

# ¿Cómo

construir un humedal  
para el tratamiento  
del agua residual

# en mi escuela?



577.68  
R62

Rivas Hernández, Armando

*¿Cómo construir un humedal para el tratamiento del agua residual en mi escuela? /*

Armando Rivas Hernández. - Jiutepec, Mor. : Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, ©2023.  
61 p.

ISBN 978- (obra impresa)

ISBN 978- (obra digital)

1. Humedales 2. Tratamiento de aguas residuales 3. Construcción 4. Operación y mantenimiento

## **¿CÓMO CONSTRUIR UN HUMEDAL PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL EN MI ESCUELA?**

Armando Rivas Hernández

D.R. © 2022 Instituto Mexicano de Tecnología del Agua  
Blvd. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso,  
62550 Jiutepec, Mor., México  
Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

Coordinador Editorial: Adrián Pedrozo Acuña  
Editor: Roberta Karinne Mocva Kurek  
Cuidado de la edición: Emilio García Díaz  
Diseño editorial y formación: Ana Lilia Torres Garcia  
WebMaster: Claudia Patricia Martínez Salgado

Se agradece a la Ing. Cecilia Téllez Quintanar por su valiosa colaboración en la compilación de la información y la elaboración del práctico y útil listado de especies para ser utilizadas en los humedales artificiales (ANEXO C).

<https://doi.org/10.24850/b-imta-2022-08>

ISBN: 978-607-8629-33-6

Septiembre 2022, Jiutepec, Morelos

Hecho en México / Made in Mexico

Queda prohibido su uso para fines distintos al desarrollo social.

Se autoriza la reproducción sin alteraciones del material contenido en esta obra, sin fines de lucro y citando la fuente.

# ¿Cómo construir un humedal para el tratamiento del agua residual en mi escuela?

**Coordinador Editorial:**

Adrian Pedrozo Acuña

**Editor:**

Roberta Karinne Mocva Kurek

**Autor:**

Armando Rivas Hernández



**MEDIO AMBIENTE**  
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



**IMTA**  
INSTITUTO MEXICANO  
DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

# Índice

<b>Presentación</b> .....	<b>9</b>
<b>1. Objetivo</b> .....	<b>9</b>
<b>2. Conceptos básicos</b> .....	<b>11</b>
2.1 ¿Sabes cuánta agua hay disponible donde se ubica tu escuela?.....	11
2.2 ¿Has analizado cómo afecta el crecimiento de la población a la disponibilidad y calidad del agua?.....	11
2.3 ¿Qué es el ciclo del agua y cómo participas tú en él? .....	11
2.4 ¿Has escuchado los conceptos de agua virtual y huella hídrica? .....	12
2.5 ¿Te habías preguntado qué disponibilidad de agua hay en donde vives, cuál es su calidad y qué debes hacer para evitar su contaminación? .....	12
2.6 ¿Cómo contaminamos el agua y por qué es importante el tratamiento o saneamiento del agua residual? .....	12
2.7 ¿Sabes cómo se contamina el agua en los hogares y en las escuelas y cuál es su destino? .....	12
2.8 ¿Cuántos tipos de agua residual existen?....	14
2.9 ¿Cuáles son los componentes físicos, químicos y microbiológicos del agua residual?..	14
2.10 ¿Cuáles son las principales enfermedades asociadas al agua?.....	15
2.11 ¿Cuáles son los principales procesos de tratamiento de aguas residuales?.....	15
2.12 ¿Sabías que hay una amplia diversidad de tecnologías de tratamiento de aguas residuales? .....	15
2.13 ¿Todas las tecnologías de tratamiento de agua residual utilizan energía eléctrica para su funcionamiento?.....	16
2.14 ¿Habías escuchado sobre el uso de los humedales artificiales?.....	16
2.15 ¿Existe en México una normativa que determine las características que debe tener el agua antes de ser vertida a los cuerpos receptores? .....	17
2.16 ¿Qué valores permisibles de contaminantes aplican para el caso de una escuela? .....	17
<b>3. Introducción al funcionamiento y estructura de humedales de tratamiento</b> .....	<b>19</b>
3.1 ¿Qué es un humedal artificial?.....	19
3.2 ¿Qué partes integran a un humedal artificial?.....	19
3.3 ¿Cómo funciona un humedal? .....	20
3.4 ¿Cómo se eliminan los contaminantes en un sistema de humedal artificial? .....	21
3.5 ¿Cuál es la forma geométrica más recomendable para un humedal artificial?.....	23
3.6 ¿De qué tamaño pueden ser los humedales artificiales?.....	23
3.7 ¿Cuál es la clasificación de los diferentes tipos de humedales artificiales?.....	24
3.8 ¿Qué ventajas y desventajas hay entre sistemas electromecánicos y humedales artificiales?.....	28
3.9 ¿Cómo se diseña un humedal artificial?.....	28
3.10 ¿Qué información se necesita para diseñar un humedal? .....	28
3.11 Cómo seleccionar el sitio.....	30
<b>4. Diseño del sistema</b> .....	<b>31</b>
4.1 Cómo calcular el área de tratamiento.....	31
4.2 ¿Qué forma geométrica tendrán las unidades de tratamiento? .....	32
4.3 ¿Cómo se selecciona la temperatura para el cálculo del área de tratamiento? .....	36
4.4 ¿Qué es el humedal de lodos y por qué se incluye?.....	36
<b>5. Construcción del sistema</b> .....	<b>37</b>
5.1 Materiales y herramientas.....	37
5.2 Etapas de la construcción .....	37
5.2.1 Eliminación de cubierta vegetal y trazo del sitio .....	37
5.2.2 Excavación del estanque.....	38
5.2.3 Nivelación del fondo del estanque.....	39
5.2.4 Construcción de bordos .....	39
5.2.5 Impermeabilización de los estanques.....	40
5.2.6 Colocación de capa de arcilla.....	41
5.2.7 Colocación del medio filtrante .....	41

