidad el C. Julio César Sánchez Morales (Figura 14 A) con quien se abrió un dialogo para exponer las situaciones de la localidad referente al tema del agua, así mismo se planteó el tema a investigar para validar la viabilidad de la intervención y acordar una fecha para convocar a una reunión informativa con las personas de la localidad. Posteriormente se realizó un recorrido exploratorio con tres personas de la localidad para conocer los manantiales más cercanos (Figura 14 B) así como el arroyo (Figura 14 C).



Figura 14. Fotografías de la primera visita a la localidad de Bomintzá.
A) Reunión con delegado B) Recorrido al manantial con personas de la comunidad C) Recorrido al arroyo contaminado

En ese primer momento se aprovechó la oportunidad para ir construyendo el mapeo de actores clave, donde se preguntó con el delegado y los habitantes sobre algunas instituciones u organismos que participen en la localidad y con quienes se podría vincular el estudio, e informaron en la escala local sobre el apoyo de las autoridades locales, en ese caso delegado y subdelegado, así como también un comité existente para organizarse respecto a cualquier tema que surja en la localidad.

Se realizó una segunda visita donde se convocó a los pobladores a una reunión informativa en la localidad con el fin de dar a conocer el estudio e invitar a participar en los próximos talleres (Figura 15 A), para lo cual se notó interés en la participación de la mayoría de las personas y se realizó un formato de conformación de grupo compuesto por 20 personas anotadas para realizar las actividades programadas en el estudio (Figura 15 B).

Ese momento de la reunión coincidió con un grupo de trabajo del instituto queretano de la mujer (IQM) con quienes se habló sobre vincular objetivos compartidos en los proyectos, después se intercambiaron los datos para concretar una reunión con la directora municipal de la institución (Figura 15 C).

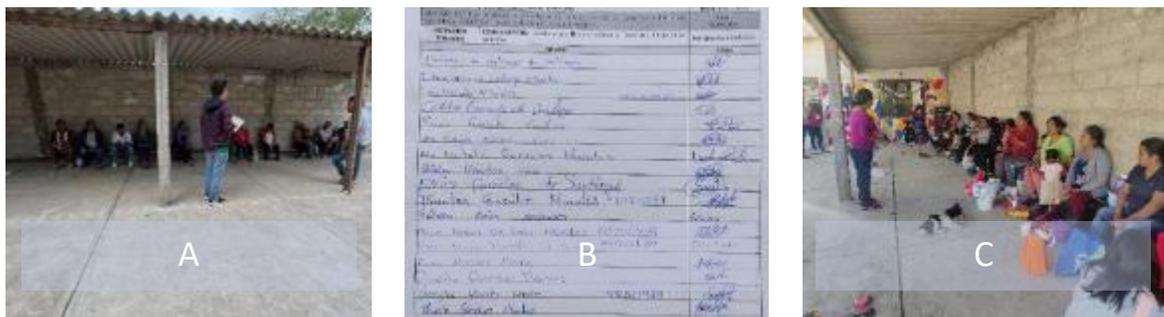


Figura 15. Segunda visita para formación de grupo
. A) Reunión informativa B) Conformación de grupo C) Vinculación IQM.

Teniendo este primer contacto, se convocó a la comunidad a través de un grupo de WhatsApp a un primer taller sobre mapeo comunitario con la finalidad de detectar las necesidades y problemáticas respecto al tema del agua en la comunidad de Bomintzá.

Al taller asistieron 20 personas y se formaron cuatro equipos de cinco personas para realizar el mapeo de la comunidad donde se asignaron un mapa diferente a cada equipo: mapa base comunitario, mapa de línea del tiempo del agua, mapa de actores locales y el mapa de conflictos (Figura 16).



Figura 16. Primer taller de Mapeo comunitario.

Posterior a ese momento se identifican las necesidades y problemáticas existentes respecto al tema del agua por medio de una matriz FODA, para contextualizar la situación a partir de cuatro marcos de análisis: Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas.

Se realizó un taller dirigido a los habitantes de la comunidad de Bomintzá, de los cuales asistieron 20 personas y se empleó el instrumento de cartografías sociales, lo cual facilitó la explicación a los participantes de diferentes edades.

6.1.3 Evaluación del estado del cauce y calidad del agua

La tercera fase consistió en realizar una valoración ambiental de la ribera fluvial con algunos habitantes de la localidad como parte de un recorrido que inició desde el manantial ubicado en la parte alta, hasta la zona de descarga de los lavaderos en la parte baja, con el fin de conocer el estado ecológico para proponer acciones de restauración y conservación. Para determinar los puntos de evaluación y muestreo se consideraron los siguientes criterios:

- **Accesibilidad:** Los puntos se deben encontrar en un lugar de fácil acceso ya sea vehicular o peatonal que faciliten la manipulación del equipo necesario para el muestreo.
- **Seguridad:** Los puntos deben garantizar la seguridad de quienes obtendrán los datos, minimizando cualquier situación que ponga en riesgo su integridad

como lesiones, situación de estrés física y mental, exposición a contaminantes perjudiciales a la salud, entre otros.

- Frecuencia de uso: El punto de muestreo debe ser un lugar de uso común donde los habitantes de la localidad realicen actividades cotidianas relacionadas a los cuerpos de agua.

Para realizar esta evaluación se llevó a cabo el segundo taller, donde participaron 20 personas de las cuales 17 eran mujeres y 3 hombres con un rango de edad desde los 22 a 65 años, todos eran habitantes y dos autoridades locales, con el taller se tuvo un acercamiento para evaluar la calidad del agua del arroyo por medio de un monitoreo participativo con la población, donde se realizó un recorrido desde la parte alta en el manantial principal (Ver figura 17 A) la zona de lavado (Ver figura 17 B), y los escurrimientos derivados de la zona de lavado (Ver figura 17 C).

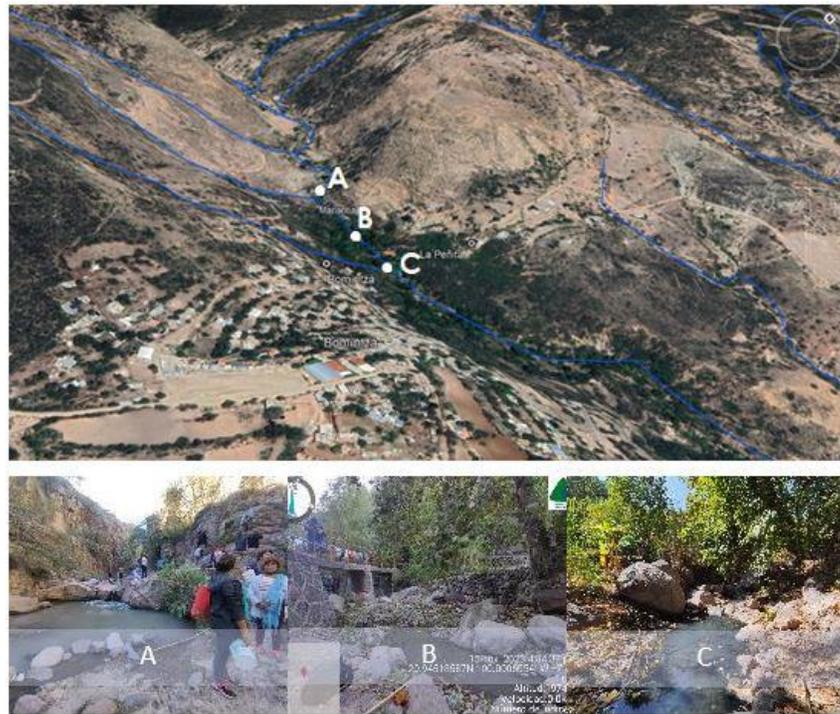


Figura 17. Puntos de localización de evaluación.
A) Zona de manantial B) Zona de lavado C) Zona de descargas o escurrimientos.

Para llevar a cabo la evaluación y registrar los datos, se implementaron instrumentos que permitieran a las personas sin un conocimiento especializado estimar la calidad del arroyo, empleando sus sentidos y conocimiento local, para lo que se utilizaron herramientas como tablas de registro, turbidímetro, cinta métrica, termómetro, gps y cámara

Los instrumentos empleados para la evaluación se describen a continuación:

1. Caracterización del arroyo, adaptado de la hoja de datos de campo de la caracterización física de calidad del agua del protocolo de bioevaluación rápida para uso en arroyos y ríos de Barbour *et al.* (1999) que considera la descripción de 11 parámetros presentes en la zona, como las condiciones climáticas, la localización del sitio, la caracterización del arroyo, características de la cuenca, vegetación riparia, características del arroyo, vegetación acuática, madera y raíces, calidad del agua, sedimento y su composición.
2. El índice de calidad de riberas (Riparian Quality Index), basado en González *et al.* (2006), evalúa la estructura y dinámica de las riberas fluviales a partir de la hidrología y geomorfología. Este índice considera siete atributos que son fáciles de identificar visualmente: la continuidad longitudinal de la vegetación, el ancho de la vegetación asociada al cauce, la composición y estructura de la vegetación riparia, la regeneración natural de especies leñosas, el estado de las orillas, la conectividad transversal entre el cauce y sus riberas y llanuras de inundación, y la conectividad vertical mediante la permeabilidad y el grado de alteración de los suelos riparios. La valoración se realiza por tramo fluvial y por atributo, el cual describe un estado supuesto junto con una ponderación determinada, al final la suma de los valores indican el Rango de valores del RQI, señalando el estado de la ribera, su condición ecológica y las estrategias de gestión.
3. Muestreo *in situ* para determinar las variables físicoquímicas del agua, siguiendo el procedimiento para la obtención de muestras, adaptado **de**

Barbour et al. (1999), se colectaron cuatro muestras tomadas de dos manantiales, y dos descargas para su análisis posterior con el equipo de instrumentación de química analítica del laboratorio de agua y suelo de la maestría en gestión integrada de cuencas y la Unidad de Servicio Químico.

Primero, se realizó una reunión previa con los asistentes para ver la importancia del monitoreo participativo aplicado en el arroyo, se explicaron las metodologías y el registro de los formatos de obtención de datos.

Posteriormente se realizó el recorrido para el monitoreo iniciando en la parte alta de la localidad donde se encuentra el manantial, la zona de lavado en la parte media, el escurrimiento o descarga de lavado en la parte baja y por último descarga de un domicilio en la localidad.

6.2 Planeación

En esta segunda etapa se realiza un proceso de apertura a diferentes puntos de vista involucrados, empleando métodos cualitativos y participativos para elaborar estrategias de forma conjunta que permitan comprender el contexto local y las características técnicas, respecto al sistema de tratamiento a emplear.

6.2.1 Capacitación sobre humedales artificiales para el tratamiento de aguas

Primero se realizó una capacitación sobre los humedales artificiales, en un formato teórico práctico para una mejor comprensión por parte de la mayoría de los asistentes, donde se expuso el funcionamiento, los componentes, la construcción, operación y mantenimiento del sistema.

En apoyo a lo previamente explicado se empleó una maqueta para visualizar los componentes y trayectoria de flujo del agua, así como una práctica utilizando

diferentes materiales para ejemplificar con los procesos de tratamiento que ocurren en el humedal como flotación, sedimentación, floculación, filtración, absorción, adsorción y filtración UV.

También se realizó una dinámica para que cada participante dibujara un diagrama de flujo del agua y los usos que se le da en los hogares, con el fin de identificar el tipo de agua residual, el volumen y la calidad final requerida.

Por último, se elaboró junto con los participantes un biofiltro a pequeña escala con materiales reutilizados y posteriormente se instaló en la descarga de un fregadero con la finalidad de familiarizarse con los componentes y funcionamiento del sistema de tratamiento.

6.2.2 Identificación de modelos de aprovechamiento de los humedales artificiales.

En la quinta fase consiste en la identificación de modelos de humedales potenciales para un aprovechamiento. En el mismo taller se enlista la vegetación que se registró anteriormente en el arroyo, junto con algunas otras propuestas acorde a las actividades realizadas en la zona y los intereses de las personas.

Por medio de una tabla de análisis de beneficios se describen algunas características relevantes de la vegetación como las partes aprovechables, la forma de utilización, cantidad de cosechas anuales, valor ecológico, económico y cultural.

Posteriormente se evalúa con el grupo las propuestas mediante una matriz de evaluación que permite determinar la factibilidad de las diferentes opciones consideradas.

6.3 Propuesta

Una vez que se obtuvo información respecto a la caracterización de las aguas residuales y el modelo de aprovechamiento se realizó una propuesta para el modelo de humedal de tratamiento.

6.3.1 Diseño conceptual de un humedal artificial

La sexta fase consiste en realizar el diseño conceptual, para esto se realiza el dimensionamiento del sistema, tomando como referencia el modelo P-k-C* basado en Kadlec y Wallace, (2009), que consiste en una ecuación cinética que incluye el tipo de humedal para tratamiento (horizontal o vertical), los aspectos físicos del sistema (longitud, ancho y profundidad efectiva de la celda, así como la porosidad del sustrato), datos operativos (concentraciones de contaminantes afluentes y efluentes, velocidad de flujo, la temperatura del agua del efluente), así como los parámetros que se estiman.

En este sentido es necesario el apoyo de algunas herramientas como los generadores de área y de obra realizados en hojas de cálculo en Excel, así como el modelado del diseño final que se realiza a través de un render 3D utilizando el software de SketchUp Pro 2022.

6.3.2 Estrategias para la implementación

La séptima fase se describen los requerimientos necesarios para la implementación de los humedales considerando tres ejes principales: Acción participativa, capacitación y propuesta integral.

La acción participativa tiene como objetivo involucrar a la comunidad en todas las etapas del proceso, desde la planificación hasta el mantenimiento del humedal, además incluye la integración de otros actores externos que pudieran beneficiar el

estudio. La integración incluye reuniones informativas, talleres participativos y la creación de comités o grupos de trabajo.

La capacitación forma parte de proporcionar educación ambiental a los miembros de la comunidad para demostrar la importancia de los humedales y cómo contribuyen a mejorar la calidad del agua y la biodiversidad local.

La propuesta integral se basa en que el HAT cumpla otras funciones aparte del tratamiento del agua, además se consideran puntualmente aspectos técnicos, ambientales y sociales:

En el aspecto técnico se consideró la localización, considerando las descargas de aguas residuales domésticas, topografía del terreno, tipo de suelo, instalaciones subterráneas, carga orgánica, sistemas adicionales, horas de sol para las plantas, destino de uso y mantenimiento.

En el aspecto ambiental se revisaron que los materiales de construcción no tuvieran residuos contaminantes, el aislamiento de la estructura con el suelo, requerimientos de la vegetación, funciones ecosistémicas y monitoreo frecuente.

En la parte social se consideraron temas como la modificación de hábitos en la utilización de productos nocivos, colocación y limpieza de filtros de sólidos para disminuir la carga orgánica.

7 Resultados

De acuerdo a la metodología empleada, se presentan los resultados obtenidos en el estudio, en relación a los tres objetivos específicos planteados: 1) Conocer las necesidades hídricas y calidad del agua 2) Proponer un modelo conceptual de humedal artificial con fines de aprovechamiento adaptado a las necesidades locales. 3) Definir estrategias ambientales y sociales que aseguren la sostenibilidad del proyecto.

7.1 Conocer las condiciones de la microcuenca en el tema hídrico

Se realizaron diferentes talleres en la comunidad para tratar diferentes temas y realizar las actividades planeadas, en el anexo 2 se presenta la carta descriptiva del primer taller impartido, así como las listas de asistencia en el anexo 3.

En el primer taller se conocieron las percepciones y prácticas de la comunidad en relación con el uso y manejo del agua con el fin de comprender mejor los desafíos y oportunidades en la gestión hídrica local, al mismo tiempo se evaluó la calidad de agua y estado del arroyo.

7.1.1 Cartografía social

En este taller cada equipo explicó su mapa con los demás participantes donde se encontraron aspectos relevantes en cada mapa.

El primer equipo expuso el mapa base comunitario, donde dibujaron la distribución de la comunidad con los elementos más característicos del lugar como la iglesia, el chimal, el manantial, la casa de usos múltiples, la cancha de deporte, señalando aspectos de los que sienten orgullo y los que necesitan mejorar.

El segundo equipo dibujó el mapa de línea del tiempo donde colocaron como era la vida antes, después y como creerían que sería en un futuro en relación al tema del agua. Este mapa incluía las actividades que realizaban anteriormente como ir al

manantial a nadar, el cultivo de huertas familiares, mayor cantidad de ganado, la existencia de un arroyo más prominente y la disponibilidad de agua en la comunidad.

Por otro lado, señalaban que actualmente ya no pueden tener acceso a toda esa agua y que ahora se tienen más sequías, escasez de agua, ya no se siembra y las personas tienen que buscar otras formas de empleo fuera de la comunidad. La proyección futura es alentadora porque plasman una localidad con más árboles, mayor unión con los habitantes, mayor abundancia de agua y más oportunidades de autoempleo.

El tercer equipo realizó el mapa de actores locales, donde localizaron algunas instituciones que han intervenido en la comunidad en relación al tema hídrico como la asistencia técnica para el bombeo de la comisión estatal de aguas (CEA) la secretaría de desarrollo agropecuario municipal (SEDEA), quienes intervienen regularmente con programas de desarrollo de capacidades en las localidades, también mencionó que el instituto Queretano de la mujer (IQM) que actualmente imparten unos talleres sobre baños secos, al igual que el DIF estatal con la captación de agua de lluvia, el centro coordinador de pueblos indígenas (CCPI) con quienes también han trabajado anteriormente en temas culturales igualmente se mencionó que han llegado algunas ONG que no recuerda su nombre pero han participado con apoyos para la vivienda.

Por otro lado, se identificaron a las instituciones con las que han trabajado con anterioridad como la Comisión Nacional de Aguas (CONAGUA), la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) y la secretaría del medio ambiente y recursos naturales (SEMARNAT)

Esta actividad permitió complementar el mapa de actores clave en la comunidad donde se identificó que han participado en su mayoría instituciones del sector público pertenecientes a gobierno, en donde se han involucrado por medio de programas de asistencia y atención técnica puntual, aunque exista una alta

influencia en el saneamiento no existe una disposición considerable para involucrarse en los proyectos.

Por otro lado actualmente se tiene disposición de participar por parte de los habitantes, quienes se les considera influyentes en el saneamiento por gestionar sus descargas de aguas residuales, también está la presencia del equipo de la Universidad Autónoma de Querétaro por llevar a cabo el presente estudio, conformado por el equipo de sínodos y personal técnico en laboratorio, por otro lado se considera la presencia de organizaciones no gubernamentales que financian proyectos de saneamiento y con quienes se pueden tener alianzas futuras (Ver figura 18).

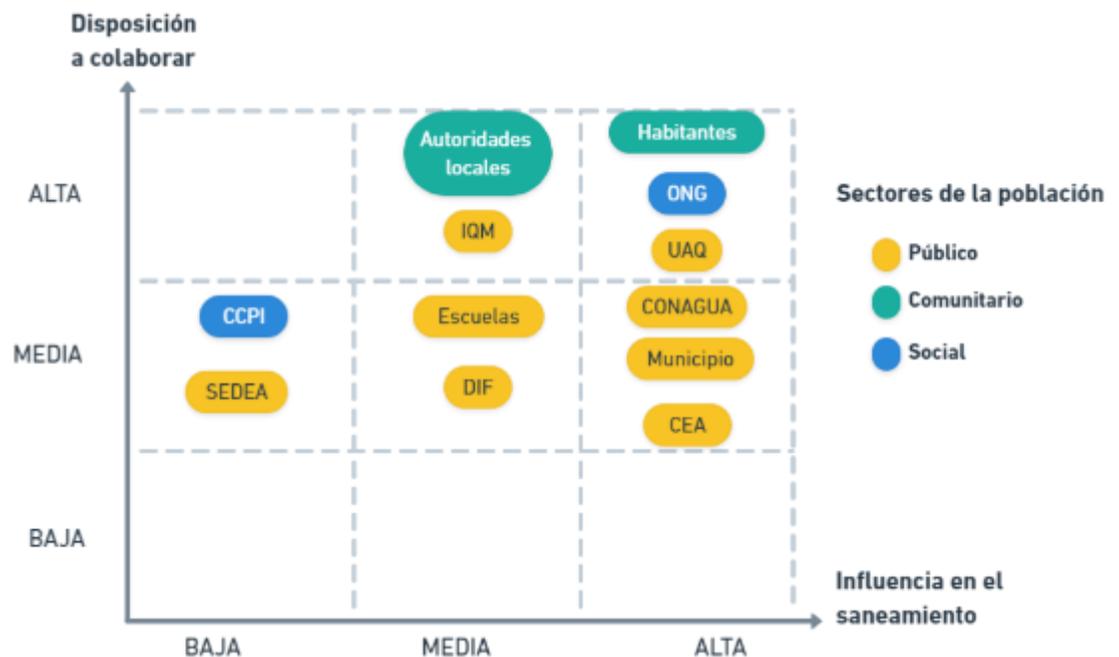


Figura 18. Mapeo de actores clave acorde a la disposición en colaborar y en la influencia respecto al saneamiento.

El cuarto equipo dibujó el mapa de conflictos en la localidad donde expusieron algunas situaciones presentes que han sucedido como la contaminación por residuos en las calles y el cauce del arroyo, quema de basura, tala de árboles.

Además, se identificaron los puntos de contaminación del agua dentro del cauce del mismo arroyo.

Para sintetizar los resultados de esta actividad se realizó un listado de diferentes aspectos presentes en la localidad que se analizaron por medio de la herramienta matriz FODA, con lo cual se abordaron las características positivas internas, refiriéndose a las fortalezas y externas a las oportunidades, así como también las características negativas internas como debilidades y externas como amenazas (Cuadro 8).