5.2.8 Instalación de tuberías y estructuras de control de caudal .....	42
5.2.9 Siembra de especies vegetales.....	46
5.2.10 Desinfección del agua tratada .....	47
5.2.11 Inicio de operaciones o puesta en marcha del sistema .....	48
5.2.12 Control de niveles .....	48
5.2.13 Seguridad del área .....	48

**6 ¿Cómo se opera y da mantenimiento a un humedal de tratamiento?..... 50**

6.1 Limpieza de rejillas y del desarenador .....	50
6.2 Poda de la vegetación. ....	50
6.3 Limpieza de tuberías .....	52
6.4 Control de niveles del agua .....	52
6.5 ¿Cuáles son y en qué consisten y las principales labores de mantenimiento? .....	53
6.5.1 Reparación de bordos.....	53
6.5.2 Resiembra de especies.....	54
6.5.3 Otras actividades de mantenimiento .....	54
6.5.4 Registro en bitácora.....	54

**7. Reúso del agua tratada..... 58**

**8. Hemos aprendido en este manual: ..... 60**

**9. Anexos ..... 60**

**Bibliografía ..... 61**

# Índice de figuras

Figura 1. Fuentes de generación de aguas residuales en escuelas y en el hogar. ....	13
Figura 2. Composición típica del agua residual. ....	14
Figura 3. Sistema electromecánico para el tratamiento del agua residual. ....	16
Figura 4. Humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales. ....	16
Figura 5. Servicio de laboratorio. ....	18
Figura 6. Partes que integran un humedal artificial. ....	19
Figura 7. Especies vegetales para usarse en humedales artificiales. ....	20
Figura 8. Materiales para utilizarse como medio filtrante o de empaque en los humedales artificiales. ....	20
Figura 9. Procesos naturales de purificación de agua. ....	20
Figura 10. Remoción de sólidos y basura. ....	21
Figura 11. Procesos de conversión de contaminantes. ....	21
Figura 12. Mecanismos de eliminación de contaminantes. ....	22
Figura 13. Sistema de tratamiento integrado por una serie de humedales artificiales. ....	23
Figura 14. Formas geométricas de humedales artificiales. ....	23
Figura 15. Tamaños de humedales artificiales para diferentes aplicaciones. ....	24
Figura 16. Clasificación general de los humedales. ....	24
Figura 17. Clasificación de humedales artificiales. ....	25
Figura 18. Humedales de flujo superficial. ....	26
Figura 19. Humedales de flujo subsuperficial horizontal. ....	27
Figura 20. Humedales de flujo subsuperficial vertical. ....	27
Figura 21. Ventajas y desventajas entre los sistemas electromecánicos y los humedales artificiales. ....	28
Figura 22. Medidas y forma cuadrada (relación largo/ancho de 1/1) del tanque séptico del ejercicio. ....	33
Figura 23. Medidas y forma rectangular (relación largo/ancho de 2/1) del tanque séptico del ejercicio. ....	34
Figura 24. Medidas y forma rectangular (relación largo/ancho de 3/1) del humedal de flujo subsuperficial horizontal del ejercicio. ....	35
Figura 25. Diseño de un humedal de flujo subsuperficial horizontal de forma cuadrada con el uso de mamparas. ....	35
Figura 26. Materiales, herramientas y maquinaria para la construcción. ....	37
Figura 27. Inicio de la construcción. a) Trazo de los estanques, b) eliminación de la cubierta vegetal. ....	38
Figura 28. Excavación de los estanques. a) Los primeros centímetros de profundidad. b) Capa de roca. ....	38
Figura 29. Problemas de inundación. a) En el estanque. b) En el área seleccionada. ....	39
Figura 30. Nivelación del fondo del estanque: a) con tierra, b) con arenilla. ....	39
Figura 31. Formación de los bordos con distintos materiales. a) Muro de piedra. b), c) y e) Muros de concreto. d) Tierra mezclada con arcilla. ....	40
Figura 32. Impermeabilización de los estanques: a) arcilla altamente impermeable, b, c y d) geomembrana. ....	40
Figura 33. Colocación de la capa de arcilla. ....	41
Figura 34. Arreglo de las capas del medio filtrante en el humedal de flujo subsuperficial horizontal. ....	41
Figura 35. Colocación de las capas del medio filtrante: a) vista de tres capas, b) capa de la superficie. ....	42
Figura 36. Materiales de relleno dentro del humedal de flujo subsuperficial vertical. ....	42
Figura 37. Detalle del ranurado de las tuberías. ....	43
Figura 38. Ubicación y arreglo de las tuberías en el humedal de flujo subsuperficial vertical. ....	44
Figura 39. Instalación de la parrilla de tubería en la superficie de un humedal de flujo subsuperficial vertical. ....	44
Figura 40. Ubicación de las tuberías de entrada y salida en el humedal de flujo subsuperficial horizontal. ....	45
Figura 41. Instalación de tuberías en el humedal de flujo subsuperficial horizontal: a) ingreso a la caja de entrada, b) tubo de salida en el fondo del estanque, c) tubo de interconexión entre dos estanques contiguos. ....	45