Cuadro 8. Matriz FODA respecto a la percepción del agua

MATRIZ FODA		
Descripción de la problemática: La comunidad con frecuencia tiene una falta de suministro de agua y a causa de ello utilizan el cauce del arroyo para lavar, lo cual ocasiona su contaminación. Esto limita que las personas que viven más abajo no puedan aprovechar esta fuente escasa de agua.		
	Circunstancias positivas (Factores de éxito)	Circunstancias negativas (Factores de Riesgo)
Circunstancias internas <i>(Depende de posibilidades propias)</i>	FORTALEZAS - La localidad cuenta con manantiales de agua. - Es la localidad más alta de la zona. - La contaminación del arroyo solo es por detergentes. - Existen comités para tratar temas comunales. - La mayor parte de la población son mujeres. - Existen prácticas de reúso de agua - La topografía tienen pendientes que benefician el flujo del agua	DEBILIDADES - A falta de un suministro de agua, muchas personas acuden a lavar en el arroyo. - No hay hábitos de limpieza de áreas comunes en la localidad.. - Los jóvenes y hombres participan muy poco en las actividades. - Es difícil organizar a la mayoría de la población en proyectos colectivos. - Condicionamiento de participación por incentivos.
Circunstancias externas <i>(Depende de factores ajenos)</i>	OPORTUNIDADES - Capacitaciones por parte de instituciones de gobierno. - Hay un proyecto del IQM de saneamiento con baños secos el cual puede ser vinculado. - Existen planes gubernamentales para impulsar el saneamiento. - Zona de población indígena donde hay instituciones que promueven el desarrollo.	AMENAZAS - Existen sequías frecuentes en la región - El arroyo se ha secado en temporadas de sequía. - La zona presenta alto grado de erosión. - No hay un seguimiento constante en los programas por parte de las instituciones. - Las autoridades pueden insertar un sistema de alcantarillado que concentre las aguas residuales en el arroyo. - Tiempos de instituciones ligadas a la agenda política

Fortalezas

Manantiales de agua local: Existe un manantial en la comunidad que garantiza el suministro natural y potencialmente limpio de agua que la comunidad requiere para realizar actividades de la vida diaria.

Ubicación geográfica privilegiada: Por su ubicación, la localidad de Bomintzá es la más alta de su zona lo que le dota de una posición privilegiada para obtener las primeras aguas que brotan de los manantiales.

Contaminación limitada del arroyo: Aunque se reconoció que hay contaminación por detergentes, ésta parece ser el único contaminante identificado y en las estrategias de tratamiento y saneamiento podrá ser bien manejable con una sola estrategia.

Estructura comunal organizada: La existencia de comités para el tratamiento de los asuntos comunales sugiere un grado de organización y de participación ciudadana del que se podría sacar un gran provecho.

Demografía predominante femenina: La mayor parte de la población femenina puede impulsar la gestión del agua en la comunidad, dadas las tendencias globales que muestran la eficacia de las mujeres en la gestión de recursos y la toma de decisiones sustentables.

Prácticas de reúso del agua: Indican una conciencia sobre la importancia de conservar el recurso y pueden formar la base de estrategias de educación y difusión de prácticas sustentables más amplias.

Topografía favorable: Las pendientes facilitan el flujo natural del agua, lo que puede ser un activo para el diseño eficiente de sistemas de captación y distribución de agua.

Oportunidades

Capacitaciones gubernamentales: La disponibilidad de programas de capacitación puede fortalecer de manera local las habilidades en gestión del agua y saneamiento.

Proyecto de saneamiento con baños secos del IQM: Representa una iniciativa concreta para mejorar el saneamiento y puede servir como un proyecto piloto expandible a toda la comunidad.

Planes gubernamentales de saneamiento: Indican un marco de apoyo para iniciativas locales que busquen mejorar la gestión del agua y el saneamiento.

Apoyo a comunidades indígenas: Las instituciones que promueven el desarrollo en zonas indígenas pueden ser aliadas valiosas en la consecución de recursos, formación, y apoyo técnico.

Debilidades

Lavado de ropa en el arroyo: Esta práctica puede contribuir a la contaminación del agua y disminuir su calidad para otros usos.

Falta de limpieza de áreas comunes: Indica un desafío en la promoción de responsabilidad ambiental colectiva y en la gestión de residuos.

Baja participación masculina y juvenil: Limita la mano de obra y la diversidad de perspectivas en las iniciativas de gestión del agua.

Dificultades en la organización comunitaria: Obstaculiza la implementación de proyectos colectivos de largo plazo y la gestión eficiente del agua.

Falta de incentivos para la participación: Sugiere la necesidad de diseñar estrategias que motiven la participación comunitaria en proyectos de agua.

Amenazas

Sequías frecuentes: Ponen en riesgo el suministro de agua y exigen estrategias de conservación y gestión eficaz del recurso.

El arroyo tiende a secarse en temporada seca: Al no haber caudal, no se pueden realizar las actividades que dependen del arroyo.

Degradación ambiental: Amenaza la sustentabilidad de los recursos naturales, incluido el agua.

Falta de seguimiento en programas: Puede llevar a la discontinuidad de proyectos y la pérdida de beneficios a largo plazo.

Riesgo de implementación de sistemas de alcantarillado inadecuados: Podría empeorar la calidad del agua del arroyo y afectar negativamente a la comunidad.

Cumplimiento de normativas de calidad del agua: Es crucial para la aprobación de proyectos y el acceso a fondos, pero puede ser un desafío dada la situación actual.

Agendas políticas: La dependencia de las agendas políticas para la implementación de programas puede resultar en incertidumbre y retrasos en la acción.

Análisis

La comunidad de Bomintzá cuenta con una sólida plataforma de fortalezas y oportunidades para mejorar el manejo de agua y enfrentar sus debilidades y amenazas. La clave del éxito descansará en la habilidad para movilización de sus recursos internos (como la organización comunitaria y prácticas de reúso de agua), aprovechar las oportunidades externas (como las de capacitación y apoyo gubernamental), y diseñar estrategias innovadoras que aborden tanto las deficiencias internas como las amenazas externas, especialmente aquellas relacionadas con la variabilidad climática y los retos de manejo ambiental.

obteniendo los siguientes aspectos relevantes en el tema hídrico:

- Se requiere de un abasto de agua más continuo por parte de la Comisión Estatal de Aguas (CEA), ya que el suministro hasta esta comunidad, localizada en la zona más alta requiere de un bombeo el cual se realiza cada mes y en ocasiones un poco más.

- Se tiene la necesidad de un almacenamiento de mayor capacidad para la localidad, ya que el depósito actual es de apenas 50,000 litros, lo cual es insuficiente para abastecer a 600 personas cada mes. Esto equivaldría a un consumo promedio mensual de 83 litros por persona, si no hubiera alguna otra fuente de suministro.
- Las casas de la localidad cuentan depósitos de capacidad limitada para almacenar agua por más tiempo, por lo que cuando hay agua solo los que cuentan con cisternas pueden tener un suministro considerable y los demás tienen que improvisar con cubetas y botellas para resguardar el líquido.
- Se requiere de un manejo adecuado de los manantiales, ya que existen al menos cuatro que son empleados para abastecer las necesidades básicas de las personas en temporadas de desabasto y estos no cuentan con la limpieza requerida, además de que se realizan prácticas inocuas como usar de baño y lavado de ropa, lo cual puede alterar significativamente la calidad del agua.
- Se requiere de un tratamiento de las aguas que escurren de una de las pozas que es utilizada como zona de lavado y regadera, la cual concentra aguas abajo los nutrientes y contaminantes de los productos empleados, esto ocasiona malos olores y contaminación del agua, la cual ya no se puede usar río abajo.

7.1.2 Evaluación de calidad de agua y estado del arroyo

El arroyo juega un papel importante en la comunidad, ya que es el lugar donde los habitantes realizan diversas actividades cuando hay desabasto o sequía, sin embargo, las actividades que se desarrollan lo hacen vulnerable a la contaminación,

lo que provoca la modificación físico-química del agua e imposibilita la autodepuración, haciendo inviable la reutilización.

En este sentido es importante evaluar las condiciones del agua, así como el estado de conservación del arroyo, desde la parte alta donde inicia el cauce, en la parte media donde se aprovecha para lavar y en la parte baja donde los escurrimientos del lavado son acumulados.

Estas evaluaciones consisten en la caracterización física del arroyo (Ver anexo 4), donde se empleó el instrumento de índice de calidad de las riberas (RQI) (Ver anexo 5) y la toma de muestras para su análisis en laboratorio y conocer sus características físico-químicas, obteniendo los resultados siguientes (Ver cuadro 9).

Cuadro 9. Resultados obtenidos de la caracterización, RQI y muestreo en los tres tramos del arroyo de las adjuntas en Bomintzá, Tolimán.

Tramo	Caracterización	Estado RQI	Parámetros
 Manantial principal	<p>Ancho promedio: 5 m. Profundidad: 50 cm. Marca prof. máx: 1.20 m. Cauce: Con corriente Sustrato: Roca madre Vegetación: Álamo, pirul, sauce, encino, carrizo, hierba estrella.</p>	<p><i>REGULAR</i> (74 Pts)</p>	<p><i>Fluoruro:</i> 0.65 <i>Cloruro:</i> 3.30 <i>Sulfato:</i> 2.59 <i>Nitrato:</i> < LC <i>Nitrato:</i> < LC</p>
 Lavaderos	<p>Ancho promedio: 2.5 m. Profundidad: 20 cm. Marca prof. máx: 60 m. Cauce: Represado Sustrato: Roca grande Vegetación: Álamo, sauce, encino, pirul, Cálamo, carrizo.</p>	<p><i>POBRE</i> (41 pts)</p>	<p><i>DQO:</i> 0 <i>COT:</i> 55.3 <i>NT:</i> 1.1</p>

	<p>Ancho promedio: 3 m. Profundidad: 15 cm. Marca prof. máx: 50 m. Cauce: Estancado Sustrato: Roca mediana Vegetación: Álamo, carrizo.</p>	<p>MUY POBRE (16 pts)</p>	<p>DQO: 237 COT: 196.1 NT: 11.4</p>
<p><i>Escurremientos</i></p>			

Fuente: Elaboración propia

Evaluación del tramo 1: Manantial principal

Esta zona representa el nacimiento del arroyo de las adjuntas, está ubicado en la parte más alta del cauce, el origen de sus aguas es por los escurrimientos e infiltración en la época de temporal, lo cual lo hace un arroyo intermitente, el uso de suelo predominante es para agricultura y residencial, las rocas presentan erosión hídrica debido a los escurrimientos en época de lluvia.

De igual manera, en esta zona está presente vegetación riparia con especies como el Álamo (*Populus tremula*), pirul (*Schinus molle*), sauce (*Salix*) Encino (*Quercus ilex*), sobre el cauce crecen plantas emergentes enraizadas como Hierba estrella (*Cyperus pseudovegetus*) y Carrizo (*Phragmites australis*).

En esa zona el ancho del arroyo es de 5 m. la profundidad promedio es de 30 cm, existe una marca máxima de 1.20 m. en general el agua se ve clara, sin olores, predominan las rocas grandes y no se observan depósitos de residuos en el sustrato (Ver Anexo 4).

Respecto a la evaluación obtenida del RQI se obtuvo una puntuación de 74 (Ver cuadro 10), lo cual indica un estado de conservación regular en el arroyo, lo cual es la zona más conservada, ya que se encuentra en la parte alta donde nace y existe una menor intervención humana.

Cuadro 10. Resultados de valoración RQI en el primer tramo del arroyo.

ÍNDICE RQI PARA LA VALORACIÓN DE LAS RIBERAS FLUVIALES EN EL CONTEXTO DE LA DIRECTIVA MARCO DEL AGUA			
Valor RQI	Estado	Condición ecológica	Estrategias de gestión
76-60	Regular	Al menos dos o tres atributos de las riberas están degradados en su funcionamiento y el resto tiene amenazas de degradación (máximo 3 atributos con una puntuación inferior, correspondiente al estado "malo").	Necesidad de restauración para asegurar la funcionalidad hidrológica y ecológica de las riberas

Evaluación del tramo 2: Zona de lavado bajo puente

Esta zona se ubica en la parte media respecto a los demás puntos, tiene mayor concurrencia ya que se realizan actividades para de lavado de ropa y ducho cuando el agua escasea en la localidad.

En las orillas del arroyo se presenta vegetación riparia con especies como el Álamo (*Populus tremula*), pirul (*Schinus molle*), sauce (*Salix*) Encino (*Quercus ilex*), sobre el cauce crecen plantas emergentes enraizadas como el cálamo (*Acorus calamus*) Hierba estrella (*Cyperus pseudovegetus*) y Carrizo (*Phragmites australis*).

El ancho del arroyo es de 2.5 m. tiene una profundidad promedio es de 20 cm, existe una marca máxima de 60 cm. en esta zona se observa turbidez por la presencia de espumas de los jabones, la descoloración de la ropa y la suciedad presente. Alrededor del cauce se observan residuos de empaques de los mismo detergentes y bolsas olvidadas. Respecto al sustrato predominan las rocas medianas.

Respecto a la evaluación obtenida del RQI se obtuvo una puntuación de 41 (Ver Cuadro 11), lo cual indica un estado de conservación pobre en el arroyo, ya que es la zona con mayor intervención humana en la realización de actividades

Cuadro 11. Resultados de valoración RQI en el segundo tramo del arroyo.

ÍNDICE RQI PARA LA VALORACIÓN DE LAS RIBERAS FLUVIALES EN EL CONTEXTO DE LA DIRECTIVA MARCO DEL AGUA			
Valor RQI	Estado	Condición ecológica	Estrategias de gestión
59-40	Pobre	Más de tres atributos de las riberas están seriamente alterados en su funcionamiento y el resto también se encuentra degradado.	Necesidad de rehabilitación y restauración para recuperar la funcionalidad hidrológica y ecológica de las riberas

Evaluación del tramo 3: Esgurrimientos

Esta zona se ubica en el punto más bajo, donde el agua que se emplea para lavar en el punto anterior, escurre y se estanca, debido a la permeabilidad ocasionada por los contaminantes presentes, esto ocasiona la alternación de los parámetros del agua, provocando la contaminación y disminución de la biodiversidad acuática.

En esta zona está presente vegetación riparia con especies como el Álamo (*Populus tremula*), sauce (*Salix*) y el Carrizo (*Phragmites australis*), sobre el cauce es difícil ver crecen plantas que soporten estas condiciones hostiles.

En esa zona el ancho del arroyo es de 3 m. la profundidad promedio es de 15 cm, existe una marca máxima de 50 cm. En esta zona el agua presenta alta turbidez que la tiñe de color negro azulado, con presencia de espuma, grasas y olor a aguas residuales. Predominan las rocas medianas y pequeñas y en el sustrato se observan lodos negros y suelo compactado (Ver Anexo 4).

Respecto a la evaluación obtenida del RQI se obtuvo una puntuación de 16 (Ver cuadro 12), lo cual indica un estado de conservación pobre en el arroyo, debido a que es la zona más baja donde el caudal no es suficiente para diluir la contaminación que se presenta aguas arriba, haciendo la función acumulativa en el arroyo.

Cuadro 12. Resultados de valoración RQI en el tercer tramo del arroyo.

ÍNDICE RQI PARA LA VALORACIÓN DE LAS RIBERAS FLUVIALES EN EL CONTEXTO DE LA DIRECTIVA MARCO DEL AGUA			
Valor RQI	Estado	Condición ecológica	Estrategias de gestión
59-40	Pobre	Más de tres atributos de las riberas están seriamente alterados en su funcionamiento y el resto también se encuentra degradado.	Necesidad de rehabilitación y restauración para recuperar la funcionalidad hidrológica y ecológica de las riberas

Análisis físico-químicos

Respecto a las muestras que se colectaron en los tres puntos se consideraron los parámetros de acuerdo al tipo de agua para conocer sus características físico-químicas expuestas en el anexo 6. (Ver figura 19).



Figura 19. Análisis de muestras de campo

En relación al manantial, es importante analizar si el agua es adecuada para consumo humano, para lo cual se hizo en base a los límites permisibles de la calidad del agua, en relación a la NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Se encontró que la mayoría de los parámetros se encuentran dentro de estos límites a excepción del cloruro con un valor de 3.30 mg/l, muy por encima de los 0.30 mg/l que establece la norma (Ver anexo 6).

Respecto al lavadero y sus escurrimientos son considerados como descargas y es importante conocer sus características previas a su uso, estas se evaluaron en referencia a la NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que fija los límites permitidos de contaminantes en las descargas de aguas residuales hacia cuerpos receptores bajo jurisdicción nacional, incluyendo ríos, arroyos, canales y drenajes. (Ver cuadro 13).

Cuadro 13. Parámetros analizados de las muestras colectadas en el arroyo y los límites permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-2021 y NOM-127-SSA1-2021.

Muestra en zona	Demanda Química de oxígeno (DQO)	Carbono Orgánico Total (COT)	Nitrógeno Total (NT)	Especificaciones sanitarias químicas mg/L	Límites NOM-127-SSA1-2021
Manantial	/	/	/	Fluoruro: 0.65 Cloruro: 3.30 Sulfato: 2.59 Nitrito: < LC Nitrito: < LC	1.50 0.30 400 0.90 11
Lavadero	10	55.3	1.1	N/A	
Descarga	237	196.1	11.4	N/A	
Límite NOM-001	210	53	35		

7.1.3 Calidad de agua residual doméstica

En relación al acontecimiento anterior, es importante determinar las características que tienen las descargas de las viviendas, para lo cual se toma una muestra de una descarga de regadera que actualmente se reutiliza para descargar un inodoro de agua, limpiar pisos y el riego de árboles (Ver figura 20).



Figura 20. Toma de muestra en descargas de regadera en vivienda.

Los resultados de la evaluación en esta muestra arrojan parámetros muy elevados en comparación a la NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021 (Ver cuadro 14).

Cuadro 14. Parámetros analizados de la muestra colectada en la vivienda y los límites permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Muestra en zona	Demanda Química de oxígeno (DQO)	Carbono Orgánico Total (COT)	Nitrógeno Total (NT)	Coliformes Totales (CT) NMP/100 ml
Vivienda	>1500	1,666.1	86.9	46,000
Límite Nom-001	210	53	35	600

7.2 Propuesta de modelo conceptual de humedal artificial

Unos meses posteriores a las evaluaciones en campo se presentaron sequías prolongadas en la zona, por lo que se realizó un recorrido para observar el cauce del arroyo y se identificó que había disminuido su caudal dramáticamente debido a las condiciones de aridez que se estaban presentando.

Para mostrar esta situación es necesario observar las condiciones presentes al inicio del estudio en enero de 2023 y las finales en abril de 2024, donde se nota claramente el cambio de un paisaje ripario a uno árido (Ver figura 21).



Figura 21. Comparativo de las condiciones del arroyo de las adjuntas.

En estas condiciones donde el caudal es prácticamente nulo, no es conveniente instalar el humedal artificial ya que es necesario un flujo constante de agua para la operación del mismo y supervivencia de la vegetación.

En este sentido se propone un humedal de tratamiento a escala domiciliar o familiar, que se integre a la vivienda para el tratamiento de las aguas grises y almacenarlas en un depósito para su reutilización posterior. Esto permitiría un mejor manejo al ubicarse cerca y adaptar las especificaciones a las necesidades inmediatas que tienen las personas de las viviendas en cuanto a la cantidad de agua a tratar, como la vegetación empleada para diversos usos (Figura 22).



Figura 22. Ejemplo de humedal artificial de tratamiento de aguas grises domésticas.

Además de las ventajas inmediatas, estos sistemas proponen un cambio social al fomentar el manejo local de residuos, brindando la posibilidad de tener sistemas de tratamiento descentralizados con una tecnología adecuada que responsabilice y beneficie a las personas.

Esto genera un impacto significativo dentro la cuenca, desde la disminución de contaminantes en las aguas residuales que benefician a los cuerpos receptores superficiales y subterráneos, el aumento de fertilidad y biodiversidad a los alrededores, mejoramiento de condiciones sanitarias, disminución de costos de tratamiento y la posibilidad de crear sistemas de aprovechamiento familiar.

7.2.1 Tipo de humedal

Para seleccionar el tipo de humedal construido se debe considerar el tipo de aguas a tratar, el caudal máximo y la carga orgánica presente. Para lo cual existen estudios que han evaluado el desempeño en los tres modelos de humedales en relación al flujo de agua: de flujo superficial, subsuperficial horizontal y de flujo subsuperficial vertical (Ver cuadro 15).

Cuadro 15. Eficiencia de eliminación de contaminantes en los humedales de tratamiento

Tipo de humedal	Características Diseño			Características Operación		Características Depurativas							
	Profundidad (m)	Áreas unitarias (m ² /P.E)	Relación tamaño	Tiempo de retención hidráulico (TRH) (d)	Carga hidráulica aplicada (mm/d)	Materia orgánica		Nitrógeno		Fósforo		Patógenos	
						Cargas aplicadas (gDBO ₅ /m ² -d)	Eficiencia de eliminación (%)	Cargas aplicadas (gNT/m ² -d)	Eficiencia de eliminación (%)	Cargas aplicadas (gPT/m ² -d)	Eficiencia de eliminación (%)	Individuos (n°/100 mL) ^a	Eficiencia de eliminación (%)
Flujo superficial	0,06 - 1,2	5,0 - 20	2:1 - 4:1	5 - 15	12 - 50	1 - 11	54 - 88	0,02 - 4,2	20 - 52	0,1	3 - 66	1800 - 556000	79 - 99
Flujo subsuperficial horizontal	0,3 - 1,0	1,2 - 12(a)	0,25:1 - 4:1	2 - 10	23 - 50	3 - 15	65 - 95	1 - 10	20 - 75	0,04 - 0,6	15 - 78	5x10 ⁷ - 6,5 x 10 ⁷	98 - 99
Flujo subsuperficial vertical	0,5 - 1,4	0,85 - 5,5	3:1 - 14:1	1 - 2	27 - 110	10 - 60	30 - 95	2,8 - 30	35 - 55	0,06	23 - 60	1,0x10 ⁶ - 1,7x10 ⁶	99 - 99

Fuente: Gladys et al., (2016).

Tratamiento primario (trampa de grasas)

Esta cámara de separación de sólidos tiene el mismo ancho del humedal y se divide en dos partes para aumentar el recorrido del agua y asegurar la retención de los sólidos suspendidos o sedimentados.

Tratamiento secundario (Humedal artificial)

En esta etapa es importante considerar dos aspectos principales: El lecho filtrante y la vegetación.

- **Lecho Filtrante:** Para mejorar la eficiencia en la composición del medio de soporte se introducen gravas y arenas con diferentes granulometrías y profundidades. Este diseño es propuesto por Narváez (2012) (Ver figura 24).