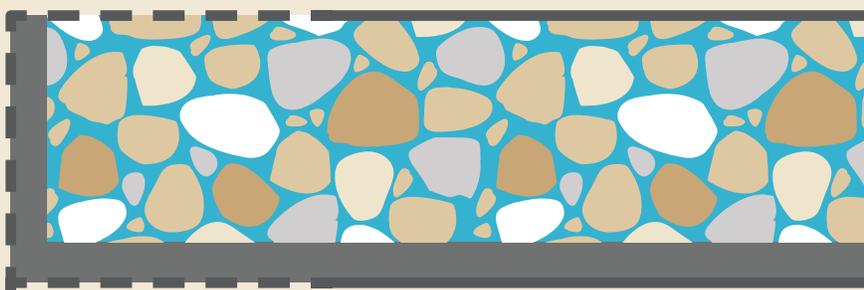
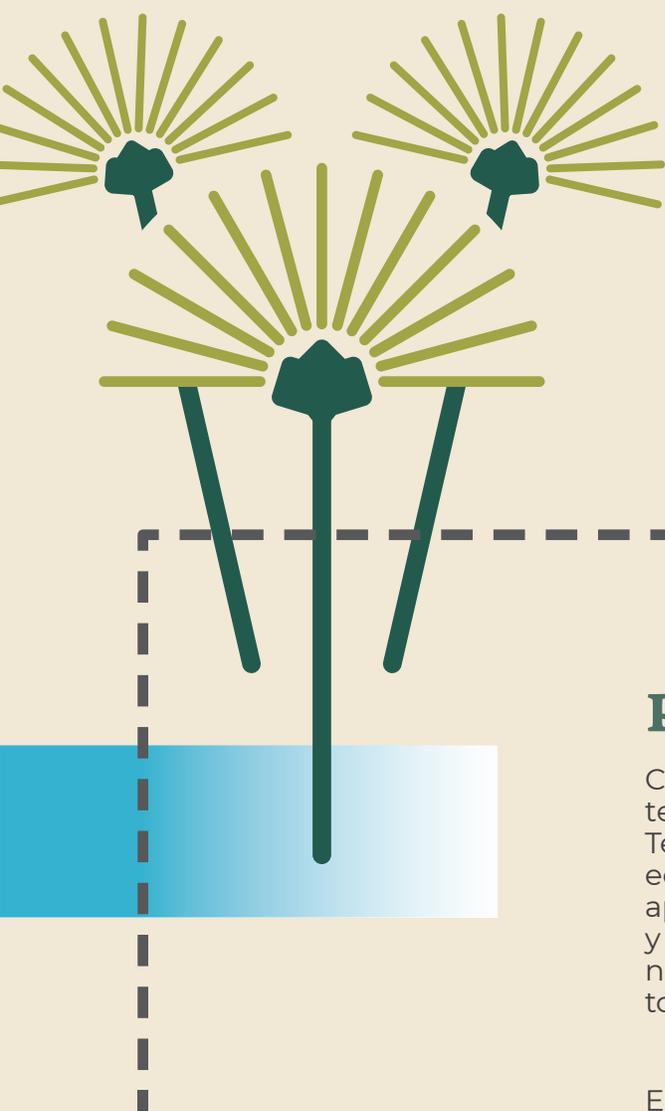


Figura 42. Caja de paso con vertedor triangular.....	46
Figura 43. Siembra de especies vegetales.....	47
Figura 44. Estructuras para el control del nivel del agua dentro del humedal: a) vertedor triangular, b) válvula de control.....	48
Figura 45. Protección del humedal mediante malla ciclónica.....	49
Figura 46. Labores de limpieza: a) retiro de basuras de las rejillas, b) extracción de sólidos del desarenador.....	50
Figura 47. Poda de vegetación: a) especies sembradas en el humedal, b) especies invasoras.....	51
Figura 48. Reciclaje de la vegetación podada: a) como mejorador de suelos en áreas de cultivo, b) como materia prima para la elaboración de artesanías.....	52
Figura 49. Limpieza de tuberías.....	52
Figura 50. Control de niveles del agua: a) verificación del nivel del agua dentro del humedal, b) medición de caudal.....	53
Figura 51. Mantenimiento de los bordos Eliminación de hormigueros, madrigueras de roedores y de plantas arbustivas o arbóreas.....	53
Figura 52. Resiembra: a) plantas dentro del humedal, b) especies de ornato en la periferia.	54
Figura 53. Registro de actividades de operación y mantenimiento en bitácora.....	54
Figura 54. Reúso del agua tratada en riego de áreas verdes y riego de cultivos.....	58
Figura 55. Presencia de vida silvestre en los humedales artificiales.....	59

## Índice de tablas

Tabla 1. Valores por usuario para dimensionar las unidades de tratamiento y el área del sistema, con base en la temperatura del agua.....	31
---	----





## Presentación

Con la intención de divulgar y fomentar la gestión sustentable del agua en escuelas, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) ha seleccionado soluciones ecotecnológicas en materia de agua de fácil instalación y apropiación, baja dependencia tecnológica, económicas y que buscan el aprovechamiento eficiente de recursos naturales, las cuales se pueden aplicar en escuelas, sobre todo periurbanas y rurales.

El objetivo es poner a disposición de la comunidad escolar estas ecotecnias del agua a través de una serie de manuales explicativos para impulsar la implementación de las mismas y contribuir con el desarrollo de escuelas sostenibles.

## 1. Objetivo

El objetivo de este manual es proporcionar los conocimientos básicos referentes a las partes que integran un humedal; cómo funcionan; las técnicas, herramientas y materiales de construcción; y, por supuesto, las acciones rutinarias para su eficiente operación.



## 2. Conceptos básicos

Tratar el agua residual evita daños al medio ambiente, protege la vida silvestre y reduce riesgos a la salud humana.