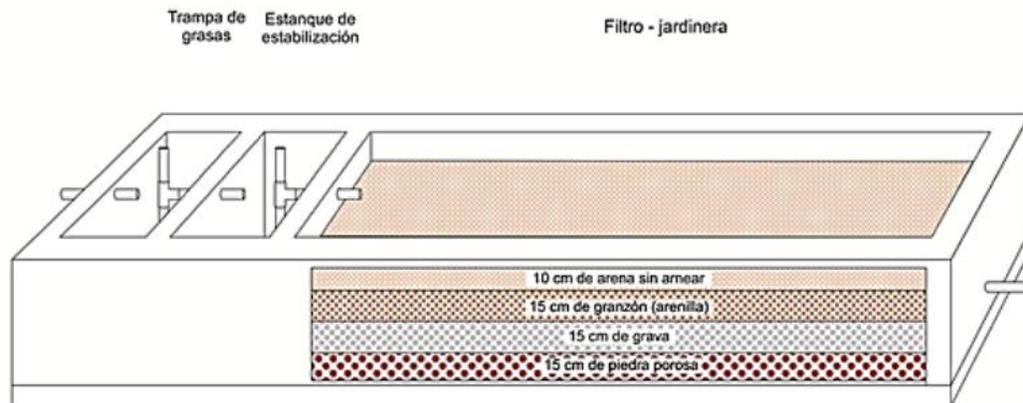


Figura 23. Distribución de lecho filtrante
Fuente: (Narváez et al., 2012)

Vegetación: Es importante considerar aspectos de adaptación al medio, requerimientos de sol, suelo y agua, velocidad de crecimiento, abundancia de raíces y servicios ecosistémicos que ofrecen.

Esta vegetación puede ser empleada como insumo principal para el desarrollo de diversas actividades, como el empleo en la construcción, elaboración de artesanías, plantas de ornato, ceremonias religiosas consumo, estructura de suelos, combustibles, bioinsumos para suelos y medio de adsorción.

La mayoría de los participantes del grupo eligieron emplear las plantas para uso en consumo y artesanal, para complementar las necesidades familiares y retomar el vínculo ancestral con el tejido pero con fibras naturales para elaborar sus propios productos y comercializarlos.

Estas fibras vegetales desde la antigüedad han sido de importancia relevante en distintas civilizaciones, ya que se han utilizado como materia prima y actualmente su valor ha incrementado en el mercado global (Gladys et al., 2016).

Para exponer las opciones de trabajos con fibras vegetales se les presentaron las diferentes categorías, las actividades empleadas y los productos obtenidos (Ver Cuadro 16).

Cuadro 16. Clasificación de fibras vegetales

Categoría de uso	Productos
1. Cestería	Canastas, sombreros, esteras (petates), sillas, ramos.
2. Cordelería	Cuerdas, sogas, hilos, redes, tendedores, pulseras
3. Utensilios	Escobas, cepillos, fibras para trastes.
4. Material de relleno	Colchones, almohadas, aislantes.
5. Textil	Ropa, calzado, alfombras, cortinas, costales, telas.
6. Construcción	Cercos, techos, paredes, embarcaciones.

Fuente: En base a Macía (2006).

En base a las características de filtración, los ejemplares registrados en el arroyo y el interés de aprovechamiento por parte de los habitantes, se seleccionaron siete especies de plantas que se pueden emplear en los humedales de tratamiento (Ver Cuadro 17).

Cuadro 17. Características de la vegetación propuesta para el humedal artificial

Imagen	Especie	Usos	Ej de usos	Servicios ambientales	Profundidad de raíces
	Carrizo (<i>Phragmites australis</i>)	Construcción -Artesanías -Forraje -Alimento -Ceremonial	Cercos, techos, papalotes, pirotecnia, chimales.	-Control de erosión -Filtración de agua -Hábitat	1 m
	Tule o junco (<i>Typha latifolia</i>)	-Artesanías -Ornamental -Medicinal -Alimento fauna	Elab. De canastas, muebles	-Estabilizar suelos - Retención de humedad	0.60 m
	Papiro (<i>Cyperus papyrus</i>)	-Artesanías -Ornamental -Medicinal	Elab. De lámparas, sombreros	-Hábitat -Alimento para animales	0.40 m
	Cola de caballo (<i>Equisetum hyemale</i>)	-Ornamental -Medicinal	Paisajismo, té como remedio en diversos padecimientos	-Estructura de suelos -Refugio	0.15 m

	Alcatraz (<i>Zantedeschia aethiopica</i>)	-Ornamental	Paisajismo, adorno en eventos	Atracción de polinizadores	0.40 m
	Cálamo (<i>Acorus calamus</i>)	-Alimento -Medicinal -Hábitat	-Repelente de insectos -Paisajismo -Ingrediente de cocina	-Mejora calidad de agua -Refugio	0.20 m
	Bambú (<i>Guadua angustifolia</i>)	-Construcción -Combustible -Artesanal	-Casas -Carbón -Muebles	-Control de erosión -Retención de agua -Hábitat	0.60 m
	Plátano (<i>Platanus x hispánica</i>)	-Alimento -Biomasa	-Consumo de fruto y empleo de hoja	Restauración de suelos	0.40 m

Fuente: Goryńska-Goldmann (2019).

Módulo de almacenamiento

Una vez tratada, el agua se puede almacenar en una cisterna cerrada para conservar su calidad, esta cisterna deberá tener su canal de rebosadero y no debe estar en resguardo por mucho tiempo para evitar la degradación de la calidad del agua, de igual forma se le puede dar un postratamiento agregando desinfectantes como cloro, con lámparas UV o simplemente haciendo recircular el agua por todo el proceso.

7.2.2 Dimensionamiento del sistema

Para realizar los cálculos pertinentes, es importante conocer el manejo del agua que tienen los habitantes en la microcuenca, por lo que se contemplaron aspectos como el número de viviendas, habitantes por vivienda, el tipo de manejo sanitario, depósitos, y lavadoras para determinar el consumo de agua cuando se cuenta con el acceso a ciertos servicios (Anexo 8).

Para tener datos más precisos se identificó el consumo de agua que se tiene por familia en base a la facturación mensual, así como estimar la cantidad de litros empleados en aguas grises. Para esto se tomó la lectura de 10 viviendas de la localidad de Bomintzá, se preguntó sobre los habitantes y el promedio de consumo destinado a las aguas grises.

En función a la base de datos de INEGI y los datos recabados, se determinó que existen 4 habitantes promedio por vivienda en la localidad con un consumo promedio de aguas grises de 7,800 lt / mes, equivalente a 2,000 lt / semana y 285 lt / día (Ver anexo 9). En cuanto a la superficie del humedal se establece un área mínima de 0.60 m² por habitante (Vera-Puerto et al., 2017), lo que indica un área mínima de 2.5 m² en total por familia.

Estas cifras, aunque son una estimación, se debe considerar que no todas las aguas grises se pueden reutilizar ya que en la mayoría de las veces el drenaje de la regadera no puede ser adaptado, por lo que se estima que el 50% de las aguas se podrían recuperar.

De esta manera se calculan los costos en el tarifario vigente en la página de la Comisión Nacional de Aguas (CEA), indicando a la zona de Colón (ya que no se encuentra el municipio de Tolimán y esta es la más cercana), el tipo de consumo “doméstico zona rural”, y el volumen de consumo promedio mensual de 10,000 litros, generando un costo total de \$163.74.

Si se considera un consumo del 50 %, es decir, 5,000 litros esto equivale a un pago de \$98.08, lo cual significa un ahorro del 40 % sobre la facturación mensual (Ver figura 25).

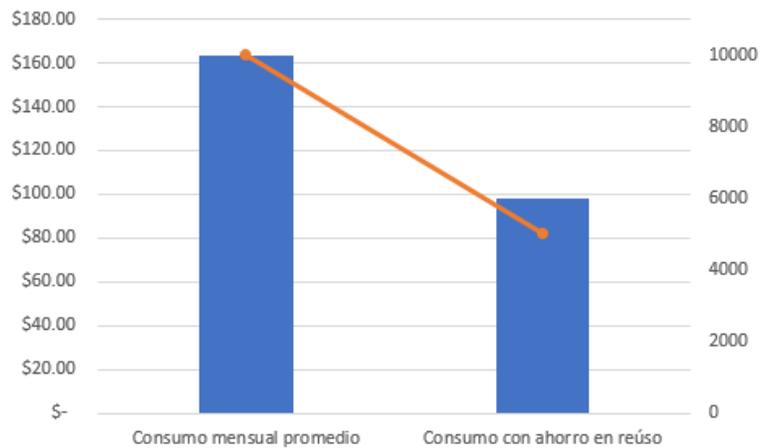


Figura 24. Costo por los litros consumidos de agua.
Fuente: Elaboración propia.

Es importante considerar los flujos o caudales de agua que deben considerarse además del afluente y el efluente, como se muestra en la Figura 26.

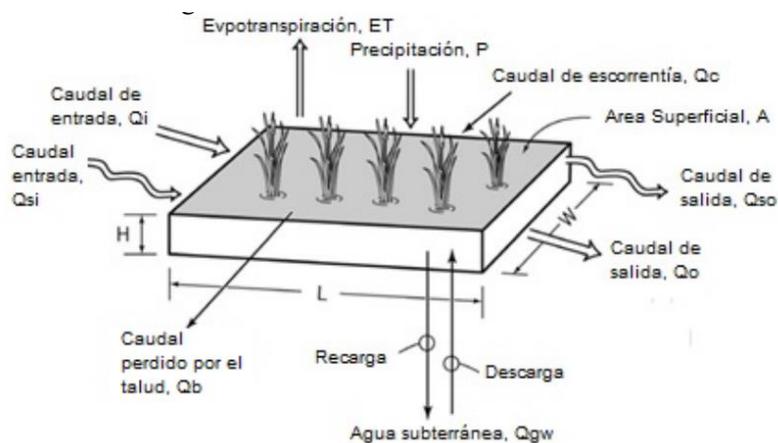


Figura 25. Flujos de agua en un humedal para tratamiento.
Fuente: Kadlec y Wallace (2009).

Enfoque de diseño

Para determinar los cálculos necesarios en el diseño del sistema se realizó mediante el enfoque P-K-C* por medio de la siguiente ecuación (figura 27).

$$A = \frac{PQ_i}{k_A} \left(\left(\frac{C_i - C^*}{C_o - C^*} \right)^{\frac{1}{P}} - 1 \right) = \frac{PQ_i}{k_V h} \left(\left(\frac{C_i - C^*}{C_o - C^*} \right)^{\frac{1}{P}} - 1 \right)$$

Figura 26. Ecuación del método P-K-C*
Fuente: Vera-Puerto et al., (2017).

Donde:

C_o = concentración de salida o efluente, mg/L

C_i = concentración de entrada o afluente, mg/L

C* = concentración de fondo, mg/L

h = profundidad de agua del humedal, m

K_A = coeficiente superficial de primer orden modificado, m/d

K_V = coeficiente de reacción volumétrico de primer orden, 1/d

P = cantidad aparente de tanques en serie (TIS), adimensional

Q_i = caudal de entrada, m³ /d

Con base a la ecuación anterior (ver anexo 10), los datos obtenidos en campo y algunos casos de estudio (Cross et al., 2021; Vera-Puerto et al., 2017), se realizaron los cálculos y estimaciones necesarias para el modelo propuesto con los datos resumidos en el cuadro 18.

Para una mejor interpretación de estos datos, se realizó un diseño renderizado en 3D para proyectar de forma gráfica las etapas, componentes y su distribución dentro del humedal de tratamiento.

Cuadro 18. Diseño de parámetros del humedal artificial

DISEÑO DEL HUMEDAL ARTIFICIAL	
Tipo de Afluente	Agua residual gris doméstica
Modelo de Humedal	Fujo subsuperficial híbrido
DISEÑO	
Caudal de entrada (lt/día)	400
Población equivalente (Hab.-Eq.)	4-5
Área por población equivalente (m ² /Hab.-Eq.)	0.6
Área del lecho filtrante (m ²)	3
Medidas del lecho filtrante (m)	1 x 3
Trampa de grasas y sólidos (lt.)	120
Almacenamiento (lt.)	1,000
AFLUENTE (Promedio)	
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ⁵) (mg/L)	450
Demanda química de oxígeno (DQO) (mg/L)	1,000
Sólidos suspendidos totales (SST) (mg/L)	140
Nitrógeno total (NT) (mg/L)	70
Nitrógeno amoniacal (N-NH ₄) (mg/L)	52
Coliformes Totales (UFC mg/L)	90,000
EFLUENTE (Deseado)	
DBO ⁵ (mg/L)	30-40
DQO (mg/L)	80-100
SST (mg/L)	10-20
NT (mg/L)	10-20
NH ₄ -N (mg/L)	0.06
Coliformes Totales (UFC mg/L)	400

Fuente: Elaboración propia en base a Cross et al., (2021); Vera-Puerto et al., (2017).

El modelo se compone por una primera etapa de dos cámaras sedimentadoras que cumplirán la función de retener los sólidos, aceites y espumas en la superficie, en la segunda etapa se encuentra el espacio asignado a las plantas por medio de un lecho filtrante o sustrato de soporte a la vegetación y en la tercera etapa se encuentra el depósito de almacenamiento del agua tratada (Ver figura 28).

Dentro del humedal se observan los niveles de llenado que deben tener cada etapa para evitar el retorno del agua, esto se realiza por medio de la colocación de las tuberías, simulando un sistema escalonado y con una pendiente en el fondo para mejorar la circulación del agua.

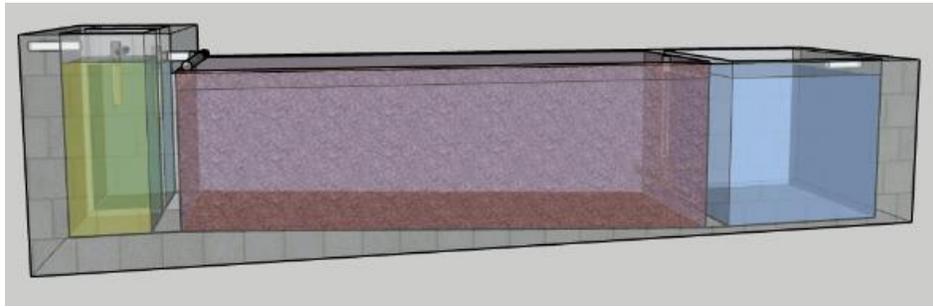


Figura 27. Vista lateral del interior del humedal.

Las medidas finales del humedal consisten en 1 m para la primera etapa, 3 m para el lecho filtrante o segunda etapa, donde se requiere mayor espacio para mover el agua y colocar sustrato de una granulometría menor para ralentizar la circulación del agua y para el depósito de agua 1m³ teniendo un total de 5m² para instalar el humedal, lo cual es un espacio suficiente para tratar el agua de una familia de 5 a 6 integrantes con descargas diarias de 400 lt. (ver figura 29).

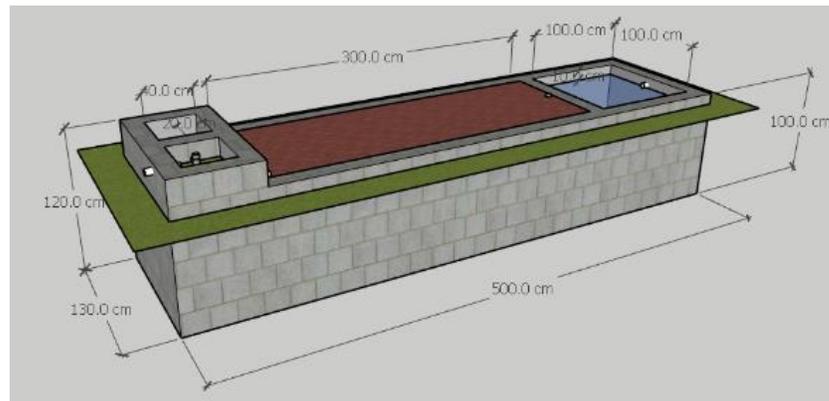


Figura 28. Medidas del humedal de tratamiento.

Para la distribución de la vegetación se propone plantar directo en la entrada del agua a las que tienen las raíces profundas o densas para que el entramado abundante funcione de filtración primaria, y al final las se colocan las que tienen menos raíces (Ver figura 30).



Figura 29. Distribución de la vegetación en el HAT.

Para la óptima función fitodepuradora de la vegetación, se requiere de un tiempo de funcionamiento de por lo menos seis meses para el desarrollo adecuado de las raíces en el lecho filtrante y por ende el crecimiento de la población bacteriana, encargada de degradar los compuestos orgánicos.

Como primera fase se propone cubrir cerca del 10 % del total de las viviendas en la comunidad de Bomintzá, es decir, se proponen instalar 20 sistemas en las 173 viviendas.

Como una segunda fase se propone impactar al 10 % del total de las viviendas de la microcuenca, es decir, de las 1828 viviendas se requiere instalar 180 sistemas de humedales artificiales de tratamiento, los cuales se ubican en 15 de las 27 localidades de la microcuenca (Ver cuadro 19).

Cuadro 19. Propuesta de sistemas por localidad.

	Localidad	Viviendas	No. Sistemas	%	Grado de marginación	Prioridad
1	Casa Blanca	216	20	9%	Medio	35.5
2	Mesa de Ramírez	212	20	9%	Alto	54.5
3	Sabino de San Ambrosio	181	20	11%	Medio	39.2
4	Bomintzá	173	20	12%	Medio	39.2
5	El Cerrito Parado	167	15	9%	Medio	38.7
6	Los González	156	15	10%	Medio	35.8
7	El Tule	139	15	11%	Medio	38.7
8	Maguey Manso	103	10	10%	Medio	37.9
9	Puerto Blanco	86	10	12%	Medio	36.8
10	El Zapote	73	10	14%	Medio	30.6
11	Mesa de Chagoya	59	5	8%	Alto	55.5
12	Lomas de Casa Blanca	54	5	9%	Alto	51.6
13	El Saucito	47	5	11%	Alto	54
14	La Presita	35	5	14%	Muy alto	63.4
15	El Shaminal	32	5	16%	Medio	32.9
		1733	180	10%		

Fuente: Censo de población y vivienda INEGI (2020), Localidades con grado de prioridad rural del Programa de Agua Potable, Drenaje y Tratamiento PROAGUA (2024).

7.2.3 Factores económicos y financieros

Para la ejecución del presente estudio es necesario apoyarse de herramientas que proporcionen los medios para su cumplimiento, como la metodología PM4 que es un enfoque especializado para la gestión de proyectos, que se basan en el marco general de gestión de proyectos del Project Management Institute (PMI). Su aplicación es idónea en proyectos sociales que requieran un control y seguimiento, pero con la flexibilidad suficiente para adaptarse a las particularidades locales.

Para la realización del proyecto se consideran algunos conceptos de evaluación de calidad del agua, los materiales a emplear, la logística, los honorarios y margen de gastos no previstos (Ver cuadro 20).

Cuadro 20. Estimación financiera del proyecto.

Concepto	Cantidad	Precio unitario	Importe
1. Muestras y eq. medición	1	\$20,000.00	\$20,000.00
2. Materiales	20	\$20,000.00	\$400,000.00
3. Transporte	10	\$1,000.00	\$10,000.00
4. Gastos no previstos (10 %)	1	\$43,000.00	\$43,000.00
5. Honorarios	1	\$200,000.00	\$200,000.00
SUBTOTAL			\$673,000.00
IVA (16%)			\$107,680.00
ISR HONORARIOS (10%)			\$20,000.00
TOTAL			\$800,680.00

Fuente: Elaboración propia.

Para la ejecución del proyecto se plantea realizarlo en 24 semanas, contemplando 4 semanas de planeación y logística, 16 semanas para impartir 4 módulos de talleres equivalente a 5 sesiones por semana y 4 semanas para la revisión y entrega final (Ver cuadro 21).

Cuadro 21. Cronograma de actividades del proyecto.

Actividades	Tiempo de ejecución (semanas)																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1. Planeación	■	■	■	■																				
1.1 Compra y entrega de materiales		■	■	■																				
2. Taller 1 Introducción					■	■	■	■																
2.1 Ubicación del sistema					■	■	■	■																
3. Taller 2 Selección de vegetación									■	■	■	■	■	■										
3.1 Inicio de construcción									■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■					
4. Taller 3 Operación y mantto.																								
4.1 Supervisión de obra									■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■					
5. Taller 4 Aprovechamiento																								
5.1 Instalación de componentes																								
6. Revisión y entrega																						■	■	■

Fuente: Elaboración propia.

La implementación de estos proyectos requiere de una inversión que puede ser financiada a través de diferentes organismos e instituciones ya sean públicas o privadas, locales o internacionales, las cuales deben estar orientadas a apoyar las causas o áreas de estudio, en este caso el agua y saneamiento en comunidades rurales. A continuación, se presentan algunos programas aplicables (Cuadro 22).

Cuadro 22. Programas de financiamiento para agua y saneamiento.