### 2.1 ¿Sabes cuánta agua hay disponible donde se ubica tu escuela?

La Tierra es ampliamente conocida como el planeta azul, lo cual básicamente se debe a la presencia del agua, que cubre el 70 % de la superficie terrestre. Sin embargo, las apariencias engañan, ya que del total del volumen de la Tierra solamente una milésima parte corresponde al ocupado por el agua.

Veamos ahora cómo está distribuida el agua en el planeta. El 97.2 % es salada y solo el 2.8 % es dulce. De este último porcentaje, el 2.38 % se encuentra congelada en hielos y glaciares, el 0.39 % se encuentra en el subsuelo, y solamente el 0.03 % es agua superficial, que forma ríos y lagos. En resumen, el agua disponible, sea subterránea o superficial, corresponde únicamente al 0.42 % del total de agua existente en el planeta; sin duda un porcentaje muy pequeño, del cual además debe considerarse su calidad, es decir, que esté libre de contaminantes.

### 2.2 ¿Has analizado cómo afecta el crecimiento de la población a la disponibilidad y calidad del agua?

La cantidad de agua existente en el planeta es constante, es decir, ni aumenta ni disminuye, mientras que la población es cada vez mayor, por lo que la disponibilidad por habitante es cada vez menor.

En 1940 había 22 millones de habitantes en México; en el año 2020 la población se incrementó a 126 millones. La disponibilidad natural media anual de agua por habitante era de 17 742 metros cúbicos en 1950, pero, debido al crecimiento de la población, se redujo a 4 094 metros cúbicos en 2004, y se estima en 3 500 metros cúbicos en el 2020. Esta última cifra, de acuerdo con la ONU, se clasifica como un nivel que debe atenderse con prioridad. Cuando la disponibilidad es menor a 1 700 metros cúbicos por habitante por año se clasifica como un nivel crítico urgente de atender. México se encuentra dentro del grupo de países con disponibilidad baja.

### 2.3 ¿Qué es el ciclo del agua y cómo participas tú en él?

Se le llama ciclo del agua debido a que es un proceso de circulación continua, en el que el agua se traslada de unos lugares a otros y va cambiando de estado físico. También se le conoce como ciclo hidrológico. El agua se evapora en los océanos; llueve hacia los continentes, donde un porcentaje se infiltra hacia el subsuelo y otra se evapora; el resto se escurre superficialmente, formando ríos y lagos. El agua superficial finalmente retorna a los océanos, completando el ciclo. Este proceso se desarrolla de manera repetitiva.

Sin embargo, el ciclo del agua se ve seriamente afectado por las actividades humanas (actividad antropogénica), ya que se generan aguas residuales en las ciudades, en las zonas rurales y en las diversas actividades

productivas, como son la agricultura, la ganadería y la pesca. También los plásticos que llegan al océano son poco a poco transformados en microplásticos, que contaminan el agua y los suelos. La lluvia esparce en todos sitios estas pequeñas partículas.

El agua, usualmente limpia, se extrae de los pozos, pero posteriormente se le incorporan múltiples desechos sólidos y líquidos, provocando serios problemas de contaminación e impactos al medio ambiente y a la salud.

## 2.4 ¿Has escuchado los conceptos de agua virtual y huella hídrica?

El agua virtual se define como la cantidad total de agua utilizada para la elaboración de un producto o la prestación de un servicio. Sin duda, todos los alimentos utilizan agua para su producción, pero también prácticamente todos los productos o servicios la usan como parte de sus procesos, como pueden ser la producción de autos, celulares, ropa, calzado, muebles, juguetes, y la construcción de casas, sólo por citar algunos ejemplos.

¿Sabías que para producir una papa se necesitan 25 litros de agua y para generar una sola naranja se requieren 50 Litros? Para producir 1 kilogramo de carne de res se necesitan 21 mil litros de agua. En apariencia podría parecer que se utiliza mucha agua para obtener cada producto. Esto se debe a que se contabiliza el agua durante todo el proceso de elaboración de un producto o servicio. Por citar un ejemplo, para producir cualquier fruta se utiliza agua durante el riego, aunque parte del agua se evapora, parte es retenida en el suelo y parte es evapotranspirada por las plantas hacia la atmósfera. También se utiliza agua para la producción de fertilizantes, compostas, plaguicidas, etc., que se utilizan para la producción de esas frutas, incluso para su transporte hacia los sitios de venta.

Como ya se mencionó, no solo se utiliza el agua para producir alimentos, ya que prácticamente todos los productos requieren agua en alguna parte de sus procesos, y así tenemos que para elaborar una camiseta de algodón se necesitan 2 700 litros, y si su fabricación se realizó en otro país o región, significa que estamos consumiendo de manera indirecta el agua que se usó para su producción, lo cual nos lleva a entender un nuevo concepto, el de “huella hídrica”.

La huella hídrica se define como la cantidad de agua utilizada de manera directa, por las actividades diarias, más el volumen de agua indirecta o virtual utilizada en la producción de los bienes y servicios de consumo. Dicho de una manera sencilla, la huella hídrica es el uso directo o indirecto que los humanos hacemos del agua, ya sea de manera individual o colectiva.

¿Habías reflexionado alguna vez sobre la magnitud y el impacto de tu huella hídrica en términos no sólo de consumo, sino de la afectación de la calidad del agua por concepto de contaminación?

## 2.5 ¿Te habías preguntado qué disponibilidad de agua hay en donde vives, cuál es su calidad y qué debes hacer para evitar su contaminación?

La cantidad de agua en el planeta Tierra es constante; sin embargo, debido al acelerado crecimiento de la población, se tiene menor disponibilidad de este valioso recurso y, más aún, su calidad está siendo severamente afectada por las aguas residuales generadas en actividades agropecuarias, industriales y domésticas en las ciudades, que provocan serios problemas de contaminación.

Frecuentemente se escucha en las noticias sobre localidades o regiones en donde se agudizan los problemas de escasez de agua, y en las que se presentan serios problemas de calidad, que la hacen no apta para su consumo. Obtenerla implica cada vez mayores costos económicos y además se generan serios daños al ambiente. Se tienen también severas consecuencias con efectos a la salud, ya que se pueden desarrollar enfermedades de origen hídrico (asociadas al agua), así como daños a la vida silvestre y, en general, al medio ambiente.

## 2.6 ¿Cómo contaminamos el agua y por qué es importante el tratamiento o saneamiento del agua residual?

Iniciemos con la pregunta ¿qué es el agua residual?

El agua residual es el resultado del uso doméstico o industrial del agua, a la que se incorporan residuos, o contaminantes, que afectan su calidad.

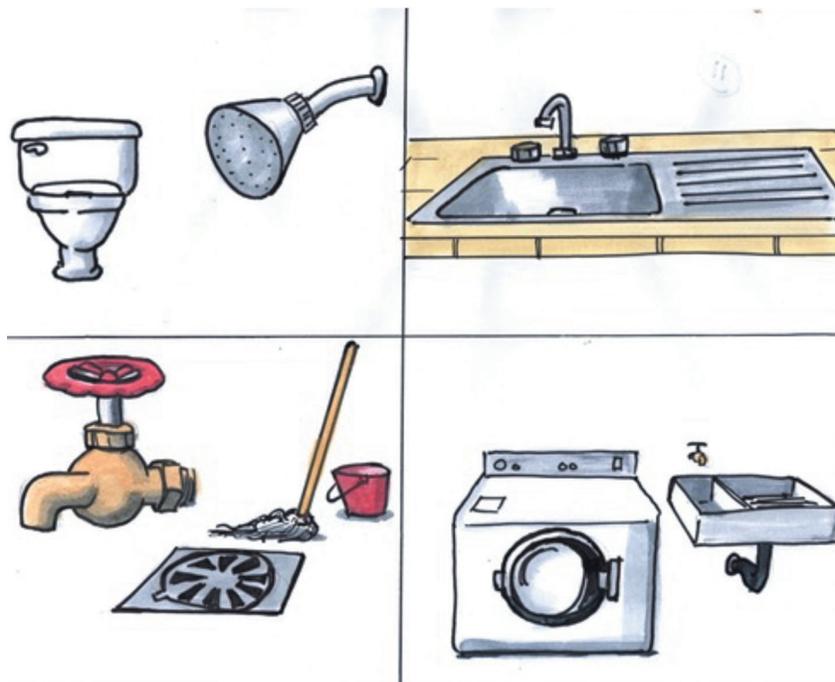
Dicho de una manera simple, el agua residual es cualquier tipo de agua cuya calidad está afectada negativamente por las actividades humanas.

Su composición es variada, dependiendo si provienen de las descargas de usos municipales, industriales, recreativos, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios o domésticos, así como la mezcla de ellas.

## 2.7 ¿Sabes cómo se contamina el agua en los hogares o en las escuelas y cuál es su destino?

Una de las principales causas de contaminación del agua es su uso en los hogares y en las escuelas. El

agua entubada, no necesariamente agua potable, que usualmente es suministrada por el municipio, es utilizada principalmente en los servicios sanitarios, donde se agregan desechos como heces fecales, orina, papel higiénico, residuos de medicamentos que fueron consumidos, así como los productos de limpieza y desinfectantes utilizados en el lavado de las manos, e incluso los que se utilizan cuando se presenta la necesidad de lavado de ropa (figura 1).



**Figura 1.** Fuentes de generación de aguas residuales en escuelas y en el hogar.

En las escuelas que cuentan con servicio de cafetería se incorporan residuos de alimentos y productos de limpieza empleados en el lavado de los utensilios de cocina.

Algunas escuelas cuentan con servicios de regadera, donde se agregan detergentes y champú, principalmente.

También se incorporan a las coladeras los residuos de productos consumidos en la limpieza de las instalaciones, por ejemplo, el jabón líquido y sustancias desinfectantes.

Los residuos son transportados por el agua a través del drenaje, posteriormente son conducidos a través del sistema de alcantarillado hacia arroyos, ríos, lagos, océanos, zonas de riego y algunas veces hacia plantas de tratamiento de agua residual.

Es de sentido común comprender que el agua residual debe ser tratada y evitar que los contaminantes sean vertidos sin ningún tratamiento.

## 2.8 ¿Cuántos tipos de agua residual existen?

Existen varios tipos de agua residual: doméstica, sanitaria, industrial, agropecuaria, etc. Es de suma importancia señalar que esta, al ser vertida al ambiente y a las zonas agrícolas, genera impactos que alteran y afectan su composición y su funcionalidad, de tal modo que contaminan las áreas agrícolas, dañan la biodiversidad, perjudican las actividades productivas y generan riesgos a la salud.

El agua residual en las zonas urbanas es generada en domicilios, industrias, talleres mecánicos, laboratorios, restaurantes, hoteles, entre otros, la cual contiene residuos orgánicos, microorganismos que producen enfermedades, solventes, así como un sinfín de contaminantes emergentes, como son medicamentos, hormonas, residuos de laboratorios, cosméticos, etcétera.

En las áreas rurales y en el campo se generan residuos en diversas actividades agropecuarias y domésticas, tales como residuos de fertilizantes, plaguicidas, productos de limpieza, medicamentos, hormonas, heces fecales, orina, así como los generados de manera natural, resultantes de la descomposición de la vida silvestre. También es importante citar contaminantes como el arsénico y otros metales pesados, que son extraídos del subsuelo mediante los pozos construidos con fines de riego.