Institución	Programas	Características	Requisitos
Banco Nacional de Obras y Servicios públicos (BANOBRAS) Es una entidad financiera del gobierno federal que ofrece financiamiento a proyectos de infraestructura, incluidos los de agua y saneamiento.	Crédito BANOBRAS - FAIS	Fondo de Aportaciones para la Infraestructura Social (FAIS) Ayuda a potenciar la inversión en rubros como lo son agua potable, alcantarillado, drenaje y letrinas, urbanización, electrificación rural y de colonias pobres, al permitir adelantar hasta el 25% de los recursos (anuales).	1. Autorización del Congreso local y Constancia de Mayoría de Cabildo del municipio. 2. Solicitar el ingreso al Programa. 3. Proceso competitivo, en términos de la Ley de Disciplina Financiera de las Entidades Federales y Municipios. 4. Presentar un Plan de Inversión Preliminar.
	Fondo Nacional de Infraestructura (FONADIN) Programa para la Modernización de Organismos Operadores de Agua (PROMAGUA)	Tiene como objetivo incentivar los Proyectos bajo estructuras de Asociación Público Privada que permitan incrementar los niveles de cobertura y calidad de los servicios de agua potable y saneamiento, así como la eficiencia de los organismos operadores.	Deberá contar con los lineamientos aplicables al programa para la modernización de organismos operadores de agua (IX requisitos)
Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) Es la autoridad principal en la gestión de recursos hídricos en México y ofrece	Programa de Agua Potable, Drenaje y Tratamiento (PROAGUA)	Financiamiento de iniciativas para la prestación de servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento, así como para el desarrollo integral de los organismos operadores de estos servicios. Su objetivo es contribuir a aumentar y mantener la cobertura de	a) Solicitud de apoyo por acción. b) Presentar documento donde se garantice que cuenta con los recursos para realizar la operación y el mantenimiento de los sistemas. c) En localidades rurales, presentar escrito donde se manifieste la

<p>programas de financiamiento y subsidios para proyectos de agua potable, drenaje y saneamiento.</p>		<p>agua potable, alcantarillado y saneamiento, apoyando el desarrollo de diversas acciones que faciliten el cumplimiento del derecho al acceso, disposición y tratamiento del agua en comunidades rurales y urbanas.</p>	<p>forma de organización comunitaria que presta el servicio de agua potable y saneamiento en la localidad.</p> <p>d) En los casos donde se proponga la intervención de una organización comunitaria, esta deberá ser reconocida por el municipio o la asamblea comunitaria.</p> <p>Porcentaje de apoyo: Hasta el 49 %</p>
<p>Fundación Gonzalo Río Arronte Es una Institución de Asistencia Privada sin fines de lucro, sin filiación de partido político o religión, respetuosa de los derechos humanos, apoya áreas de beneficio social, tales como la Salud, Adicciones y Agua.</p>	<p>Área de agua</p>	<p>Asigna recursos para convocar, coordinar y fortalecer a actores clave del sector hídrico en México, aportando capital, talento, experiencia y posicionamiento estratégico. Fomenta la participación de otros interesados, generando sinergias y alianzas, e impulsa el crecimiento, continuidad y replicabilidad de proyectos en beneficio de la población y el medio ambiente. Apoya iniciativas basadas en una gestión integral del agua, promoviendo la corresponsabilidad en las soluciones propuestas para los desafíos hídricos en el país.</p>	<p>Para instituciones públicas o privadas y organizaciones sociales sin fines de lucro, que cuenten con autorización para recibir donativos deducibles conforme a la Ley del Impuesto sobre la Renta y emitan recibos deducibles de acuerdo con los requisitos de la Fundación Río Arronte, incluyendo una evaluación positiva sobre el cumplimiento de sus obligaciones fiscales. Según sus criterios de actuación, la Fundación no otorga apoyo a personas individuales.</p>
<p>Fondo Mundial para el Medio Ambiente (FMAM)</p>	<p>Aguas internacionales</p>	<p>Apoya proyectos que fomentan la cooperación entre países para resolver tensiones en grandes sistemas hídricos, y promueve la gestión conjunta de sus cuencas, acuíferos transfronterizos, y sistemas costeros y marinos, con el fin de compartir los beneficios de manera equitativa.</p>	<p>Las agencias asociadas deberán proporcionar información que demuestre el cumplimiento de requisitos y seguir los procedimientos de reflujo establecidos en sus respectivos Acuerdos de Procedimientos Financieros con el Fiduciario del FMAM.</p>

Fuente: Elaboración propia.

7.3 Definición de estrategias sociales y ambientales

Para aumentar la posibilidad de una correcta adopción de estos sistemas de tratamiento alternativos, es necesario considerar algunas estrategias en el ámbito social y ambiental.

7.3.1 Acción participativa

Es importante considerar a personas que cumplan diferentes roles en el estudio con el fin de aprovechar los alcances de cada uno, para esto se sumaron 20 personas de la localidad, 2 autoridades locales, 5 académicos y 3 instituciones de gobierno, con esto se pudo formar un grupo de capacitación, realizar 4 talleres a la comunidad, realizar 4 análisis de la calidad del agua.

También se pudieron visualizar algunos aspectos más relevantes en la comunidad de una forma didáctica por medio de cartografías sociales con 4 temáticas diferentes, evaluar la calidad del arroyo por medio de un monitoreo participativo empleando formatos de caracterización que mostraron el deterioro progresivo del arroyo, además se inició un proceso para la formación de un comité local del agua (Ver cuadro 23).

Cuadro 23. Acción participativa como estrategia para la implementación de un HAT.

ESTRATEGIA	Fase	Indicador de resultado	Instrumento recogida de datos
ACCIÓN PARTICIPATIVA	Integración de actores	- 2 autoridades locales (Delegado y subdelegado) - 20 personas de la localidad - 5 académicos (comité de sínodos) - 3 instituciones de gobierno (IQM, SEDESU, Presidencia mpal)	Reunión <u>informativa</u> , comités
	Mapeo comunitario	- 4 mapas temáticos (mapa base, línea de tiempo, actores del agua, conflictos locales) - 8 conflictos encontrados (agua contaminada, prácticas dañinas, suministro deficiente, almacenamiento insuficiente...) - 4 actores del agua (CEA, DIF, SEDEA, IQM)	Cartografías sociales, entrevista no estructurada
	Monitoreo participativo	3 puntos, 6 monitoreos, 3 muestras	índice RQI, CAR
	Comités locales	En proceso de 1 comité local del agua	Acta de conformación

7.3.2 Capacitación

El objetivo de la capacitación fue la educación ambiental y el desarrollo de habilidades técnicas que permitan el dominio del sistema. Para exponer el funcionamiento se construyó un modelo funcional a escala de HAT para facilitar la conceptualización de los elementos que lo integran y explicar los procesos que ocurren dentro por medio de prácticas de experimentación con los participantes.

En el proceso de diseño fue importante conocer el flujo de agua en la casa de los participantes por medio de diagramas de flujo que permitieron visualizar el recorrido y destino de las aguas grises en los domicilios, para lo cual se identificó la reutilización de las aguas de los lavaderos y regaderas para vaciar en letrinas, limpiar pisos y regar árboles.

En la construcción cada participante elaboró un filtro casero de aguas grises para instalar en sus lavaderos con el fin de empezar a familiarizarse y enfrentarse con situaciones cotidianas en el funcionamiento. Para la operación, mantenimiento y aprovechamiento se entregaron algunos formatos prácticos de apoyo (Ver cuadro 24).

Cuadro 24. Capacitación como estrategia para la implementación de un HAT.

ESTRATEGIA	Fase	Indicador de resultado	Instrumento recogida de datos
CAPACITACIÓN	Funcionamiento	- 1 modelo de humedal a escala - Ejemplificación de 8 procesos en los humedales	Carta descriptiva, minuta de taller, reporte fotográfico
	Diseño y construcción	- 8 Diagramas del flujo del agua en el domicilio - 10 Estimaciones de un consumo (50 lt/persona) - Instalación de 1 biofiltro de lavadero con materiales reutilizados - Adecuación de 6 biofiltros - 1 manual de construcción	Carta descriptiva, minuta de taller, reporte fotográfico, formatos
	Operación y mantenimiento	- 1 <u>check list</u> de monitoreo - 1 hoja de mantenimiento periódico - 1 diario de eventos extraordinarios	Formatos, minuta de taller, reporte fotográfico
	Aprovechamiento	- 1 Calendario estacional de actividades - 1 hoja de registro de cosecha	Formatos, minuta de taller, reporte fotográfico

7.3.3 Propuesta integral

En el desarrollo de la propuesta integral se consideraron los aspectos necesarios para realizar el dimensionamiento del sistema que cumplirá con la eficiencia, rendimiento y multifuncionalidad, adaptable a las necesidades e intereses de la población.

En este sentido para el tratamiento del agua fue necesario conocer la cantidad de personas que habitan las viviendas, el consumo estimado de agua en diferentes usos, el espacio disponible para su construcción, la carga promedio de contaminantes de las aguas. En relación a esto se estimó un área de 3m² para una familia de 4 a 5 personas, equivalente a 0.60 m² por persona generando un caudal de 400 lt de aguas grises al día.

El contemplar un almacenamiento suficiente es una de las prioridades a tener en cuenta en el sistema debido a las condiciones existentes, esto significa una fuente de suministro alternativo en situaciones de escasez.

El modelo productivo es uno de los aspectos que generaron mayor interés en las personas al ver la posibilidad de ser un apoyo económico, un medio constructivo o de sustento.

Respecto a la gestión del proyecto es crucial presentar al comité un proyecto en dirección de ser ejecutado contemplando los recursos a emplear y la forma de realizarlo ya que es la motivación para que las personas continúen participando (Ver cuadro 25).

Cuadro 25. Propuesta integral como estrategia para la implementación de un HAT.

ESTRATEGIA	Fase	Indicador de resultado	Instrumento recogida de datos
PROPUESTA INTEGRAL	Tratamiento de agua	<ul style="list-style-type: none"> - 1 modelo de humedal de tratamiento de aprovechamiento de flujo subsuperficial - 3 etapas (Pre tratamiento, tratamiento, almacenamiento) - Diseño en base a P-k-C* <u>Kadlec y Wallace (2009)</u> - Área de 3 m2 para una familia de 4 a 5 personas - Capacidad de caudal máximo de 400 lt/día. 	Tabla de dimensionamiento
	Suministro alterno	<ul style="list-style-type: none"> - 1000 lt. almacenamiento para uso doméstico. 	Tabla de dimensionamiento
	Modelo productivo	<ul style="list-style-type: none"> - 4 usos potenciales (consumo, artesanal, constructivo, ornamental) - 2 especies silvestres: Carrizo (<u><i>Phragmites australis</i></u>), papiro de río (<u><i>Cyperus pseudovegetus</i></u>) - 5 especies para cultivo: Tule (<u><i>Typha latifolia</i></u>), papiro, (<u><i>Cyperus papyrus</i></u>) plátano (<u><i>Musa paradisiaca L.</i></u>), cola de caballo (<u><i>Equisetum hyemale</i></u>), alcatraz (<u><i>Zantedeschia aethiopica</i></u>). 	Inventarios, análisis de beneficios
	Gestión del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> - 2 propuestas de proyecto (Humedal comunitario, humedales familiares) 	Evaluación de propuestas

8 Discusión

La implementación de humedales construidos puede ser una estrategia ambientalmente sostenible y altamente eficaz para el tratamiento de aguas residuales y la gestión integral en la cuenca, analizando la implementación de estos sistemas desde diversas perspectivas, se puede destacar sus múltiples beneficios, los desafíos y sus consideraciones prácticas.

En este estudio se encontró que las personas tienen la necesidad de un suministro suficiente de agua, mismo que puede ser brindado por los HAT y mejor aprovechado a una escala domiciliar o familiar donde la calidad del agua puede tener mayor control.

Por otro lado, se detectó una posibilidad de aprovechamiento para la vegetación en una de las actividades que se realizan tradicionalmente que es el tejido, se puede adaptar tejido de fibras como el carrizo y tule las cuales son especies que se encuentran localmente.

También se percibió la importancia de generar interés y participación con las personas que usarán los sistemas ya que será la única forma de garantizar el éxito del proyecto a largo plazo.

Estos resultados sugieren la priorización de un enfoque social por sobre lo demás, ya que frecuentemente se deja atrás y al momento de la implementación resultan deficiencias desde el diseño, la operación y mantenimiento del sistema,

Estos hallazgos concuerdan con los estudios de Palma et al. (2022) quienes observaron que los métodos aplicables por las instituciones para realizar estos proyectos se centran en la mayoría de las ocasiones en el aspecto técnico y dejan de lado el aspecto social que representa el adoptar este tipo de tecnologías en zonas rurales, desde la selección de la tecnología adecuada considerando aspectos socio-ambientales, las capacitaciones y la asistencia técnica posterior, lo cual

también son factores que contribuyen a las barreras que dificultan el acceso al saneamiento o la implementación de nuevas tecnologías.

De acuerdo con Rivas, 2021 en su publicación sobre “Reflexiones sobre las causas que limitan el uso de humedales de tratamiento en México” resalta la falta de experiencia de los diseñadores y operadores, lo que puede provocar deficiencias en el sistema, lo que genera malos olores, la colmatación, larvas de mosquitos, también los elementos mal utilizados como los medios filtrantes y plantas exóticas, además la falta de vinculación entre los actores como son las universidades, centros de investigación, instituciones asociadas, asociaciones civiles, entre otros.

En este sentido se plantea la colaboración con otros organismos que anteriormente hayan realizado este tipo de proyectos y que cuenten con la experiencia y disponibilidad para realizar el proyecto en conjunto.

Por otro lado, Noyola, et al. (2012) concluye que la mayoría de los estudios evalúan la eficiencia del sistema para una óptima función de depuración, enfocándose en aspectos meramente técnicos y dejan de lado la metodología requerida para llevar a cabo estas intervenciones, donde resulta conveniente que los sistemas de tratamiento sean construidos y operados por grupos comunitarios locales para asegurar que no se conviertan en plantas de tratamiento como muchas que existen en el país.

Es importante considerar estrategias efectivas que mantengan el interés en las personas ya que en la operación resulta difícil que las personas continúen si no tienen algún beneficio inmediato y seguimiento.

También señala que es de suma importancia realizar una planeación participativa que permita a la población apropiarse del rumbo del proyecto desde el inicio, es indispensable no caer en el lado opuesto de dejar toda la responsabilidad a cargo de la comunidad, sino más bien la visión sería integrar a todos los actores clave y realizar una gestión conjunta con las posibilidades que cada uno puede aportar desde área de acción.

En esta planeación participativa es indispensable realizar una adecuada intervención en las comunidades para generar confianza e interés por los temas, por lo tanto se requiere de personas con experiencia previa en el tema y con la sensibilidad necesaria para conocer a profundidad las condiciones locales.

Las implicaciones de este estudio son significativas para la gestión de aguas residuales en áreas rurales. La adopción de humedales construidos puede ofrecer una alternativa más económica y sostenible a las plantas de tratamiento tradicionales, especialmente en regiones con recursos limitados.

Aunque los hallazgos son prometedores, este estudio presenta ciertas limitaciones. La investigación se llevó a cabo en una única ubicación con condiciones específicas, lo cual podría no ser representativo de todos los posibles entornos de humedales de tratamiento. Además, la duración del estudio fue relativamente breve, lo que restringe la capacidad de observar los efectos a largo plazo.

Futuras investigaciones deberían considerar estudios a largo plazo y en múltiples ubicaciones para validar estos resultados. Además, sería útil investigar el impacto de diferentes especies de plantas y configuraciones de flujo de agua en la eficiencia de los humedales construidos.

9 Conclusión

El presente estudio tenía como objetivo proponer el diseño de humedales artificiales que permitieran el tratamiento y aprovechamiento hídrico en la microcuenca Mesa de Ramírez, con beneficios tanto sociales como ambientales. Este objetivo surge de la urgente necesidad de mejorar el acceso, disponibilidad y saneamiento del agua en regiones vulnerables, donde los recursos hídricos son limitados. A nivel mundial, solo una pequeña fracción del agua disponible es adecuada para el uso humano, lo que subraya la importancia de encontrar soluciones sostenibles para la gestión del agua.

A través del diseño propuesto, se ha comprobado que los humedales artificiales pueden ser una herramienta eficaz para mejorar la calidad del agua en la microcuenca Mesa de Ramírez. El estudio identificó que existen necesidades de abasto de agua en la zona, la posibilidad de aprovechamiento de las fibras vegetales en artesanías y las estrategias para la implementación como la participación y capacitación que maximicen la eficiencia de intervención y la adaptación del sistema a las condiciones locales. Estos humedales no solo mejoran la calidad del agua, sino que también ofrecen beneficios adicionales como la recarga de acuíferos, el estímulo de la biodiversidad y el equilibrio del ciclo hidrológico.

La investigación ha evidenciado que la implementación de humedales artificiales puede proporcionar una solución viable para los problemas de acceso al agua en la región. Además, estos sistemas pueden contribuir a la activación económica local mediante el aprovechamiento de la vegetación y la creación de atractivos turísticos. Los beneficios sociales incluyen la integración comunitaria y la promoción de actividades productivas, mientras que los beneficios ambientales abarcan la mejora de la calidad del agua y la conservación de la biodiversidad.

Estado actual de la calidad del agua: El análisis del agua en el arroyo y las descargas domiciliarias reveló una calidad deficiente, con altos niveles de nutrientes y contaminantes, lo que destaca la necesidad de intervención.

Elementos de diseño: Los estudios de campo y los análisis técnicos permitieron identificar las dimensiones, profundidad, sustratos y especies vegetales más adecuadas para los humedales artificiales en la microcuenca, optimizando su eficiencia en el tratamiento del agua.

Estrategias para la sostenibilidad: La integración de la comunidad desde el inicio del proyecto y la realización de prácticas educativas y de sensibilización son cruciales para asegurar la sostenibilidad del proyecto. Estas estrategias no solo fomentan la apropiación comunitaria, sino que también garantizan el mantenimiento y éxito a largo plazo de los humedales.

El éxito de este estudio no solo proporciona una solución práctica y sostenible para la gestión hídrica en la microcuenca Mesa de Ramírez, sino que también sirve como modelo que puede ser adaptado a otras regiones con condiciones similares. La participación dinámica de los habitantes y la colaboración con las autoridades locales son esenciales para la implementación exitosa y la replicabilidad del proyecto. Al compartir los resultados con la comunidad y las autoridades, se espera no solo facilitar la futura implementación de los humedales artificiales, sino también fomentar el intercambio de experiencias y conocimientos que enriquezcan el enfoque en diferentes zonas.

En conclusión, los humedales artificiales propuestos en este estudio representan una solución multifuncional y sostenible para la gestión del agua en la región, alineando beneficios sociales, económicos y ambientales que contribuyen significativamente al bienestar comunitario y a la sostenibilidad ambiental.

10 Referencias bibliográficas

- Aguirre M. (2011). "La cuenca hidrográfica en la gestión integrada de los recursos hídricos", *Revista Virtual REDESMA*, 5 (1): 10-20.
- Alarcón, M. E. H. (2016). Humedales ornamentales con participación comunitaria para el saneamiento de aguas municipales en México. *Rinderesu*, 1(2), 01-12.
- Alarcón, María T., Zurita Florentina, Lara Jaime A., Vidal Gladys (2018). *Humedales de tratamiento: Alternativa de saneamiento de aguas residuales aplicable en América Latina*. Pontificia Universidad Javeriana.
- Alberich, T. (2002). Perspectivas de la Investigación Social. In T. Rodríguez Villasante, M. Montañez, & J. Martí (Coords.), *La investigación social participativa: Construyendo ciudadanía* (Vol. 1, pp. 125-142). Madrid: El Viejo Topo.
- Álvarez-Hernandez L.M., Marín-Muñiz J.L., Sandoval Herazo L. C., y Zamora-Castro S. A. (2019). Evolución del tratamiento de las aguas residuales municipales rurales en México y el uso de humedales artificiales como alternativa sustentable (2010-2019). *Sostenibilidad, Ambiente y Sociedad: Los retos de la sostenibilidad en las geografías urbana y rural*, 304.
- Alvarez-Hernández, Luis Manuel; Marín-Muniz, José Luis; Sandoval-Herazo, Luis Carlos; Zamora-Castro, Sergio Aurelio 304 Eje temático: Ciudad, Territorio y Región.
- Amoatey, P., Bani, R. (2016). Wastewater Management. In Department of Agricultural Engineering (Vol. 130, Issue 6). <https://doi.org/10.4324/9781351179430-5>.
- Anastas, P. T., Zimmerman, J. B. (2003). Peer reviewed: design through the 12 principles of green engineering.
- Aponte, H., Gonzales, S. y Gomez, A. (2020). Impulsores de cambio en los humedales de América Latina: el caso de los humedales costeros de Lima. *South Sustainability*, 1(2).
- Arteaga-Cortez, V. M., Quevedo-Nolasco, A., Valle-Paniagua, D. H. D., Castro-Popoca, M., Bravo-Vinaja, Á., & Ramírez-Zierold, J. A. (2019). Estado del arte: una revisión actual a los mecanismos que realizan los humedales artificiales para la remoción de nitrógeno y fósforo. *Tecnología y ciencias del agua*, 10(5), 319-343.
- Berberidou, C., Kitsiou, V., Lambropoulou, DA, Antoniadis, A., Ntonou, E., Zalidis, GC, y Poullos, I. (2016). Evaluación de un método alternativo para el tratamiento de aguas residuales que contienen pesticidas mediante la oxidación fotocatalítica solar y humedales construidos. *Revista Journal of Environmental Management*.
- Bernal, F., Mosquera, D., Maury, H., González, D., Guerra, R., Pomare, A., et al. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de las aguas residuales en la corporación

- universitaria de la Costa. *Seminario Internacional sobre métodos naturales para el tratamiento de Aguas Residuales*. Instituto Cinara (pp. 149-155).
- Black, P.E., 1996. *Watershed Hydrology*, Second Edition, Lewis Publisher Boca Raton, Florida, U.S.A.
- Brix, H. 1994. Use of constructed wetlands in water pollution control: historical development, present status, and future perspectives. *Water Science and Technology* 30: 209-223.
- Brooks, K., P. Ffolliott, H. Gregersen y L. DeBano, 1998. *Hydrology and the Management of Watersheds*, 3rd edition, Iowa State University Press.
- Brydon-Miller, M., Greenwood, D., & Maguire, P. (2015). "Introduction to action research: Social research for social change." SAGE Publications.
- Carrasco, R. (2016). Calakmul, la ciudad de los canales. *Arqueología Mexicana*, 23(136), 30-35.
- Chapin, F. S., Folke, C., Kofinas, G. (2009). A Framework for Understanding Change. En Chapin F., G. Kofinas, & C. Folke. (Eds.), *Principles of Ecosystem Stewardship* (pp. 3-28). New York, EE. UU: Springer.
- Chevalier, J. M., & Buckles, D. J. (2019). "Participatory action research: Theory and methods for engaged inquiry." Routledge.
- Clichevsky, N. (2002). *Pobreza y políticas urbano-ambientales en Argentina*. Cepal.
- Colmenares, A. M. (2012). Investigación acción participativa: una metodología integradora de la acción y el conocimiento. *Voces y Silencios: Revista Latinoamericana de Educación*, 3 (1), 102-115.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2016). *Estadística sobre el agua en México 2015*. México: CONAGUA.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2020). *Informe de Sostenibilidad del Agua en México*.
- Comisión Nacional del agua. (CONAGUA) (2015). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Humedales artificiales*.
- Comisión Nacional del agua. (CONAGUA) (2017). *Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Edición 2017*.
- Comisión Nacional del agua. (CONAGUA) (2021). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación*.
- CONANP (2021). *Estrategia Nacional para la Conservación y Uso Sustentable de los Humedales en México*. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.

- Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. (2021). Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión.
- Cotler H. (2010). Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización.
- Cotler, H. y G. Caire, 2009. *Lecciones aprendidas del manejo de cuencas en México*, Instituto Nacional de Ecología-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Fundación Gonzalo Río Arronte, IAP, WWF, Organización Mundial de Conservación, México.
- Cotler, H., Garrido, A., Bunge, V., & Cuevas, M. L. (2010). *Las cuencas hidrográficas de México: diagnóstico y priorización*, 1, 210-215.
- Crites, R. W., Tchobanoglous G. Camargo, M. y Pardo, L. P. (2000). Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados.
- Cross K., Tondera K., Rizzo A., Andrews L., Pucher B., Istenič D., Karres N., McDonald R. (2021). Soluciones basadas en la naturaleza (SbN) para el tratamiento de aguas residuales. Fichas técnicas y casos de estudio. IWA publishing.
- Davidson, N. C., van Dam, A. A., Finlayson, C. M., & McInnes, R. J. (2019). Worth of wetlands: Revised global monetary values of coastal and inland wetland ecosystem services. *Marine and Freshwater Research*, 70(8), 1189-1194.
- De Anda Sánchez J. (2017). Saneamiento descentralizado y reutilización sustentable de las aguas residuales municipales en México. *Sociedad y Ambiente*. 5(14), 119-143.
- De la Peña M., Ducci J., Zamora V., Banco Interamericano de Desarrollo. (2013). *Tratamiento de aguas residuales en México*. <https://webimages.iadb.org/publications/spanish/document/Tratamiento-de-aguas-residuales-en-M%C3%A9xico.pdf>
- default/files/documents/library/handbook1_5ed_introductiontoconvention_s_final.pdf
- Delgadillo, O. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Nelson Antequera.
- Dixon, M. J., Loh, J., Davidson, N. C., Beltrame, C., Freeman, R., & Walpole, M. (2016). Tracking global change in ecosystem area: The Wetland Extent Trends index. *Biological Conservation*, 193, 27-35.
- Domínguez-Montero, L. E., Poggi-Varaldo, H. M., Cañizares-Villanueva, R. O., Viveros, A. A. P., Rinderknecht-Seijas, N., Caffarel-Méndez, S., & de la Cruz-Burelo, E. (2024). Regulaciones para la descarga de aguas residuales de México: comparación con otros países y su cumplimiento en plantas de tratamiento seleccionadas. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 40, 289-312.
- Dourojeanni Axel, Jouravlev Andrei,Chávez Guillermo (2002). *Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica*. Recursos naturales e infraestructura. UN. CEPAL.

- Dourojeanni, Axel y Andrei Jouravlev (2001). *Crisis de gobernabilidad en la gestión del agua: Desafíos que enfrenta la implementación de las recomendaciones contenidas en el capítulo 18 del Programa 21*. CEPAL.
- Estrada, M. L. G. (2022). Urbanización e industrialización de la ciudad de Querétaro en el siglo XX. *El Colegio de San Luis*, 12(23), 1-30.
- Fernández, D., Muntañez, A., Sarmanto, N. (2022). Diagnóstico de la prestación de los servicios de agua potable y alcantarillado en México.
- Fuentealba Godoy J. A. (2017). Efecto de la vegetación y la carga superficial en la distribución de tiempos de retención de humedales artificiales para la remoción de arsénico.
- García-García, P. L., L. Ruelas-Monjardín y J. L. Marín-Muñiz. (2016). Constructed wetlands: a solution to water quality issues in Mexico? *Water Policy* 18(3): 654-669
- García-Searcy, V., Villada-Canela, M., Anglés-Hernández, M., Torres, M. C. P., Arredondo-García, M. C., y Daesslé, L. W. (2022). El saneamiento como derecho humano y su inclusión efectiva en el marco jurídico e institucional de México. *Sociedad y Ambiente*, (25), 1-34.
- Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., Senisterra, G. E., Delgado, M. I., y Besteiro, S. (2013). Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas. Series: Libros de Cátedra.
- Gonzales Rivera, S. C., Benavidez Flores, D., Cortes Días, R., y Vásquez Niño, E. (2008). Jabones y detergentes.
- Goryńska-Goldmann, E., & Łuczka-Bakuła, W. (2019). "The use of reed in rural areas." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109, 354-360.
- Guzmán Rodríguez, N. P. (2021). Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión sostenible del agua en América Latina y el Caribe (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- Haro María E., Aponte Nydia O. (2010). Evaluación de un humedal artificial como tratamiento de agua residual en un asentamiento irregular.
- Henze M., Harremoës P., la Cour Jansen J. and Arvin E. (2002) *Wastewater Treatment: Biological and Chemical Processes*, 3rd ed, Springer-Verlag, Berlin.
- Hogenboom M. (2018). How a city that floods is running out of water: <http://www.bbc.com/future/gallery/20180510-how-a-city-thatfloods-is-running-out-of-water>.
- Hritz, C. (2010). Tracing settlement patterns and channel systems in southern Mesopotamia using remote sensing. *Journal of Field Archaeology*, 35(2), 184-203.

- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. IMTA. (2022) ¿Cómo construir un humedal para el tratamiento del agua residual en mi escuela?
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI (2018). Disponible en <https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2018/EstSociodemo/DEFUNCIONES2017.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI (2021). Banco de Información Económica (BIE). Gastos en protección ambiental del sector público.
- Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, Secretaría de Gobernación (2005). «Enciclopedia de los Municipios de México». Archivado desde el original el 19 de mayo de 2007. Consultado el 2023.
- Introducción a la convención sobre los humedales. Recuperado de <https://www.ramsar.org/sites/>
- Janusek, J. W., & Kolata, A. L. (2013). Prehispanic agricultural strategies of intensification in the Lake Titicaca Basin of the Andes. In *Oxford Handbook of Historical Ecology and Applied Archaeology*.
- Junk, W. J., An, S., Finlayson, C. M., Gopal, B., Kvet, J., Mitchell, S. A., ... & Robarts, R. D. (2013). Current state of knowledge regarding the world's wetlands and their future under global climate change: a synthesis. *Aquatic Sciences*, 75(1), 151-167.
- Junk, W. J., An, S., Finlayson, C. M., Gopal, B., Kvet, J., Mitchell, S. A., ... & Robarts, R. D. (2013). Current state of knowledge regarding the world's wetlands and their future under global climate change: a synthesis. *Aquatic Sciences*, 75(1), 151-167.
- Keddy, P. (2010). *Wetlands: an overview*. In: *Wetland ecology: principles and conservation*. New York:
- Kemmis, S., McTaggart, R., & Nixon, R. (2014). "The action research planner: Doing critical participatory action research." Springer.
- Kindon, S., Pain, R., & Kesby, M. (2017). "Participatory action research approaches and methods: Connecting people, participation and place." Routledge.
- Lahera, V. (2010). Infraestructura sustentable: Las plantas de tratamiento de aguas residuales. *Quivera*, Universidad Autónoma del Estado de México, 12 (2), 58-69.
- Laudino, D. G., de Oca Hernández, A. M., & Pérez, S. M. (2019). Humedales artificiales para el desarrollo comunitario: el caso de una comunidad mazahua de México. *Ciencia, Ambiente y Clima*, 2(1), 35-43.
- Ley de Aguas Nacionales. (2022). Diario Oficial de la Federación. México. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión.
- Ley Federal de Responsabilidad Ambiental. (2013). Diario Oficial de la Federación. México. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión.

- Ley que regula la prestación de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento del estado de Querétaro. (2022) La Sombra de Arteaga. Querétaro
- Luna Pabello V.M., Aburto Castañeda S. (2014). Sistemas de humedales artificiales para el control de la eutrofización del lago del Bosque de San Juan de Aragón. *Revista especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 17 (1):32-55.
- MacDonald, C. (2015). "Understanding participatory action research: A qualitative research methodology option." *Canadian Journal of Action Research*, 13(2), 34-50.
- Marín-Muñiz J. Luis. (2016a). Humedales construidos en México para el tratamiento de aguas residuales, producción de plantas ornamentales y reúso del agua. *Revista Agroproductividad* Vol. 10, Num 5, mayo 2017, pp 90-65.
- Marín-Muñiz J. Luis. (2016b). Remoción de contaminantes de aguas residuales por medio de humedales artificiales establecidos en el municipio de Actopan, Veracruz, México. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 15(2): 553-563.
- Marín-Muñiz, J. L. (2017). Humedales construidos en México para el tratamiento de aguas residuales, producción de plantas ornamentales y reúso del agua. *AGRO productividad*, 10(5).
- Martínez O. Pedro et. al. (2022) Sostenibilidad, ambiente y sociedad: los retos de la sostenibilidad en las geografías urbana y rural. Evolución del tratamiento de las aguas residuales municipales rurales en México y el uso de humedales artificiales como alternativa sustentable (2010-2019)
- Martínez Pérez J., Pineda R., Miranda J., (2019). Manejo de aguas residuales en la Carbonera, Querétaro. *Revista Nthe*, núm. 30, pp. 53-58.
- Martínez Valdés, Y., y Villalejo García, V. M. (2018). La gestión integrada de los recursos hídricos: una necesidad de estos tiempos. *Ingeniería hidráulica y ambiental*, 39(1), 58-72.
- Matlock, M. D., & Morgan, R. A. (2018). *Ecological Engineering Design: Restoring and Conserving Ecosystem Services*. John Wiley & Sons.
- McCarthy, M. J., Gardner, W. S., & Lehmann, M. F. (2016). Reconstructing coastal Venice. *Nature*, 533(7601), 34-36.
- McConville, Jennifer R. y Mihelcic, James R. (2007). "Adapting Life-Cycle Thinking Tools to Evaluate Project Sustainability in International Water and Sanitation Development Work". *Environmental Engineering Science*, 24(7), pp. 937-948. doi: 10.1089/ees.2006.0225
- Mitsch, W. J. 2012. What is ecological engineering? *Ecological Engineering*, 45: 5-12.
- Mitsch, W. J., & Gosselink, J. G. (2000). *Wetlands*. Wiley.

- Mitsch, W. J., Bernal, B., & Hernandez, M. E. (2015). Ecosystem services of wetlands. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 11(1), 1-4.
- Morehart, C. T., & Frederick, C. D. (2014). The chronology and collapse of pre-Aztec raised field (chinampa) agriculture in the northern Basin of Mexico. *Antiquity*, 88(340), 531-548.
- Moreno, P. (2008). Los humedales en México: tendencias y oportunidades. *Cuadernos de Biodiversidad*, 35, 1-9.
- Moreno, R., 2018. Evaluación del riesgo de eutrofización del embalse El Quimbo, Huila (Colombia). *Ciencia y Tecnología* [en línea], vol. 10. ISSN 2422-4200. DOI 10.22335/rict.v10i2.461.
- Moreno-Mateos, D., Power, M. E., Comín, F. A., & Yockteng, R. (2012). Structural and functional loss in restored wetland ecosystems. *PLoS Biology*, 10(1), e1001247.
- Naciones Unidas (UN, 2019). Agua y saneamiento. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
- Narváez L., Miranda, J., Narváez, L. (2012). Remoción de contaminantes de aguas grises mediante el uso de Humedales artificiales en viviendas sustentables del estado de Querétaro. *Encuentro Nacional de Ecotecnias*. Obtenido de <https://www.researchgate.net>.
- Norma Oficial Mexicana NOM-001 – SEMARNAT – 2021. (2022). Diario Oficial de la Federación. México. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión.
- Noyola, A., A. Padilla-Rivera , J.M. Morgan- Sagastume, L.E. Guereca, y F. Hernández-Padilla . 2012. Typology of Municipal Wastewater Treatment Technologies in Latin America Clean – Soil, Air, Water. 40 (9): 926–932
- Noyola, Adalberto; Morgan-Sagastume, Juan Manuel, y Güereca, Leonor Patricia (2013). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. Guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas. México: Instituto de Ingeniería-unam, 140 pp.
- Odum, H. T., & Odum, B. (2003). *Concepts and methods of ecological engineering*. *Ecological Engineering*, 20(5), 339-361.
- ONU-HABITAT (2008). Manual de humedales artificiales. Programa agua para las ciudades asiáticas de ONU-HABITAT, Nepal, Katmandú.
- Organización de las Naciones Unidas (2002). El derecho al agua. Comité de Naciones Unidas de Derechos Económicos, Sociales y Culturales. Observación General No. 15.
- Organización Mundial de la Salud. (OMS, 2022) Agua para consumo humano. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>

- Orozco Randall Marín (2001), "Competencias municipales en materia ambiental", Instituto de Fomento y Asesoría Municipal (IFAM).
- Osorio, P. E., & Pérez Bustamante, L. (2019). Propuesta de humedales artificiales, impulsores de biodiversidad, que depuran aguas contaminadas para la recuperación de lagunas urbanas de concepción. *Hábitat sustentable*, 9(1), 20-31.
- Palma-Cabrera, E. M., Marín-Muñiz, J. L., & Ruelas-Monjardín, L. C. (2022). Limitantes para la adopción de humedales artificiales: estudio de caso con perspectiva de género en Pastorías, Actopan, Veracruz. *Journal of Basic Sciences*, 8(23), 170-178.
- Pan American Health Organization (PAHO), (2022). Saneamiento básico: agua segura, disposición de excretas y manejo de la basura: cuadernillo para capacitaciones con enfoque intercultural en áreas rurales.
- Pineda R. Generando alternativas para el desarrollo de la microcuenca San Antonio de la Cal (SAC)-Bernal. Plan de manejo de la maestría de gestión integrada de cuencas de la Universidad Autónoma de Querétaro.
- Ramsar Convención sobre los Humedales. (2016). Manual de la Convención Ramsar 5a edición.
- Rebelo, L. M., Finlayson, C. M., & Nagabhatla, N. (2010). Remote sensing and GIS for wetland inventory, mapping and change analysis. *Journal of Environmental Management*, 90(7), 2144-2153.
- Rentable para Tratamiento de Aguas Residuales. Revisado en Abril 2017 (Foto Humedal Arcata,
- Riveros R. D. (2003). "¿Por qué una gestión integral de cuencas con énfasis en el rol y la participación ciudadana?". Portal Sobre Conservación y Equidad Social, Quito, Ecuador.
- Rodríguez, A. (2011). Evaluación del sistema de Tratamiento de aguas residuales. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.
- Rodríguez, B., (2008). "Agua y saneamiento en México: avances, errores y alternativas en El agua potable en México", Asociación nacional de empresas de agua y saneamiento Ac., México, 29-47.
- Rodríguez, CV. y Quintana, R., (2002). "Paradojas conceptuales del género en procesos de cambio de mujeres indígenas y campesinas en el México rural", Cinta moebio, 13, 143-152.
- Rodríguez, G. A. V. (2015) La Ingeniería Ecológica en la era del Antropoceno urbano. Herrania 11-1.
- Romero C., Landa F., (2023). Pre diagnóstico comunitario: Microcuencas Bernal y San Pedro Tolimán.

- Romero Pérez, R., López Mera, R., Martínez Ruiz, J. L., López Ramírez, E., Millán Malo, G., & Soares Moraes, D. (2018). Estudio de la factibilidad ambiental, desarrollo sustentable, urbano, social y legal para el desarrollo de estrategias participativas y de mediación social para la construcción de sistemas de humedales artificiales (SHA) para el saneamiento del aporte del Río Amanalco a la Presa Valle de Bravo.
- Ruíz, P. (2017). Neoliberal reforms and nafta in Mexico. *Economía UNAM*, 14(41), 75-89.
- Rzedowski, J., 2006. Vegetación de México. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, 504 pp.
- Sandoval L.C., Marín-Muñiz J.L., Alvarado A., Castelán R., Ramírez D. (2016). Diseño de un Mesocosmo de Humedal Construidos con Materiales Alternativos Para el Tratamiento de Aguas Residuales en la Comunidad de Pastorías Actopan, Ver.
- Secretaría de Desarrollo Agropecuario (SEDEA), (2022). Biofiltros para el tratamiento y reutilización de aguas grises. Dirección de Integración Regenerativa de San Juan del Río, Qro.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2021). NOM-001-SEMARNAT-2021, Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. SEMARNAT (2013). Cuencas Hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión.
- Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana (sspc) (2002). "Sequías", en Serie Fascículos, México, Coordinadora Nacional de Protección Civil, Director General del Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred).
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 1991- 2020) Información climatológica en el Estado de Querétaro.
- Sistema de Información Nacional del Agua (SINA, 2019).
- Solanes M. (1998). "Manejo integrado del recurso agua, con la perspectiva de los principios de Dublín", *Revista de la CEPAL*, N° 64: pp. 165-185, ISSN: 0252-0257, Santiago de Chile, Chile.
- Suutari, A. & Marten, G. 2007. EUA-California (Arcata)-Humedal Costero Artificial: Una Alternativa California). Disponible en: <http://www.ecoinflexiones.org/foto/eua-california-arcata-humedal-artificial.html>.
- Tilley, E., Ulrich, L., Philippe, R., Roland, S., y Christian, Z. (2018). Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento. Instituto Federal Suizo para la Ciencia y la Tecnología Acuática, Departamento de Saneamiento, Agua y Residuos Sólidos para el Desarrollo (Sandec).
- Toledo, V. M., Barrera-Bassols, N., y Boege, E. (2019). ¿Qué es la diversidad biocultural?. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

- UNESCO (2021) Estrategias para el aumento de la disponibilidad y mejoramiento de la eficiencia hídrica en América Latina y el Caribe. Documento técnico No. 43.
- UNESCO. (2017). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos hídricos 2019: No dejar a nadie atrás. Retrieved from <https://unesdoc>.
- UNESCO. (2019). Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales, el recurso desaprovechado. Francia: United Nations International Children's Emergency Fund (UNICEF, 2021).
- Vallero D., Brasier C. (2008), Sustainable Design: The Science of Sustainability and Green Engineering.
- Vargas, J. C. V., Nigenda, J. J. D., y Martínez, L. V. (2007). La gestión integrada de los recursos hídricos en México: un nuevo paradigma en el manejo del agua. El manejo integral de cuencas en México, 213-258.
- Vásquez, A., Mejía, A., Faustino, J., Terán, R., Vásquez, I., Díaz, J., ... y Alcántara, J. (2016). Manejo y gestión de cuencas hidrográficas.
- Vera-Puerto, I., & Arias, C. A. (2017). Humedales para tratamiento: Tratamiento biológico de aguas residuales. *IWA Publishing*. Vol 7.
- Vidal, G., y Hormazábal, S. (2018). Humedales construidos: Diseño y operación.
- Villanueva, J., 2002. Microcuencas, Universidad Autónoma de Chapingo, Texcoco, México.
- Vymazal J., (2014). "Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: A review," *Ecological Engineering*, vol. 73, pp. 724–751.
- Vymazal, J. (2011). Constructed wetlands for wastewater treatment: Five decades of experience. *Environmental Science y Technology*, 45, 61-69.
- Walker, J., T. Dowling y S. Veitch. 2006. An Assessment of Catchment Condition in Australia, *Ecological Indicators*, Volume 6(1): 205-214.
- Wallace, S., Knight, R. (2006). Small-Scale Constructed Wetland Treatment Systems Feasibility, Design Criteria and O&M Requirements. Wastewater Treatment and reuse. Reporte final. Water Environment Research Foundation (WERF). IWA Publishing. Estados Unidos. 350 pp.
- Wilson, P. (2011). The archaeology of the Nile Delta, Egypt: Problems and priorities. In F. Hassan (Ed.), *African Archaeological Review* (Vol. 28, pp. 283-294).
- World Health Organization (WHO, 2019) Planificación de la seguridad del saneamiento.
- World Vision, (2004) Manual de manejo de cuencas. 2da Edición. Visión mundial El Salvador.
- Xu, X. R., Li, X. Y., Xia, E. Q., & Li, H. B. Environmental problems of harbors in hong kong. *advances in environmental research*, 165.

- Zitácuaro-Contreras, I., Marín-Muñiz, J. L., Pérez, M. D. C. C., Alvarez, M. V., Estrada, X. D. A. L., & Castro, S. A. Z. (2022). Vegetación ornamental utilizada en fitorremediación y sus potencialidades ambientales, económicas y sociales. *Journal of Basic Sciences*, 8(23), 133-145.
- Zurita F., Castellanos-Hernández O.A., Rodríguez-Sahagún A. (2011). El tratamiento de las aguas residuales municipales en las comunidades rurales de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 1(1): 139-150.
- Zurita, F., E.D. Roy y J.R. White. (2012). Municipal wastewater treatment in Mexico: current status and opportunities for employing ecological treatment systems. *Environmental Technology*. 33 (10): 1151-1158.

11 Glosario

Absorción. Paso de agua y de sustancias presentes en ella, disueltas en el interior de una célula o un organismo.

Adsorción. Adherencia por unión química o física de un contaminante a una superficie sólida.

Afluente. En términos de tratamiento de aguas residuales se refiere al agua cruda (agua sin tratar) que ingresa al sistema de tratamiento. En términos de agua superficial es el agua u otro líquido que ingresa en un embalse o estanque.

Aguas grises. Aguas domésticas residuales compuestas por agua de lavar procedente de la cocina, cuarto de baño, aguas de los fregaderos, y lavaderos.

Aguas residuales. Las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas.

Asimilación. Separación de líquidos, de gases, de coloides o de materia suspendida en un medio por adherencia a la superficie o a los poros de un sólido.

Eutrofización. Aumento de nutrientes en el agua que, en general, conlleva un excesivo desarrollo de algas y microorganismos consumidores de oxígeno que afectan principalmente a la vida de la fauna acuática habitual.

HAT: Humedales Artificiales de Tratamiento

12 Anexos.

Anexo 1. Límites permisibles para la descarga de aguas en cuerpos receptores.