## 2.9 ¿Cuáles son los componentes físicos, químicos y microbiológicos del agua residual?

Estudiamos ahora los componentes físicos, químicos y microbiológicos del agua residual.

La composición típica del agua residual es la siguiente: el 99 % es agua, y el 1 % corresponde a los contaminantes. De este 1 %, el 70 % son materiales orgánicos, como es el caso de las proteínas, y el 30 % son sustancias inorgánicas, como arenas, grasas, sales y metales pesados (figura 2).

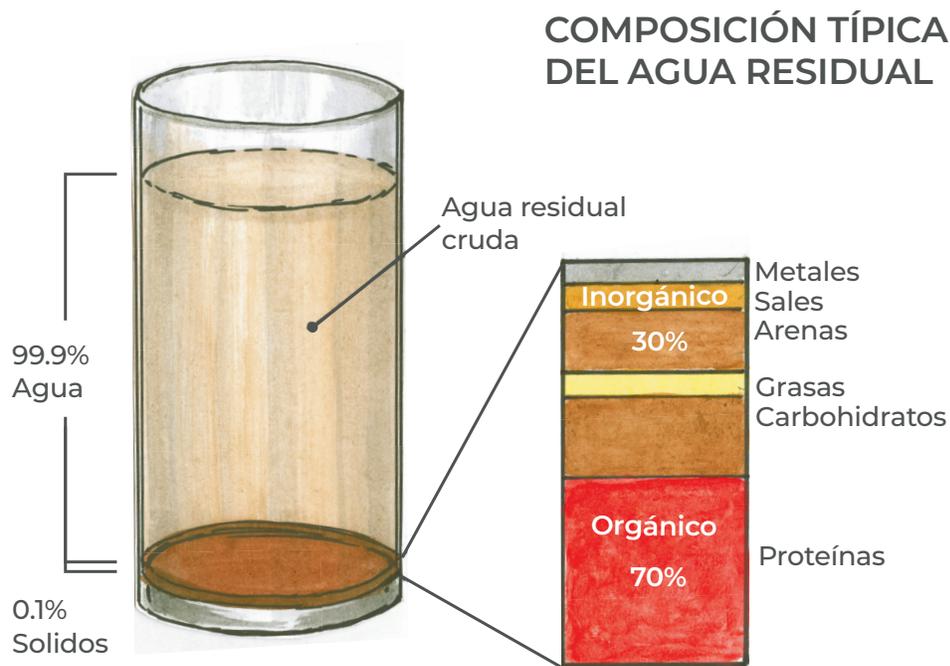


Figura 2. Composición típica del agua residual.



## 2.10 ¿Cuáles son las principales enfermedades asociadas al agua?

Dentro de las características microbiológicas del agua residual tenemos las enfermedades causadas por bacterias, como la salmonela, que produce fiebre tifoidea, Escherichia coli, que origina gastroenteritis y Vibrio cholera, que produce Cólera.

Las principales enfermedades ocasionadas por virus son gastroenteritis, meningitis y poliomielitis, que son generadas por enterovirus; hepatitis, debido al virus de la hepatitis, y otros tipos de gastroenteritis, producidas por otras variantes de virus, como el adenovirus, rotavirus y parvovirus.

Las enfermedades más comunes provocadas por parásitos son paludismo, giardiasis, malaria y el mal de Chagas, entre otros.

Todos los desechos incluidos en el agua residual afectan invariablemente a la vida acuática y terrestre, y al medio ambiente: se provoca la extinción de especies, la afectación de cultivos y se propicia un alto riesgo a la salud. De ahí la necesidad de eliminar los contaminantes del agua residual para evitar todas estas posibles afectaciones.

Hasta aquí hemos analizado cuáles son los contaminantes más comunes producidos en las zonas urbanas, rurales, en el campo, y por supuesto en las escuelas.

## 2.11 ¿Cuáles son los principales procesos de tratamiento de aguas residuales?

Una vez que el agua fue contaminada se deben eliminar los contaminantes. Existen principalmente tres tipos de procesos de tratamiento de agua residual: físicos, químicos y biológicos.

En los tratamientos físicos se aplica una separación física de los sólidos, por ejemplo, mediante rejillas, desarenadores y tanques de sedimentación.

En los tratamientos químicos se introducen sustancias químicas, conocidas como polímeros, para precipitar los contaminantes hacia el fondo de los estanques, logrando una separación de la fase contaminada. Algunos ejemplos son la coagulación y la floculación en las que se tiende a formar partículas de mayor tamaño y peso, para que vayan al fondo del estanque.

El objetivo del tratamiento biológico de las aguas residuales consiste principalmente en eliminar los contaminantes mediante el uso de bacterias. Los materiales orgánicos, sólidos y disueltos, así como algunos contaminantes de tipo inorgánico, son eliminados eficientemente por la acción microbiana.

El tratamiento biológico se divide de manera general en procesos aerobios, los cuales utilizan oxígeno para la biodegradación, y los procesos anaerobios, en los que en ausencia de oxígeno se efectúa la depuración del agua.

## 2.12 ¿Sabías que hay una amplia diversidad de tecnologías de tratamiento de aguas residuales?

Existe hoy en día una gran cantidad de alternativas de tratamiento de aguas residuales. En México, de manera oficial, se utilizan por lo menos

veinte variantes, y cada una de estas se aplica bajo condiciones técnicas y económicas específicas, según sea el caso. Las plantas de tratamiento deben seleccionarse en función de la cantidad y calidad del agua residual a tratar y de los niveles de tratamiento establecidos en las normas oficiales para su disposición o reutilización.

### 2.13 ¿Todas las tecnologías de tratamiento de agua residual utilizan energía eléctrica para su funcionamiento?

Existen básicamente dos tipos de sistemas de tratamiento: los electromecánicos, que requieren energía eléctrica para su funcionamiento, y los naturales, que funcionan con energía solar, como es el caso de los humedales de tratamiento.

Los sistemas que requieren energía eléctrica para su funcionamiento son conocidos como sistemas electromecánicos, como los lodos activados y zanjas de oxidación, que son muy eficientes, pero tienen altos costos de tratamiento por el uso de la energía eléctrica (figura 3).



Figura 3. Sistema electromecánico para el tratamiento de agua residual

Los sistemas naturales, como son las lagunas de estabilización y los humedales artificiales, tienen menores costos de tratamiento, ya que funcionan con energía solar, además de que son sencillos de operar (figura 4).

Es importante señalar que todas las tecnologías son buenas, ya que han sido utilizadas y ha sido probada su eficiencia de remoción de contaminantes; no obstante, es necesario conocer que cada una de ellas aplica para condiciones técnicas, económicas, sociales y ambientales específicas de cada caso. Para seleccionar la tecnología que se va a usar es necesario generar y analizar al menos tres alternativas, incluidos sus costos de tratamiento. Se debe elegir la más económica y eficiente y, como ya fue citado, aplique para las circunstancias técnicas y ambientales de cada caso y desde luego, que sea aceptada socialmente.

### 2.14 ¿Habías escuchado sobre el uso de los humedales artificiales?

Una de las alternativas tecnológicas con mayor éxito mundial para el tratamiento de las aguas residuales



Figura 4. Humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales.

son los humedales artificiales. Estos sistemas no requieren de energía eléctrica para su uso, son sencillos de operar, estéticos, amigables con la naturaleza, presentan bajos costos de tratamiento, funcionan para diversos tipos de clima y pueden diseñarse para utilizar el agua tratada en el riego de plantas, áreas verdes y cultivos, así como para ser vertida a cuerpos receptores (ríos, lagos, océanos y zonas de cultivo) conforme a los límites establecidos en las normas mexicanas.

Su principal desventaja, con respecto a los sistemas electromecánicos, es que requieren mayor espacio, sin embargo, se utilizan a nivel familiar, en escuelas, en zonas rurales y en ciudades de mayor tamaño.

Los humedales artificiales han sido utilizados en todo el mundo desde hace más de treinta años, periodo durante el cual han sido notablemente mejorados, a partir de una gran cantidad de investigaciones sobre su estructura y funcionamiento, así como por su utilidad y confiabilidad para reutilizar el agua tratada.

### **2.15 ¿Existe en México una normativa que determine las características que debe tener el agua antes de ser vertida a los cuerpos receptores?**

Como previamente fue citado el agua residual debe ser depurada en función de un objetivo de tratamiento, ya sea para sudisposición o su reutilización. En México, la regulación que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales se denomina Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021.

Se denomina cuerpo receptor a un curso de agua superficial (río, arroyo, lago, presa), al océano (ambiente marino, bahía, estuario), así como a los terrenos (agua subterránea o del subsuelo) en donde se infiltran o inyectan dichas aguas, pudiendo contaminar el suelo o los acuíferos, donde se descarguen tratadas o sin tratar.

Dicho de una manera simplificada, un cuerpo receptor es un río, lago, océano o un terreno que recibe el agua residual, tratada o sin tratar.

El agua residual puede provenir de áreas urbanas, rurales, industrias, o de sistemas de riego.

### **2.16 ¿Qué valores permisibles de contaminantes aplican para el caso de una escuela?**

Con base en esta norma, para el caso de instalar sistemas de tratamiento de agua residual en las escuelas, con el objetivo de reutilizar el agua tratada en riego de áreas verdes, por citar algunos valores promedio mensuales, se tendrían que obtener 35 grados de temperatura, 15 miligramos por litro de grasas y aceites, 15 de sólidos suspendidos totales, 1 huevo de parásitos (lombrices, amibas, etc.), y 250 bacterias coliformes fecales (bacterias que viven en el tracto digestivo) como número más probable en 100 mililitros.

También existe la NOM-003-SEMARNAT-1997, que señala un tipo de reúso del agua tratada en servicios al público con contacto directo (por ejemplo en el riego de césped en jardines) con un límite máximo permisible de 240 coliformes fecales en 100 mililitros (bacterias bioindicadoras de

contaminación fecal), 1 huevo de parásitos (huevos de helmintos), 15 miligramos por litro de grasas y aceites, 20 miligramos por litro de  $\text{DBO}_5$  (materia orgánica) y 20 miligramos por litro de sólidos suspendidos totales.

Existen laboratorios certificados para realizar la toma de muestras y los análisis necesarios para cuantificar los contaminantes mediante materiales, técnicas y equipos especializados, bajo procedimientos estrictamente controlados (figura 5).