Parámetros (*) (miligramos por litro, excepto cuando se especifique)	Ríos, arroyos, canales, drenes			Embalses, lagos y lagunas			Zonas marinas mexicanas			Suelo									
	P.M	P.D.	V.L.	P.M	P.D.	V.L.	P.M	P.D.	V.L.	Riego de áreas verdes			Infiltración y otros riegos			Cárstico			
										P.M	P.D.	V.L.	P.M	P.D.	V.L.	P.M	P.D.	V.L.	
Temperatura (°C)	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
Grasas y Aceites	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21	21
Sólidos Suspendidos Totales	60	72	84	20	24	28	20	24	28	30	36	42	100	120	140	20	24	28	28
Demanda Química de Oxígeno	150	180	210	100	120	140	85	100	120	60	72	84	150	180	210	60	72	84	84
Carbono Orgánico Total*	38	45	53	25	30	35	21	25	30	15	18	21	38	45	53	15	18	21	21
Nitrógeno Total	25	30	35	15	25	30	25	30	35	NA	NA	NA	NA	NA	NA	15	25	30	30
Fósforo Total	15	18	21	5	10	15	15	18	21	NA	NA	NA	NA	NA	NA	5	10	15	15
Huevos de Helmintos (huevos/litro)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1									
Escherichia coli, (NMP/100 ml)	250	500	600	250	500	600	250	500	600	250	500	600	250	500	600	50	100	200	200
Enterococos fecales* (NMP/100 ml)	250	400	500	250	400	500	250	400	500	250	400	500	250	400	500	50	100	200	200
pH (UpH)	6-9																		
Color verdadero	Longitud de onda									Coeficiente de absorción espectral máximo									
	436 nm									7,0 m ⁻¹									
	525 nm									5,0 m ⁻¹									
	620 nm									3,0 m ⁻¹									
Toxicidad aguda (UT)	2 a los 15 minutos de exposición																		

(Fuente: NOM-001 SEMARNAT-2021)

Anexo 2: Carta descriptiva de primer taller.

Propuesta de diseño de humedales artificiales como alternativa de saneamiento y aprovechamiento hídrico en la microcuenca Mesa de Ramírez, Tolimán, Querétaro.		
SESIÓN 1	RECONECTANDO CON EL TERRITORIO	Fecha: 07/11/2023
OBJETIVO: Identificar los elementos existentes en el territorio, así como reconocer las problemáticas existentes, y los puntos críticos de localización de esas problemáticas.		Hora: 14:00 DURACIÓN 3.5 hr.
INSTRUCTOR JC Gamboa	REQUERIMIENTOS: Espacio al aire libre con sombra y mesas para dibujar sobre cartulinas.	PARTICIPANTES:
TEMA	DESCRIPCIÓN Y CONTENIDO	MATERIALES
1. Presentación (10 min.)	Se les da la bienvenida a las asistentes y se les explica el contenido de los talleres, así como la finalidad del proyecto. <ol style="list-style-type: none"> 1. Presentación personal: Nombre, institución, programa, proyecto. 2. Beneficios del taller: identificación de las aguas contaminadas, formas de tratamiento del agua, capacitación sobre humedales artificiales. 3. Compromisos con los talleres. 	- Lista de asistencia
2. Dinámica (15 min)	Dinámica de integración o trabajo en equipo, de preferencia que incorpore el elemento agua. <ol style="list-style-type: none"> 1. En un papel escriben 1 cosa que les guste hacer y 1 que no les guste que la mayoría no sepa. 2. Al finalizar envuelven el papel y lo colocan en un bote. 3. Cada uno tomará un papel y tendrá que adivinar quien lo escribió. <p>Esta dinámica expone que no siempre conocemos del todo a las personas ya que siempre estamos en constante cambio como el agua. Esto nos ayuda a generar lazos de empatía y apoyo con los miembros de la comunidad, siempre podemos hacer equipo con alguien que comparte otras cosas en común.</p>	- Hojas de papel - Recipiente
3. ¿Qué es una cuenca? (30 min)	Conocer la unidad territorial que integra las actividades y recursos regionales. <ol style="list-style-type: none"> 1. Explicación de la delimitación por medio de dibujos y representación. 2. Elementos de la cuenca: Seres vivos, recursos naturales, actividades. 3. Integración con un sentido de cuidado y conservación. 	- Pizarrón
4. Mapeo del territorio (90 min)	Los asistentes dibujan mapas para identificar los diferentes aspectos de la cuenca: <ol style="list-style-type: none"> 1. Mapa de la cuenca con los elementos más representativos (Recursos, actividades, zonas, escurrimientos, problemáticas). 2. Mapa de la comunidad con la localización de las descargas de aguas y otros contaminantes. 3. Explicar el mapa, así como las problemáticas o beneficios que se tienen con las localizaciones. 	- Mapas impresos - Cartulinas - Plumones
5. Identificación de problemática (60 min)	Identificar la problemática principal con sus posibles soluciones. El muro de la grandeza: - Hacer una lluvia de ideas y anotar en una columna las cosas que les enorgullecen de su comunidad, cultura, recursos. (lo que se tiene) - Hacer otra columna las necesidades, cosas que desean mejorar, problemáticas existentes. (lo que se necesita) <ol style="list-style-type: none"> 1. Matriz de evaluación de soluciones. 2. Diagrama de impacto 3. Indicadores de impacto 	- Formatos impresos de cada herramienta
3. Cierre de sesión (15 min)	Los asistentes exponen el interés en el tema y participación para los próximos talleres.	Minuta de reunión

Anexo 3: Listas de asistencia de los talleres impartidos.

Propuesta de humedales artificiales como alternativa de saneamiento y aprovechamiento hídrico en la microcuenca Mesa de Ramírez, Toluimán, Querétaro.			
SESIÓN 1	REUNIÓN INFORMATIVA	Fecha: 14/10/2023	Hora: 10:00
OBJETIVO: Explicar a los interesados la propuesta del estudio de investigación e invitar a participar en los talleres y recorridos con el fin de integrar a los pobladores en una propuesta colaborativa.		DURACIÓN: 2 hr.	
INSTRUCTOR Ing. JC Gamboa	REQUERIMIENTOS: Espacio al aire libre con sombra y lugares para sentarse, que sea cómodo para los habitantes para realizar una plática amena.	PARTICIPANTES: Indefinidos.	
NOMBRE		FIRMA	
Juho Cesar Sanchez Morales	4421340659		
Viridiana Dimas Elias			
Adán Morales			
Maria Morales Sánchez	442498338		
Mrs. Avelina Sánchez Luna			
Rosela Nolasco Serna Landa	4412498338		
Maria Santa Morales Sanchez	4412486020		
Mrs. Natalia Gonzalez Morales			
Catalina Sanchez Luna			
Maura Morales de Santiago			
Lidubina Sanchez Morales			
Estela Gonzalez Morales			

Propuesta de humedales artificiales como alternativa de saneamiento y aprovechamiento hídrico en la microcuenca Mesa de Ramírez, Toluimán, Querétaro.			
SESIÓN 1	RECONECTANDO CON EL TERRITORIO	Fecha: 07/11/2023	Hora:
OBJETIVO: Identificar los elementos existentes en el territorio, así como reconocer las problemáticas existentes, y los puntos críticos de localización de esas problemáticas.		DURACIÓN:	
INSTRUCTOR JC Gamboa	REQUERIMIENTOS: Espacio al aire libre con sombra y mesas para dibujar sobre cartulinas.	PARTICIPANTES: Indefinidos.	
NOMBRE		FIRMA	
Martene de Santiago de Santiago			
Diana Lora de Santiago Morales			
Laura Morales Morales	4411208930		
Catalina Gonzalez de Santiago			
Rosela Nolasco Serna Landa			
Mrs. Avelina Sánchez Luna			
Mrs. Natalia Gonzalez Morales			
Catalina Sanchez Luna			
FINRA Gonzalez de Santiago			
Irizatea Gonzalez Morales	4411214379		
Susana Leon Morales			
Maria Isabel de León Morales	441206448		
Dolores Mónica Alvarado De León	4412621189		
Florencia Morales Morales			
Guadalupe Gonzalez Morales			
Georgina Morales Morales	4411521438		
Graciela Sanchez Morales			
Mrs. Leticia Morales Sanchez	4411012406		
Rosela Nolasco Serna Landa			
Maria Magdalena Morales Morales	4411082104		

Anexo 4: Caracterización ambiental de ríos.

HOJA DE DATOS DE CAMPO DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA/CALIDAD DEL AGUA EN BASE AL PROTOCOLO DE BIOEVALUACIÓN RÁPIDA PARA USO EN ARROYOS Y RÍOS VADEABLES.

Nombre del arroyo: <i>Las adjuntas</i>		Ubicación: <i>Bomintzá, Tolimán</i>	
ID: <i>Manantial principal</i>		Tipo de corriente: <i>Intermitente</i>	
Coordenadas: <i>20.9454, -100.0022</i>		Cuenca: <i>Mesa de Ramírez</i>	
Tramo: <i>1</i>		Equipo: <i>Único</i>	Institución: <i>Universidad Autónoma de Querétaro</i>
Investigadores: <i>Juan Carlos Gamboa Soto</i>			
Realiza: <i>Natalia Morales</i>		Fecha: <i>16/04/24</i>	Hora: <i>12:10</i>
Motivo de registro: <i>Monitoreo participativo</i>			
CONDICIONES CLIMÁTICAS		Hoy	Ayer
	Tormenta	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Lluvia	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Brisa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Nublado	<input type="checkbox"/> <u>10</u> %	<input type="checkbox"/> <u>5</u> %
	Soleado	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
¿Ha llovido en los últimos 7 días? <input type="checkbox"/> Sí <input checked="" type="checkbox"/> No			
Temperatura <u>30</u> °C			
UBICACIÓN DEL SITIO	Mapa del sitio		
			
CARACTERIZACIÓN DEL ARROYO	Sistema de arroyo <input type="checkbox"/> Perenne <input type="checkbox"/> Intermitente <input checked="" type="checkbox"/> De temporal		Tipo de arroyo <input checked="" type="checkbox"/> Agua fría <input type="checkbox"/> Agua cálida
	Origen del arroyo <input checked="" type="checkbox"/> Manantial <input type="checkbox"/> Glacial <input checked="" type="checkbox"/> Escurrimientos <input type="checkbox"/> Diferentes orígenes <input type="checkbox"/> Pantano <input type="checkbox"/> Otro		Longitud del cauce: <u>16.67</u> km
CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA	Uso de suelo predominante <input type="checkbox"/> Forestal <input type="checkbox"/> Comercial <input type="checkbox"/> Pastizal <input type="checkbox"/> Industrial <input checked="" type="checkbox"/> Agricultura <input checked="" type="checkbox"/> Otro: <i>Matorral</i> <input checked="" type="checkbox"/> Residencial		Contaminación difusa en cuencas locales <input checked="" type="checkbox"/> Sin evidencia <input type="checkbox"/> Fuentes potenciales <input type="checkbox"/> Fuentes obvias Fuentes:
			Erosión de la cuenca local <input type="checkbox"/> Ninguna <input type="checkbox"/> Moderada <input checked="" type="checkbox"/> Fuerte

VEGETACIÓN RIPARIA (DISTANCIA 18 M)	Especies dominantes <input checked="" type="checkbox"/> Árboles <input checked="" type="checkbox"/> Arbustos <input type="checkbox"/> Pastos <input type="checkbox"/> Hierbas Especies dominantes presentes: <i>Mezquite (Prosopis juliflora), Álamo (Populus tremula), pirul (Schinus molle), encino (Quercus ilex),</i>	
CARACTERÍSTICAS DEL ARROYO	Longitud de alcance estimada: <u>1</u> m Ancho estimado del arroyo: <u>5</u> m Área de alcance de muestreo: <u>450</u> m ² Área: <u>100</u> km ² Profundidad estimada del arroyo: <u>0.30</u> m Velocidad de la superficie del canal: <u>N/A</u> m/seg Pendiente promedio: <u>15</u> %	Cubierta del dosel <input checked="" type="checkbox"/> Semi abierto <input type="checkbox"/> Semi sombreado <input type="checkbox"/> Sombreado Marca máxima de agua: <u>1.20</u> m Proporción de alcance representada por los tipos de morfología del arroyo: <input type="checkbox"/> Rápido <input type="checkbox"/> Con corriente <input checked="" type="checkbox"/> Estancado Canalizado <input type="checkbox"/> Sí <input checked="" type="checkbox"/> No Represado <input type="checkbox"/> Sí <input checked="" type="checkbox"/> No
VEGETACIÓN ACUÁTICA	Tipos dominantes: <input checked="" type="checkbox"/> Emergente enraizada <input type="checkbox"/> Sumergido enraizada <input type="checkbox"/> Flotante enraizada <input type="checkbox"/> Flotante libre <input type="checkbox"/> Algas flotantes <input type="checkbox"/> Algas adheridas Especies dominantes presentes: <i>Hierba estrella (Cyperus pseudovegetus), Carrizo (Phragmites australis).</i> Porción del tramo con vegetación acuática <u>40</u> %	
MADERA Y RAÍCES	<input type="checkbox"/> Raíces gruesas <input type="checkbox"/> Raíces pequeñas <input type="checkbox"/> Troncos <input type="checkbox"/> Ramas <input checked="" type="checkbox"/> Varas <input checked="" type="checkbox"/> Hojas	
CALIDAD DEL AGUA	Olor <input checked="" type="checkbox"/> Ninguno <input type="checkbox"/> Aguas residuales <input type="checkbox"/> Petróleo <input type="checkbox"/> Químicos <input type="checkbox"/> Pescado <input type="checkbox"/> Otro _____ Sólidos en superficie del agua <input checked="" type="checkbox"/> Ninguno <input type="checkbox"/> Residuos orgánicos <input type="checkbox"/> Espumas <input type="checkbox"/> Desechos <input type="checkbox"/> Aceites <input type="checkbox"/> Otro _____ Turbidez <input checked="" type="checkbox"/> Claro <input type="checkbox"/> Semi turbio <input type="checkbox"/> Turbio <input type="checkbox"/> Opaco <input type="checkbox"/> Teñido <input type="checkbox"/> Otro Color:	Temperatura <u>24</u> °C Conductancia específica: _____ Oxígeno disuelto _____ PH _____ Turbidez _____ Turbiometro Diámetro: <u>5</u> cm Longitud: <u>100</u> cm Profundidad visible <u>80</u> cm
SEDIMENTO / SUSTRATO	Olor <input checked="" type="checkbox"/> Normal <input type="checkbox"/> Aguas residuales <input type="checkbox"/> Petróleo <input type="checkbox"/> Químicos <input type="checkbox"/> Anaerobio <input type="checkbox"/> Ninguno <input type="checkbox"/> Otro _____ Depósitos <input checked="" type="checkbox"/> Ninguno <input type="checkbox"/> Residuos orgánicos <input type="checkbox"/> Desechos <input type="checkbox"/> Grasas <input type="checkbox"/> Otro _____	Rocas <input checked="" type="checkbox"/> Grandes <input type="checkbox"/> Medianas <input type="checkbox"/> Pequeñas <input checked="" type="checkbox"/> Cantos redondos <input type="checkbox"/> Cantos angulares <input type="checkbox"/> Lisa <input checked="" type="checkbox"/> Áspera <input type="checkbox"/> Porosa <input type="checkbox"/> Otro _____ ¿Las partes inferiores de las piedras no incrustadas son de color negro? <input checked="" type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No

**HOJA DE DATOS DE CAMPO DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA/CALIDAD DEL AGUA
EN BASE AL PROTOCOLO DE BIOEVALUACIÓN RÁPIDA PARA USO EN ARROYOS Y RÍOS VADEABLES.**

Nombre del arroyo: <i>Las adjuntas</i>		Ubicación: <i>Bomintzá, Toluán</i>	
ID: <i>Puente</i>		Tipo de corriente: <i>intermitente</i>	
Coordenadas: <i>20.9449, -100.0007</i>		Cuenca: <i>Mesa de Ramírez</i>	
Tramo: <i>2</i>		Equipo: <i>Único</i>	Institución: <i>Universidad Autónoma de Querétaro</i>
Investigadores: <i>Juan Carlos Gamboa Soto</i>			
Realiza: <i>Natalia Morales</i>		Fecha: <i>16/04/24</i>	Hora: <i>12:45</i>
Motivo de registro: <i>Monitoreo participativo</i>			
CONDICIONES CLIMÁTICAS	Hoy	Ayer	¿Ha llovido en los últimos 7 días?
	Tormenta <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Sí <input checked="" type="checkbox"/> No
	Lluvia <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Brisa <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Temperatura <u>30</u> C°
	Nublado <input type="checkbox"/> <u>10</u> %	<input type="checkbox"/> <u>5</u> %	
Soleado <input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
UBICACIÓN DEL SITIO	Mapa del sitio		
			
CARACTERIZACIÓN DEL ARROYO	Subsistema de arroyo		Tipo de arroyo
	<input type="checkbox"/> Perenne <input checked="" type="checkbox"/> Intermitente <input type="checkbox"/> De temporal		<input checked="" type="checkbox"/> Agua fría <input type="checkbox"/> Agua cálida
CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA	Origen del arroyo		Longitud del cauce: <u>16.67</u> km
	<input checked="" type="checkbox"/> Manantial <input type="checkbox"/> Glacial		
CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA	<input checked="" type="checkbox"/> Escurrimientos <input type="checkbox"/> Diferentes orígenes		
	<input type="checkbox"/> Pantano <input type="checkbox"/> Otro		
	Uso de suelo predominante		Contaminación difusa en cuencas locales
<input type="checkbox"/> Forestal <input type="checkbox"/> Comercial		<input type="checkbox"/> Sin evidencia	
<input type="checkbox"/> Pastizal <input type="checkbox"/> Industrial		<input type="checkbox"/> Fuentes potenciales	
<input checked="" type="checkbox"/> Agricultura <input checked="" type="checkbox"/> Otro: <i>Matorral</i>		<input checked="" type="checkbox"/> Fuentes obvias	
<input checked="" type="checkbox"/> Residencial		Fuentes: <i>Espumas de detergentes</i>	
		Erosión de la cuenca local	
		<input type="checkbox"/> Ninguna <input type="checkbox"/> Moderada <input checked="" type="checkbox"/> Fuerte	

VEGETACIÓN RIPARIA (DISTANCIA 18 M)	Especies dominantes <input checked="" type="checkbox"/> Árboles <input checked="" type="checkbox"/> Arbustos <input type="checkbox"/> Pastos <input type="checkbox"/> Hierbas Especies dominantes presentes: <i>Álamo (Populus tremula), Sauce (Salix chilensis), Carrizo (Phragmites australis).</i>	
CARACTERÍSTICAS DEL ARROYO	Longitud de alcance estimada: <u>1000</u> m Ancho estimado del arroyo: <u>2.5</u> m Área de alcance de muestreo: <u>50</u> m ² Área: <u>100</u> km ² Profundidad estimada del arroyo: <u>0.15</u> m Velocidad de la superficie del canal: <u>N/A</u> m/seg Pendiente promedio: <u>15</u> %	Cubierta del dosel <input type="checkbox"/> Semi abierto <input checked="" type="checkbox"/> Semi sombreado <input type="checkbox"/> Sombreado Marca máxima de agua: <u>0.60</u> m Proporción de alcance representada por los tipos de morfología del arroyo: <input type="checkbox"/> Rápido <input type="checkbox"/> Con corriente <input checked="" type="checkbox"/> Estancado Canalizado <input type="checkbox"/> Si <input checked="" type="checkbox"/> No Repesado <input checked="" type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No
VEGETACIÓN ACUÁTICA	Tipos dominantes: <input checked="" type="checkbox"/> Emergente enraizada <input type="checkbox"/> Sumergido enraizada <input type="checkbox"/> Flotante enraizada <input type="checkbox"/> Flotante libre <input type="checkbox"/> Algas flotantes <input type="checkbox"/> Algas adheridas Especies dominantes presentes: <i>Cálamo (Acorus calamus),</i> Porción del tramo con vegetación acuática <u>20</u> %	
MADERA Y RAÍCES	<input type="checkbox"/> Raíces gruesas <input checked="" type="checkbox"/> Raíces pequeñas <input type="checkbox"/> Troncos <input type="checkbox"/> Ramas <input checked="" type="checkbox"/> Varas <input type="checkbox"/> Hojas	
CALIDAD DEL AGUA	Olor <input type="checkbox"/> Ninguno <input type="checkbox"/> Aguas residuales <input type="checkbox"/> Petróleo <input type="checkbox"/> Químicos <input type="checkbox"/> Pescado <input checked="" type="checkbox"/> Otro: <u>Jabones</u> Sólidos en superficie del agua <input type="checkbox"/> Ninguno <input type="checkbox"/> Residuos orgánicos <input checked="" type="checkbox"/> Espumas <input type="checkbox"/> Desechos <input type="checkbox"/> Aceites <input type="checkbox"/> Otro _____ Turbidez <input type="checkbox"/> Claro <input checked="" type="checkbox"/> Semi turbio <input type="checkbox"/> Turbio <input type="checkbox"/> Opaco <input type="checkbox"/> Teñido <input type="checkbox"/> Otro Color:	Temperatura <u>24</u> °C Conductancia específica: _____ Oxígeno disuelto _____ PH _____ Turbidez _____ Turbiometro Diámetro: <u>5</u> cm Longitud: <u>100</u> cm Profundidad visible <u>45</u> cm
SEDIMENTO / SUSTRATO	Olor <input checked="" type="checkbox"/> Normal <input type="checkbox"/> Aguas residuales <input type="checkbox"/> Petróleo <input type="checkbox"/> Químicos <input type="checkbox"/> Anaerobio <input type="checkbox"/> Ninguno <input type="checkbox"/> Otro _____ Depósitos <input type="checkbox"/> Ninguno <input checked="" type="checkbox"/> Residuos orgánicos <input type="checkbox"/> Desechos <input type="checkbox"/> Grasas <input type="checkbox"/> Otro _____	Rocas <input type="checkbox"/> Grandes <input checked="" type="checkbox"/> Medianas <input checked="" type="checkbox"/> Pequeñas <input type="checkbox"/> Cantos redondos <input checked="" type="checkbox"/> Cantos angulares <input checked="" type="checkbox"/> Lisa <input type="checkbox"/> Áspera <input type="checkbox"/> Porosa <input type="checkbox"/> Otro _____ ¿Las partes inferiores de las piedras no incrustadas son de color negro? <input checked="" type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No

**HOJA DE DATOS DE CAMPO DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA/CALIDAD DEL AGUA
EN BASE AL PROTOCOLO DE BIOEVALUACIÓN RÁPIDA PARA USO EN ARROYOS Y RÍOS VADEABLES.**

Nombre del arroyo: <i>Las adjuntas</i>		Ubicación: <i>Bomintzá, Tolimán</i>	
ID: <i>Escurrimiento</i>		Tipo de corriente: <i>Intermitente</i>	
Coordenadas: <i>20.9449, -100.0004</i>		Cuenca: <i>Mesa de Ramírez</i>	
Tramo: <i>3</i>		Equipo: <i>Único</i>	Institución: <i>Universidad Autónoma de Querétaro</i>
Investigadores: <i>Juan Carlos Gamboa Soto</i>			
Realiza: <i>Natalia Morales</i>		Fecha: <i>16/04/24</i>	Hora: <i>13:30</i>
Motivo de registro: <i>Monitoreo participativo</i>			
CONDICIONES CLIMÁTICAS	Hoy	Ayer	¿Ha llovido en los últimos 7 días?
	Tormenta <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Sí <input checked="" type="checkbox"/> No
	Lluvia <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Brisa <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Temperatura <u>30</u> C°
	Nublado <input type="checkbox"/> <u>10</u> %	<input type="checkbox"/> <u>5</u> %	
Soleado <input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
UBICACIÓN DEL SITIO	Mapa del sitio		
			
CARACTERIZACIÓN DEL ARROYO	Subsistema de arroyo		Tipo de arroyo
	<input type="checkbox"/> Perenne <input checked="" type="checkbox"/> Intermitente <input type="checkbox"/> De temporal		<input checked="" type="checkbox"/> Agua fría <input type="checkbox"/> Agua cálida
CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA	Origen del arroyo		Longitud del cauce: <u>16.67</u> km
	<input checked="" type="checkbox"/> Manantial <input type="checkbox"/> Glacial		
	<input checked="" type="checkbox"/> Escurrimientos <input type="checkbox"/> Diferentes orígenes		
	<input type="checkbox"/> Pantano <input type="checkbox"/> Otro		
Uso de suelo predominante		Contaminación difusa en cuencas locales	
<input type="checkbox"/> Forestal <input type="checkbox"/> Comercial		<input type="checkbox"/> Sin evidencia	
<input type="checkbox"/> Pastizal <input type="checkbox"/> Industrial		<input type="checkbox"/> Fuentes potenciales	
<input checked="" type="checkbox"/> Agricultura <input checked="" type="checkbox"/> Otro: <i>Matorral</i>		<input checked="" type="checkbox"/> Fuentes obvias	
<input checked="" type="checkbox"/> Residencial		Fuentes: <i>Espumas de detergentes</i>	
		Erosión de la cuenca local	
		<input type="checkbox"/> Ninguna <input type="checkbox"/> Moderada <input checked="" type="checkbox"/> Fuerte	

VEGETACIÓN RIPARIA (DISTANCIA 18 M)	Especies dominantes <input checked="" type="checkbox"/> Árboles <input checked="" type="checkbox"/> Arbustos <input type="checkbox"/> Pastos <input type="checkbox"/> Hierbas Especies dominantes presentes: <i>Mezquite (Prosopis juliflora), Álamo (Populus tremula),</i>	
CARACTERÍSTICAS DEL ARROYO	Longitud de alcance estimada: <u>1000</u> m Ancho estimado del arroyo: <u>3</u> m Área de alcance de muestreo: <u>200</u> m ² Área: <u>100</u> km ² Profundidad estimada del arroyo: <u>0.15</u> m Velocidad de la superficie del canal: <u>0.10</u> m/seg Pendiente promedio: <u>15</u> %	Cubierta del dosel <input type="checkbox"/> Semi abierto <input checked="" type="checkbox"/> Semi sombreado <input type="checkbox"/> Sombreado Marca máxima de agua: <u>0.50</u> m Proporción de alcance representada por los tipos de morfología del arroyo: <input type="checkbox"/> Rápido <input type="checkbox"/> Con corriente <input checked="" type="checkbox"/> Estancado Canalizado <input type="checkbox"/> Si <input checked="" type="checkbox"/> No Represado <input type="checkbox"/> Si <input checked="" type="checkbox"/> No
VEGETACIÓN ACUÁTICA	Tipos dominantes: <input checked="" type="checkbox"/> Emergente enraizada <input type="checkbox"/> Sumergido enraizada <input type="checkbox"/> Flotante enraizada <input type="checkbox"/> Flotante libre <input type="checkbox"/> Algas flotantes <input type="checkbox"/> Algas adheridas Especies dominantes presentes: <i>Carrizo (Phragmites australis).</i> Porción del tramo con vegetación acuática <u>10</u> %	
MADERA Y RAÍCES	<input type="checkbox"/> Raíces gruesas <input type="checkbox"/> Raíces pequeñas <input type="checkbox"/> Troncos <input type="checkbox"/> Ramas <input type="checkbox"/> Varas <input checked="" type="checkbox"/> Hojas	
CALIDAD DEL AGUA	Olor <input type="checkbox"/> Ninguno <input checked="" type="checkbox"/> Aguas residuales <input type="checkbox"/> Petróleo <input type="checkbox"/> Químicos <input type="checkbox"/> Pescado <input type="checkbox"/> Otro: _____ Sólidos en superficie del agua <input type="checkbox"/> Ninguno <input checked="" type="checkbox"/> Residuos orgánicos <input checked="" type="checkbox"/> Espumas <input checked="" type="checkbox"/> Desechos <input checked="" type="checkbox"/> Aceites <input type="checkbox"/> Otro _____ Turbidez <input type="checkbox"/> Claro <input type="checkbox"/> Semi turbio <input type="checkbox"/> Turbio <input type="checkbox"/> Opaco <input checked="" type="checkbox"/> Teñido <input type="checkbox"/> Otro Color: <i>Negro</i>	Temperatura <u>24</u> °C Conductancia específica: _____ Oxígeno disuelto _____ PH _____ Turbidez _____ Turbiometro Diámetro: <u>5</u> cm Longitud: <u>100</u> cm Profundidad visible <u>2</u> cm
SEDIMENTO / SUSTRATO	Olor <input type="checkbox"/> Normal <input checked="" type="checkbox"/> Aguas residuales <input type="checkbox"/> Petróleo <input type="checkbox"/> Químicos <input checked="" type="checkbox"/> Anaerobio <input type="checkbox"/> Ninguno <input type="checkbox"/> Otro _____ Depósitos <input type="checkbox"/> Ninguno <input checked="" type="checkbox"/> Residuos orgánicos <input type="checkbox"/> Desechos <input checked="" type="checkbox"/> Grasas <input type="checkbox"/> Otro _____	Rocas <input type="checkbox"/> Grandes <input checked="" type="checkbox"/> Medianas <input type="checkbox"/> Pequeñas <input type="checkbox"/> Cantos redondos <input checked="" type="checkbox"/> Cantos angulares <input checked="" type="checkbox"/> Lisa <input type="checkbox"/> Áspera <input type="checkbox"/> Porosa <input type="checkbox"/> Otro _____ ¿Las partes inferiores de las piedras no incrustadas son de color negro? <input type="checkbox"/> Si <input checked="" type="checkbox"/> No

Anexo 5: Valores del índice RQI y calidad de las riberas según la condición ecológica de los atributos analizados, incluyendo las alternativas de gestión recomendadas para cada caso.

INDICE RQI PARA LA VALORACIÓN DE LAS RIBERAS FLUVIALES EN EL CONTEXTO DE LA DIRECTIVA MARCO DEL AGUA

Valor del RQI	Estado de la ribera	Condición ecológica	Estrategias de gestión
120-100	Muy bueno	Los atributos de las riberas no presentan amenazas en su funcionamiento, encontrándose en un estado de elevada naturalidad (máximo 3 atributos con una puntuación inferior al óptimo, correspondiente al estado "bueno")	Gran interés de conservación para mantener el estado actual y prevenir la alteración de las funciones riparias
99-80	Bueno	Al menos dos o tres atributos de las riberas están amenazados en su funcionamiento (máximo 3 atributos con una puntuación inferior, correspondiente al estado "regular")	Interés de protección para prevenir la alteración y mejorar la integridad de las funciones riparias
79-60	Regular	Al menos dos o tres atributos de las riberas están degradados en su funcionamiento y el resto tiene amenazas de degradación (máximo 3 atributos con una puntuación inferior, correspondiente al estado "malo")	Necesidad de restauración para asegurar la funcionalidad hidrológica y ecológica de las riberas
59-40	Pobre	Más de tres atributos de las riberas están seriamente alterados en su funcionamiento y el resto también se encuentra degradado	Necesidad de rehabilitación y restauración para recuperar la funcionalidad hidrológica y ecológica de las riberas
39-10	Muy pobre	Más de tres atributos de las riberas están muy degradados en su funcionamiento y el resto está también degradado	Necesidad de rehabilitación y restauración para reintroducir la funcionalidad hidrológica y ecológica de las riberas o mejorar su situación actual respecto a su estado de máximo potencial.

1. Continuidad longitudinal de la vegetación riparia natural (estrato arbóreo y arbustivo)											
Estado Óptimo (*)			Estado Bueno			Estado Regular			Estado Malo		
Más del 75 % de la longitud del espacio ripario contiene vegetación arbórea o arbustiva asociada al río, formando un corredor denso			La vegetación arbórea y arbustiva asociada al río aparece distribuida en bosquetes que cubren entre el 50 y el 75 % de la longitud del espacio ripario, o cubre más del 75 % de la longitud del espacio ripario, formando un corredor aclarado			La vegetación arbórea y arbustiva asociada al río está reducida a pequeños bosquetes que suponen un recubrimiento entre el 25 y el 50 % de la longitud del río			La vegetación arbórea y arbustiva se refiere a pies aislados o pequeñas agrupaciones de 1 a 3 individuos, en una ribera muy aclarada con menos del 25 % de cobertura de vegetación leñosa; o no existe, permaneciendo solo las comunidades de herbáceas		
Realizar la ponderación de cada margen por separado.											
En cada estado, elegir una ponderación más alta cuando los espacios con vegetación continua sean de mayor longitud, y menor cuando la orla de vegetación esté más fragmentada.											
(*) Considerar Estado Óptimo los casos en que no exista cobertura de vegetación arbórea o arbustiva asociada al río y la ribera esté cubierta por asociaciones no leñosas que se consideren en estado natural o muy poco intervenidas.											

2. Dimensiones en anchura del espacio ripario con vegetación natural asociada al río (vegetación leñosa y helófitos)												
Estado	Óptimo			Bueno			Regular			Malo		
Valle I:	> 5 m, o una hilera con vegetación densa (cobertura superior al 75 %) asociada al río(*)			Al menos una hilera con vegetación abierta (cobertura entre el 75 y el 50 %), asociada al río			Al menos una hilera con vegetación dispersa (cobertura inferior al 50 %) asociada al río			Sin hilera de vegetación asociada al río		
Valle II (**)	>15 m con vegetación asociada al río y cobertura superior al 50 %; o una dimensión inferior y vegetación asociada al río conectando con formaciones de vegetación climatofila poco intervenidas			5-15 m con vegetación asociada al río con una cobertura superior al 50 %, o >10 m con vegetación asociada al río con una cobertura inferior al 50 %			5-15 m con vegetación asociada al río con una cobertura inferior al 50 %			< 5 m con vegetación asociada al río		
Valle III, IV	> 50 m, o una dimensión igual o mayor que 2 veces la anchura del cauce activo en ríos pequeños (anchura inferior a 10 m), con vegetación asociada al río densa (cobertura > 50 %) (***)			25-50 m, o una dimensión entre 1 y 2 veces la anchura del cauce activo en ríos pequeños (anchura inferior a 10 m), con vegetación asociada al río; o la opción anterior de mayores dimensiones, con vegetación aclarada (cobertura inferior al 50 %)			10-25 m, o una dimensión entre 1 y 0,5 veces la anchura del cauce activo en ríos más pequeños (anchura inferior a 10 m), con vegetación asociada al río			< 10 m en ríos grandes, o < 5 m en ríos pequeños (anchura inferior a 10 m), con vegetación asociada al río		
	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
<p>Realizar la ponderación de cada margen por separado. Dentro de cada estado, elegir los valores más altos cuanto mayor sea el grado de cobertura vegetal existente. (*) Considerar Estado Óptimo los casos en que no exista cobertura de vegetación arbórea o arbustiva asociada al río y la ribera esté cubierta por la vegetación climatofila de las riberas en estado natural o muy poco intervenida. (**) Considerar en este apartado los valles en U de origen glaciar (Tipo I-B) y los tramos de hoces y gargantas (Tipo I-C). En ríos trezados o temporales con cauces múltiples, conteniendo islas con vegetación, estimar las dimensiones del espacio ripario contabilizando sólo el espacio sin agua entre los diferentes cauces, o asignar a cada margen la mitad de la dimensión total del sistema fluvial. (***) En ríos muy grandes, considerar el estado óptimo cuando la anchura del espacio con vegetación asociada al río sea igual o superior a la anchura del cauce.</p>												

3. Composición y estructura de la vegetación riparia												
	Estado Óptimo			Estado Bueno			Estado Regular			Estado Malo		
	En la orilla											
	Bosques de galería cerrados o sotos arbustivos muy densos > 2,5 m de altura, sin especies alóctonas, con sotobosque formado por varias especies de arbustos o dominado por herbáceas nemorales, con escasas zarzas (< 30%). O vegetación climatofila en estado natural o muy poco intervenida.			Bosques de galería o sotos arbustivos ± densos y > 2'5 m de altura, con abundancia de zarzas (> 30%), presencia moderada de especies alóctonas (pocos individuos aislados), y/o dominancia de herbáceas nitrófilas o con estratos subarbóreos pobres (estrato herbáceo en pequeñas manchas, con arbustos ocasionales). O vegetación climatofila levemente modificada por actuaciones antrópicas.			Formaciones arbóreas o arbustivas abiertas o < 2'5 m, con abundancia de zarzas (> 30%) y/o de especies introducidas (numerosos individuos de una o varias especies) y/o dominancia de herbáceas nitrófilas. O vegetación climatofila bastante modificada por actuaciones antrópicas.			Vegetación herbácea dominante o zarzales, o lo sumo con algunas árboles y/o arbustos dispersos. Alineaciones de chopos plantados o de árboles introducidos, cañaverales alóctonos.		
Valle I	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Valles II, III y IV*	8	7		6	5		4	3		2		1

3 (Continuación). Composición y estructura de la vegetación riparia				
	Estado Óptimo	Estado Bueno	Estado Regular	Estado Malo
	Tras la orilla			
Valles II, III, IV(*)	Bosque natural denso que orla más del 75% de la longitud de la galería	Bosque ± denso o matorrales altos, que orlan más del 30% de la longitud de la galería	Árboles o arbustos frecuentes pero dispersos o en pequeños grupos	Vegetación herbácea dominante o con algunos árboles o arbustos dispersos o en pequeños grupos
	4	3	2	1
<p>Realizar la ponderación de cada margen por separado. La valoración se iniciará de acuerdo con la vegetación "en la orilla" y se completará en función de la vegetación que se encuentra "tras la orilla". Se considerará vegetación "de orilla" la situada en la zona más próxima a los límites del cauce activo, que depende directamente de la humedad conferida por los caudales circulantes, ocupando generalmente una franja entre 5 y 15 m de anchura, según el tipo de valle. Se considerará vegetación "tras la orilla" la situada por detrás de esta banda descrita, situada en la llanura de inundación y potencialmente en contacto con la vegetación climatófila de las laderas adyacentes.</p> <p>Las plantaciones de <i>Populus nigra</i> (u otros cultivos arbóreos o arbustivos) no se considerarán en la valoración, aunque si en su interior crece un sotobosque de plantas leñosas, se tendrá en cuenta el recubrimiento de los arbustos y arbolillos que integren (al margen del dosel arbóreo).</p> <p>En el caso de rambles de zonas mediterráneas cálidas, el estado de máximo desarrollo en cualquier tipo de valle corresponde a arbustadas (tarayales, adelfares y tamujares) muy densas que sobrepasan los 2,5 m de altura (2 m en el caso de tamujares), que quedan limitadas al cauce y las orillas; estas formaciones no suelen albergar especies nemorales en proporción apreciable. La valoración se hará entonces sólo en función de la densidad, extensión y altura de la formación.</p> <p>En los ríos que presentan una dinámica muy activa, el máximo desarrollo en las orillas e islas del cauce puede corresponder a saucedas arbustivas jóvenes (< 2,5 m de altura), de densidad variable (a veces muy abiertas) y con especies herbáceas y caméfitas propias de conchales riparios, por lo que en estos casos se debe considerar que estas formaciones arbustivas constituyen el máximo desarrollo natural.</p> <p>(*) En algunos ríos discurriendo en valles del tipo IV, la vegetación de orilla óptima puede corresponder a formaciones dominantes de macrofitas emergentes (carrizas, espadañas, juncos, etc.), características de tramos con escaso drenaje superficial que dan lugar a "tablas" o lagunas someras fluviales (ej. en ríos manchegos).</p> <p>En el contexto de la Directiva Marco del Agua, sólo se considerarán los estados óptimo o bueno cuando las formaciones vegetales existentes correspondan a las naturales o consideradas de referencia en cada zona, según el tipo de río y región biogeográfica. En el caso de que la vegetación existente no corresponda con la de referencia, se elegirá la puntuación según la mayor o menor desviación respecto a la composición florística natural correspondiente. Las condiciones de referencia están aún por definir en este aspecto, y en la actualidad son pocas las obras de consulta adecuadas para amplios territorios. Se recomienda, para la mitad norte de España, la utilización del trabajo de Lara et al. (2004) o similares y, para el resto, estudios científicos regionales que analicen la potencialidad y afinidades ecológicas de los distintos tipos de vegetación riparia del territorio.</p>				

3.1. Relación de las plantas nemorales, alóctonas y nitrófilas más frecuentes en los ríos españoles.	
Nemorales	<p>Herbáceas: helechos (excepto <i>Pteridium aquilinum</i>)</p> <p><i>Aconitum</i> spp., <i>Ajuga reptans</i>, <i>Allium ursinum</i>, <i>Anemone nemorosa</i>, <i>Aristolochia paucineris</i>, <i>Brachypodium sylvaticum</i>, <i>Cardamine heptaphylla</i>, <i>Carex pendula</i>, <i>C. sylvatica</i>, <i>Circaea lutetiana</i>, <i>Convolvularia majalis</i>, <i>Epipactis</i> spp., <i>Euphorbia amygdaloides</i>, <i>Fragaria vesca</i>, <i>Galium rotundifolium</i>, <i>Geranium robertianum</i>, <i>G. sanguineum</i>, <i>G. sylvaticum</i>, <i>Geum urbanum</i>, <i>Hepatica nobilis</i>, <i>Holcus mollis</i>, <i>Hypericum androsaemum</i>, <i>Lamium galabardolan</i>, <i>L. maculatum</i>, <i>L. purpureum</i>, <i>Lapsana communis</i>, <i>Lathraea</i> spp., <i>Lilium martagon</i>, <i>Linaria triamphiflora</i>, <i>Listera ovata</i>, <i>Luzula</i> spp., <i>Lysimachia nemorum</i>, <i>Melica uniflora</i>, <i>Monotropa hypopitys</i>, <i>Myosotis nemorosa</i>, <i>Myrrhis odorata</i>, <i>Myrtilloides nodosa</i>, <i>Neottia nidus-avis</i>, <i>Oxalis acetosella</i>, <i>Paris quadrifolia</i>, <i>P. nemoralis</i>, <i>Polygonatum</i> spp., <i>Primula vulgaris</i>, <i>Prunella grandiflora</i>, <i>P. vulgaris</i>, <i>Pulmonaria affinis</i>, <i>P. longifolia</i>, <i>Pyrola minor</i>, <i>Sanicula europaea</i>, <i>Saxifraga lepisimigena</i>, <i>Scilla lilio-hyacinthus</i>, <i>Scutellaria minor</i>, <i>Sibthorpia europaea</i>, <i>Spiranthes aestivalis</i>, <i>Stachys sylvatica</i>, <i>Teucrium scorodonia</i>, <i>Viola</i> spp., <i>Wahlenbergia hederacea</i>.</p>
Alóctonas	<p>Árboles: <i>Acacia</i> spp., <i>Acer negundo</i>, <i>Ailanthus altissima</i>, <i>Cydonia oblonga</i>, <i>Eucalyptus</i> spp., <i>Gleditsia triacanthos</i>, <i>Ligustrum japonicum</i>, <i>Malus domestica</i>, <i>Morus</i> spp., <i>Platanus hispanica</i>, <i>P. orientalis</i>, <i>Populus nigra</i> cvar., <i>P. x canadensis</i>, <i>Robinia pseudoacacia</i>, <i>Salix babylonica</i>, <i>Sophora japonica</i>, <i>Ulmus pumila</i>.</p> <p>Arbustos y lianas: <i>Araujia sericifera</i>, <i>Buddleja davidii</i>, <i>Cynanchum acutum</i>, <i>Fallopia dumetorum</i>, <i>F. baldschuanica</i>, <i>Ligustrum ovalifolium</i>, <i>Lonicera japonica</i>, <i>Lycium barbarum</i>, <i>Parthenocissus quinquefolia</i>, <i>Salix viminalis</i>, <i>Tamarix parviflora</i>.</p> <p>Herbáceas: <i>Amaranthus</i> spp., <i>Arundo donax</i>, <i>Asparagus officinalis</i>, <i>Coryza</i> spp., <i>Cortaderia selloana</i>, <i>Cyperus eragrostis</i>, <i>Datura</i> spp., <i>Digitaria sanguinalis</i>, <i>Impatiens balfourii</i>, <i>Lunaria annua</i>, <i>Lycopersicon esculentum</i>, <i>Mimulus</i> spp., <i>Oenothera biennis</i>, <i>Oxalis corniculata</i>, <i>O. pes-caprae</i>, <i>Paspalum</i> spp., <i>Phyla canescens</i>, <i>Phytolacca americana</i>, <i>Reynoutria japonica</i>, <i>Selaginella kraussiana</i>, <i>Setaria</i> spp., <i>Sporobolus indicus</i>, <i>Tradescantia fluminensis</i>, <i>Tritonia x crocosmiflora</i>, <i>Xanthium</i> spp.</p>
Nitrófilas	<p>Herbáceas: <i>Arctium</i> spp., <i>Artemisia</i> spp., <i>Avena barbata</i>, <i>A. sterilis</i>, <i>Bidens tripartita</i>, <i>Cardus</i> spp., <i>Carlina</i> spp., <i>Chelidonium majus</i>, <i>Chenopodium</i> spp., <i>Cichorium intybus</i>, <i>Cirsium</i> spp., <i>Conium maculatum</i>, <i>Convolvulus arvensis</i>, <i>Cynodon dactylon</i>, <i>Daucus carota</i>, <i>Dipsacus fullonum</i>, <i>Ditrichia</i> spp., <i>Ecballium elaterium</i>, <i>Echium plantagineum</i>, <i>Erucastrum nasturtifolium</i>, <i>Eryngium compestre</i>, <i>Foeniculum vulgare</i>, <i>Hordeum</i> spp., <i>Lactuca scariola</i>, <i>Malva</i> spp., <i>Marrubium vulgare</i>, <i>Ononis spinosa</i>, <i>Onopordum</i> spp., <i>Papaver</i> spp., <i>Parietaria judaica</i>, <i>Picris</i> spp., <i>Polygonum</i> spp., <i>Rubia frictorum</i>, <i>Rumex</i> spp., <i>Salvia verbenaca</i>, <i>Scolymus</i> spp., <i>Senecio jacobaea</i>, <i>Silene vulgaris</i>, <i>Silybum marianum</i>, <i>Sisymbrium</i> spp., <i>Torilis arvensis</i>, <i>Verbascum</i> spp.</p>

4. Regeneración natural de la vegetación riparia (estrato arbóreo y arbustivo)											
Estado Óptimo			Estado Bueno			Estado Regular			Estado Malo		
Existen ejemplares de jóvenes, adultos y maduros de las principales especies arbóreas y arbustivas, y los espacios abiertos, bancos de gravas y arenas de las orillas están colonizados por plántulas de edades inferiores a 2 años.*			Existen ejemplares de diferentes edades (jóvenes, adultos y maduros) de las principales especies leñosas, y en los espacios abiertos se observan ejemplares más jóvenes, al menos de los arbustos. Regeneración natural levemente amenazada por el pastoreo, actividades agrícolas o forestales, regulación de caudales o incisión ligera del canal fluvial.			Se observan basquetes de pies adultos y maduros, con escasa representación de los más jóvenes y ausencia de renuevos. Regeneración natural moderadamente afectada por el pastoreo, prácticas agrícolas o forestales, incendios periódicos, actividades recreativas, etc., o por regulación de caudales o incisión moderada del canal fluvial.			Solo se observan pies maduros o adultos, con muy escasa o nula presencia de los elementos jóvenes. Regeneración natural severamente afectada por el pastoreo, prácticas agrícolas o forestales, quemas periódicos, compactación del suelo, o por incisión severa, o por obras de canalización. Abundancia de pies arbóreos secos.		
12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
<p>Ponderar más en función de la abundancia de los pies más jóvenes</p> <p>Valorar la regeneración natural en función de la disponibilidad de espacios abiertos para llevarse a cabo y la intensidad de la regeneración en los mismos. Cuando no exista vegetación leñosa, estimar la dificultad de regeneración en relación a la intensidad de la causa que la impide, puesta de manifiesto en el grado de alteración de la morfología, substrato o nivel de humedad de los suelos.</p> <p>* Incluir en esta opción las formaciones naturales densas y cerradas en las que puede no observarse indicios de regeneración natural por falta de espacios abiertos para ella, siempre que no existan restricciones a dicha regeneración por causas antrópicas (ej. pérdida de dinámica fluvial por regulación de caudales).</p>											

5. Condición de las orillas											
Estado Óptimo			Estado Bueno			Estado Regular			Estado Malo		
Más del 50 % del contorno de la lámina de agua en "bankfull" está en contacto con vegetación leñosa, macrofitas o elementos rocosos, y más del 50 % del suelo sin esta vegetación tiene cobertura herbácea, y las orillas no presentan síntomas de inestabilidad inducida por actividades humanas. Línea de orillas irregular y sinuosa, sin síntomas de alteración en ambas márgenes.			Más del 50 % del contorno de la lámina de agua en "bankfull" está en contacto con vegetación leñosa, macrofitas o elementos rocosos, y menos del 50 del suelo sin esta vegetación tiene cobertura herbácea alternando con suelo desnudo, o las orillas presentan síntomas de inestabilidad leve inducida por actividades humanas. Línea de orillas irregular y sinuosa, sin alteraciones al menos en una de las márgenes.			Menos del 50 % del contorno de la lámina de agua en "bankfull" está en contacto con vegetación leñosa, macrofitas o elementos rocosos y más del 50 % del suelo restante tiene vegetación herbácea, alternando con suelo desnudo, o las orillas presentan síntomas de inestabilidad leve a moderada, causada por actividades humanas. Orillas rectificadas, muy poco sinuosas, consecuencia de obras de canalización sin estructuras rígidas (dragados, escolleras de poca altura, revestimientos vegetales, etc.)			Menos del 50 % del contorno de la lámina de agua en "bankfull" está en contacto con vegetación leñosa, macrofitas o elementos rocosos y menos del 50 % del suelo restante tiene vegetación herbácea, o las orillas presentan síntomas de erosión moderada a severa originada por actividades humanas. Orillas rectificadas, más o menos rectas, consecuencia de obras de canalización con estructuras rígidas.		
12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
<p>Considerar nivel de "bankfull" el que alcanzan las avenidas ordinarias, a partir del cual generalmente se observa un cambio de pendiente en el talud de las orillas y se observa el desarrollo de una vegetación riparia leñosa, asentada sobre suelos no permanentemente saturados.</p> <p>Ponderar el nivel de erosión de origen antrópico en función de la frecuencia e intensidad de los síntomas de inestabilidad de las orillas (acumulación de sedimentos en la base de las orillas, presencia de grietas, desmoronamientos, descalzamiento de raíces, etc.), y del porcentaje de suelo desnudo en contacto con la lámina de agua, sin ningún tipo de cobertura vegetal. Considerar estado natural cuando estos síntomas correspondan a la dinámica natural del cauce.</p>											



FOTOGRAFÍA 7. Orillas en condiciones naturales, con diversidad de condiciones hidráulicas y heterogeneidad del hábitat (Río Veral, Huesca).



FOTOGRAFÍA 8. Orillas rectificadas, con gran homogeneidad de las condiciones hidráulicas y pérdida de diversidad de hábitats (Río Cigueta, Ciudad Real).

6. Conectividad lateral de la ribera con el cauce											
Estado Óptimo			Estado Bueno			Estado Regular			Estado Malo		
Orillas de muy baja altura respecto al nivel del lecho del cauce. Las riberas se inundan con una periodicidad elevada (avenidas ordinarias que desbordan al menos una vez cada 2-5 años) sobre un perfil de orilla llano o en condiciones naturales. No existe ninguna restricción al desbordamiento de las aguas.			Orillas algo sobreelevadas respecto al nivel del lecho. Las riberas se inundan con una periodicidad menor, entre 5 y 10 años, existiendo una cierta restricción al desbordamiento debida a la regulación de los caudales, a pequeñas elevaciones artificiales de la cota de las orillas sin presencia de motas, o a una incisión del cauce incipiente.			Orillas bastante sobreelevadas respecto a nivel del lecho. Las riberas se inundan con muy poca frecuencia, por avenidas con periodos de retorno entre 10 y 30 años, existiendo restricciones al desbordamiento por regulación de los caudales, dragados y/o motas, o por una incisión del cauce moderada.			Orillas muy sobreelevadas respecto al lecho del río. Las riberas solo se inundan por avenidas extraordinarias con un periodo de retorno superior a 30 años, y existen fuertes restricciones al desbordamiento por infraestructuras de canalización intensa o por incisión del cauce severa.		
12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
<p>Este atributo debe evaluarse atendiendo a la evidencia de los desbordamientos, y/o la presencia de barreras físicas o procesos que disminuyen su frecuencia.</p> <p>Estimar la frecuencia de inundación por las características de los sedimentos y de la vegetación más próxima a la línea de orilla correspondiente al cauce activo o de avenidas ordinarias. Ponderar en función de la altura de las orillas sobre el lecho del cauce, relacionada con la facilidad para el desbordamiento, y de la proximidad respecto a las orillas del cauce de las motas o infraestructuras de canalización, que supongan barreras físicas al desbordamiento.</p>											

7. Permeabilidad y grado de alteración del relieve y suelo ripario											
Estado Óptimo			Estado Bueno			Estado Regular			Estado Malo		
El suelo de las riberas no presenta síntomas de compactación ni sellado (impermeabilización), y se mantienen unas buenas condiciones de infiltración y permeabilidad en su perfil. Ausencia de excavaciones y rellenos. Relieve de las riberas en estado natural.			En las riberas se observan pequeños senderos o espacios compactados por estancia o paso de ganado, vehículos, actividades recreativas, etc. poco intensos, sin actuaciones de sellado, y no existen síntomas de erosión superficial o encharcamientos. Suelos de las riberas labreadas para cultivos agrícolas o forestales. Excavaciones y rellenos ausentes o muy poco intensos. El relieve de las riberas presenta un grado de alteración ligero.			Las riberas presentan caminos o espacios continuos muy compactados o sellados que ocupan más del 20 % de su superficie, que dificultan la infiltración y regeneración de la vegetación natural. O bien, el perfil del suelo ha sido alterado moderadamente en su composición granulométrica o se han introducido materiales alóctonos (escombros, residuos sólidos, etc.). O el relieve de las riberas presenta un grado de alteración moderado por extracciones o acopio de áridos, o por depósito de tierras procedentes de la llanura de inundación (motas de gravas).			Los suelos de las riberas están compactados o sellados en más del 20 % de su superficie, comprometiendo severamente la infiltración de las aguas. O el perfil del suelo ha sido alterado severamente en su composición granulométrica, o son abundantes los materiales alóctonos o el depósito de tierras ajenas a la llanura de inundación. O bien las extracciones de áridos o los movimientos de tierras han modificado severamente el relieve natural de la ribera.		
12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
<p>Ponderar más en función de la abundancia de los pies más jóvenes</p> <p>En este apartado se valora conjuntamente la calidad de los materiales de los suelos riparios en relación al mantenimiento de su capacidad de infiltración y permeabilidad, y el grado de alteración del relieve.</p> <p>Seleccionar el estado que corresponda a cada tramo según la presencia de una o varias de las posibilidades descritas, y ponderar en cada caso en función de la extensión e intensidad de los impactos existentes en una o en ambas márgenes del cauce.</p> <p>Elegir valores más bajos cuanto mayor sea la altura de los acopios o excavaciones, o se interrumpa en mayor medida el drenaje transversal del valle hacia el centro del cauce, y el vertical como drenaje en profundidad.</p>											

Anexo 6. Resultados de laboratorio sobre diferentes parámetros.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
LABORATORIO DE CALIDAD DE AGUA Y SUELOS

INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYOS



NO. DE REGISTRO:	FQA-021-0524
FECHA DE EMISIÓN INFORME:	23-05-2024
CLAVE DE LA MUESTRA:	MANANTIAL



CLIENTE:	TOLIMAN
DIRECCIÓN:	QUERÉTARO, QUERÉTARO
TELÉFONO:	4426313360
ATENCIÓN A:	JUAN CARLOS GAMBOA ZOTO

LUGAR MUESTREO:	BOMINTZÁ	TIPO DE MUESTREO:	SIMPLE	FECHA RECEPCIÓN:	21-04-2024
RESPONSABLE MUESTREO:	CLIENTE	BITÁCORA:	RG-62	DESCRIPCIÓN MUESTRA:	AGUA MANANTIAL

PARÁMETRO	RESULTADO	*LC	UNIDADES	FECHA ANÁLISIS	MÉTODO DE ANÁLISIS
CLORURO	3.30	5.55	mg/L	ABRIL-2024	EPA METHOD 300.1
NITRITO	<	1.20	mg/L	ABRIL-2024	EPA METHOD 300.1
NITRATO	<	0.48	mg/L	ABRIL-2024	EPA METHOD 300.1
FLORURO	0.65	1.05	mg/L	ABRIL-2024	EPA METHOD 300.1
SULFATO	2.59	6.23	mg/L	ABRIL-2024	EPA METHOD 300.1

*LC: Limite de Cuantificación del instrumento



OBSERVACIONES:	Temperatura de recepción de la muestra: 4 °C
	Los resultados aplican a la muestra cómo se recibió
	La muestra fue preservada a su llegada en el laboratorio



ATENTAMENTE

ING. CARLOS IVÁN AGUILAR
QUIMICO ANALISTA

M.C. ALBA AURORA DÍAZ PEREIRA
JEFE DEL LABORATORIO

EL PRESENTE INFORME SOLO ES VÁLIDO EN SU FORMA ORIGINAL CON LAS FIRMAS AUTORIZADAS Y LOS RESULTADOS SE RELACIONAN ÚNICAMENTE CON LA MUESTRA QUE SE INDICA EN EL INFORME Y NO CON EL LOTE DE MUESTRAS. SE PROHIBE LA REPRODUCCIÓN PARCIAL DEL INFORME EXCEPTO EN SU TOTALIDAD

Universidad Autónoma de Querétaro
Centro Académico Multidisciplinario
Car. a Chichimequillas S/N Col. Tenenoc Ejidales Bolaños
C.P. 76140 Querétaro, Qro.
Tel. (442) 192 12 00 Ext. 85435



INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYOS

NO. DE REGISTRO:	FQA-012-0424
FECHA DE EMISION INFORME:	23-05-2024

CLIENTE:	Tolimán
DIRECCIÓN:	Querétaro
TELEFONO:	4426313360
ATENCION A:	Juan Carlos Gamboa Soto

LUGAR MUESTREO:	BOMINTZÁ	TIPO DE MUESTREO:	SIMPLE	FECHA RECEPCION:	21-abril-24
RESPONSABLE MUESTREO:	CLIENTE	BITACORA	1	DESCRIPCION. MUESTRA	AGUA

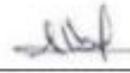
Nombre de la muestra	DQO (mg/l)	NT (mg/l)	COT (mg/l)
Arroyo	10	1.1	55.3
Descarga	237	11.4	196.1
Domiciliar	>1500	86.9	1666.1
Método de análisis	NMX-AA-030-SCFI-2001	SSM-5000A(Manual del fabricante)	SSM-5000A(Manual del fabricante)
Fecha de análisis	Abril-2024	Abril-2024	Abril-2024

OBSERVACIONES	Temperatura de recepción de muestra: 4°C Los resultados aplican a la muestra cómo se recibió. Las muestras fueron preservadas a su llegada al laboratorio.
---------------	--

ATENTAMENTE



ING. CARLOS IVÁN AGUILAR
QUÍMICO ANALISTA



M.C. ALBA AURORA DÍAZ PEREIRA
JEFE DEL LABORATORIO



EL PRESENTE INFORME SOLO ES VÁLIDO EN SU FORMA ORIGINAL CON LAS FIRMAS AUTORIZADAS Y LOS RESULTADOS SE RELACIONAN ÚNICAMENTE CON LA MUESTRA QUE SE INDICA EN EL INFORME Y NO CON EL LOTE DE MUESTRAS. SE PROHIBE LA REPRODUCCIÓN PARCIAL DEL INFORME EXCEPTO EN SU TOTALIDAD

Anexo 7. Resultados de laboratorio sobre Coliformes totales



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA CLÍNICA Y DIAGNÓSTICO MOLECULAR



Santiago de Querétaro, Qro, 21 de mayo del 2024

CLIENTE: Universidad Autónoma de Querétaro/
Juan Carlos Gamboa Soto

DIRECCIÓN: Facultad de Ciencias Naturales,
Maestría en Cuencas

RECEPCIÓN DE MUESTRAS: 15/05/2024

RESPONSABLE DE TOMA DE MUESTRAS: Cliente

TIPO DE ANÁLISIS: Microbiológico

INFORME DE RESULTADOS

No. muestra	Descripción de muestra	Coliformes totales (NMP/100mL)
1	Agua residual de regadera	46,000
Límites máximos permisibles:		No aplica*

Metodología empleada:
NOM-112-SSA1-1994. Bienes y servicios. Determinación de bacterias coliformes. Técnica del número más probable.
Límites máximos permisibles de acuerdo a:
Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.
* Escherichia coli: 250, 500, 800 NMP/100 mL promedio mensual, promedio diario, valor instantáneo respectivamente para ríos, arroyos, canales, drenes, suelo (riego, etc.).

Atentamente
Somos profesionales, Somos Facultad de Química


Responsable

M. en C. Erika Beatriz Álvarez Hidalgo
Cédula Profesional No. 13339870



UAQ CRECER EN LA DIVERSIDAD

Clinica Santa Bárbara
Eriflo Parias Gil s/n, M40 117;
Santa Bárbara, Corregidora, Qro.
Tel. 442 225 0171 y 442 225 2027

Centro Universitario
Cerro de las Campanas s/n,
Edificio 9, Santiago de Querétaro, Qro.
Tel. 442 192 1200 EXL 5517

Clinica Santa Rosa Jáuregui
20 de noviembre s/n, Carr. Pie de Colla,
Santa Rosa Jáuregui, Qro.
Tel. 442 291 1163

Anexo 8. Servicios habilitados en la microcuenca

No.	Localidad	Viviendas	Hab /vivienda	Sanitario	Letrina	Tinaco	Cisterna	Lavadora
1	Bermejo	5	3.5	4	0	4	3	0
2	Bomintzá	173	4.09	43	58	100	14	15
3	Casa Blanca	216	4.95	105	33	119	17	29
4	Ciprés	30	3.85	20	2	18	0	4
5	El Aguacate	3	*	*	*	*	*	*
6	El Cerrito Parado	167	4.59	62	21	68	20	9
7	El Madroño	21	4	2	8	7	0	0
8	El Puertecito	3	2.33	1	1	1	1	1
9	El Saucito	47	4.37	17	7	30	0	0
10	El Sauz	2	*	*	*	*	*	*
11	El Shaminal	32	4.26	19	5	18	3	1
12	El Tule	139	4.11	66	17	72	14	12
13	El Zapote	73	3.16	19	4	29	0	5
14	Familia Montes	5	3.67	3	0	3	0	2
15	García	3	*	*	*	*	*	*
16	La Cuchara	6	2.5	2	0	2	1	1
17	La Peñita	10	5.3	2	4	9	0	1
18	La Presita	35	5	3	2	10	4	1
19	La Víbora	5	4.75	4	0	1	1	0
20	Lomas de Casa Blanca	54	4.41	20	9	35	3	5
21	Los González	156	4.46	94	28	110	19	15
22	Maguey Manso	103	4.03	28	39	70	5	3
23	Mesa de Chagoya	59	4.47	21	10	38	1	2
24	Mesa de Ramírez	212	4.1	21	103	141	14	8
25	Ojo de Agua	2	*	*	*	*	*	*
26	Puerto Blanco	86	4.62	30	19	61	6	4
27	Sabino de San Ambrosio	181	3.97	43	59	89	14	10
TOTAL		1828	4.11	629	429	1035	140	128

Fuente: INEGI, 2020.

Anexo 9. Consumo de agua y producción de aguas grises por vivienda.

Vivienda	Habitantes (Personas/vivienda)	Consumo prom. de agua (Lt/mes)	Prom. Consumo aguas grises (Lt/mes)
1	5	14,000	10,000
2	4	9,000	6,000
3	3	7,000	5,000
4	5	16,000	13,000
5	4	9,000	7,000
6	5	8,000	6,000
7	6	13,000	9,000
8	4	8,000	5,000
9	5	10,000	7,000
10	4	12,000	10,000
Promedio	4	10,600	7,800

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 10. Procedimiento de cálculo por el método (P-K-C*)

MÉTODO PKC*		
1. Seleccionar valor de tasa K	k_A = Tasa cinética (m/año)	30
2. Parámetros de entrada, área mínima requerida	Número de habitantes	5
	Caudal entrada (L/Per-eq/día)	120
	C_i = Concentración afluente DBO5/per-eq (mg/L)	139
	C_o = Concentración efluente DBO5/per-eq (mg/L)	50
	C_o = Objetivo de concentración efluente DBO5/per-eq (mg/L)	30
	Eficiencia Eliminación pretratamiento (%)	0.67
	Carga másica afluente (gDBO/d)	250
	Carga másica afluente (2/3)	83
	C^* =Concentración de fondo (mg/L)	7
	P = cantidad aparente de tanques en serie (TIS), adimensional	1
	Q_i = Caudal de entrada (m ³ /día)	0.6
	Q_i = Caudal de entrada (m ³ /año)	219
	K_A =Coeficiente superficial de primer orden modificado (m/año)	25
	A=Área del humedal (m ²)	6
	3. Seleccionar dimensiones del humedal (l*W=3)	Número de módulos
Área de cada unidad (m ²)		3
Relación Largo - ancho		3
Ancho (m)		0.98
Largo (m)		2.9
Área de cada unidad (m ²)		3.0
Área total (m ²)		6.0
Área por habitante (m ² /hab-eq)		1.2
Relación Largo - ancho		2.75
Profundidad saturada de agua (m)		0.5
Volumen saturado (m ³)		1.5
Volumen saturado total de módulos (m ³)		1.5
Profundidad no saturada de agua (m)		0.4

	Volumen total del humedal (m ³)	2.7
	Volumen total de módulos (m ³)	5.4
	Borde libre (m)	0.1
	Altura total de excavación (m)	1
4. Verificación de carga orgánica sección transversal	Porosidad del medio	0.35
	Tiempo de retención hidráulica (día)	0.88
	Tasa carga hidráulica superficial (mm/d)	100
	Tasa carga orgánica superficial (gDBO ₅ /m ² -d)	13.89
	Carga máxima (gDBO ₅ /m ² -d)	250
5. Verificación de la tasa de carga orgánica de la sección transversal	Sección transversal por unidad (m ²)	0.5
	Carga DBO ₅ afluyente por unidad (g/d)	41.7
	Carga orgánica transversal (gDBO/m ² -d)	83.3
	Colmatación a mediano plazo (Carga transversal vs carga máxima)	Válido
6. Especifique otras dimensiones y detalles en las unidades de humedales	Zona de amortiguación (m)	0.4
	Volumen zona de entrada (m ³)	0.4
	Volumen zona de salida (m ³)	0.4