**Figura 5.** Servicio de laboratorio.



## 3. Introducción al funcionamiento y estructura de humedales de tratamiento

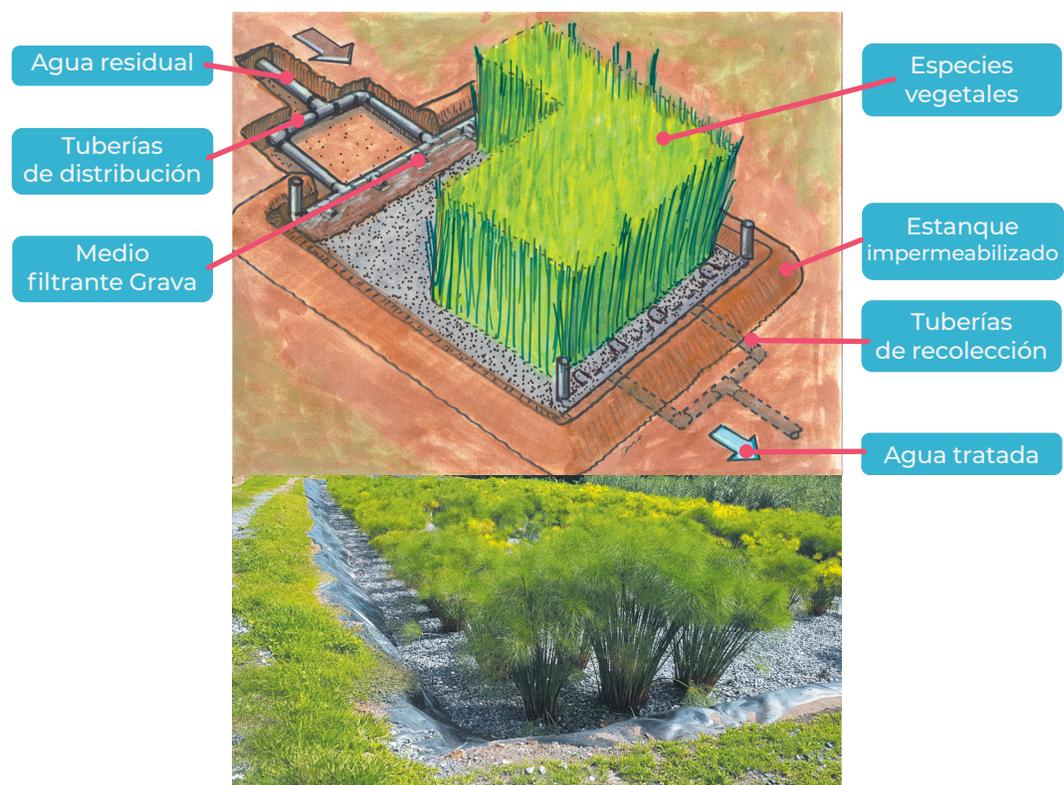
### 3.1 ¿Qué es un humedal artificial?

Hemos visto que existen diferentes tecnologías para el tratamiento de las aguas residuales. Una de las tecnologías que simulan los procesos de purificación del agua que se presentan en la naturaleza corresponde a los humedales artificiales.

Por lo tanto, un humedal artificial es un sistema de tratamiento de aguas residuales, es decir, una alternativa tecnológica mediante la cual se eliminan o reducen los contaminantes que contiene el agua residual.

### 3.2 ¿Qué partes integran a un humedal artificial?

Un humedal artificial consiste en un estanque poco profundo, impermeabilizado para evitar infiltraciones o fugas de agua, que es rellenado con grava, la cual sirve como medio filtrante y como sustrato sobre el que se siembran especies vegetales, y en el que se instalan tuberías para ingresar y distribuir el agua, así como para su recolección y disposición final (figura 6).



**Figura 6.** Partes que integran un humedal artificial.

En México existe una amplia variedad de especies vegetales que pueden utilizarse en un humedal artificial, como se observa en la figura 7.



**Figura 7.** Especies vegetales para usarse en humedales artificiales.

Existen diversos materiales que pueden utilizarse como medio filtrante (figura 8). En cada sitio debe averiguarse cuál de estos es más fácil y económico de conseguir, aunque cabe mencionar que los humedales artificiales que utilizan medios orgánicos (bambú y carrizo) son más eficientes, y les siguen en orden de menor eficiencia el tezontle, la grava y piedras de río.

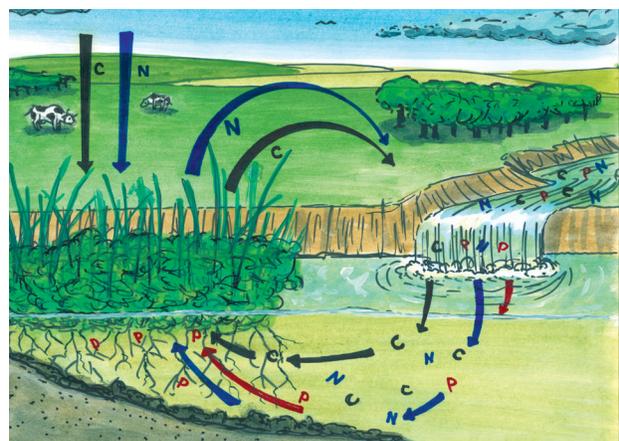


**Figura 8.** Materiales para utilizarse como medio filtrante o de empaque en los humedales artificiales.

### 3.3 ¿Cómo funciona un humedal?

Los humedales artificiales utilizan los mismos principios de purificación del agua que los humedales naturales. Algunos ejemplos de humedales naturales son las ciénegas, los pantanos y las marismas. Los contaminantes disueltos o suspendidos en el agua son transformados en gases que van a la atmósfera o bien son utilizados por microorganismos y por plantas para su desarrollo (figura 9).

Recordemos que el agua residual contiene contaminantes orgánicos e inorgánicos, por lo que es importante señalar que para los microorganismos y las plantas estos constituyen una fuente de alimento, ya que a partir de estas sustancias toman los elementos necesarios para su desarrollo.



**Figura 9.** Procesos naturales de purificación del agua.

### 3.4 ¿Cómo se eliminan los contaminantes en un sistema de humedal artificial?

La basura contenida en el agua residual es eliminada mediante un sistema de rejillas. La arena, tierra y otros sólidos que pesan más que el agua son removidos por sedimentación, mediante una unidad conocida como desarenador (figura 10).

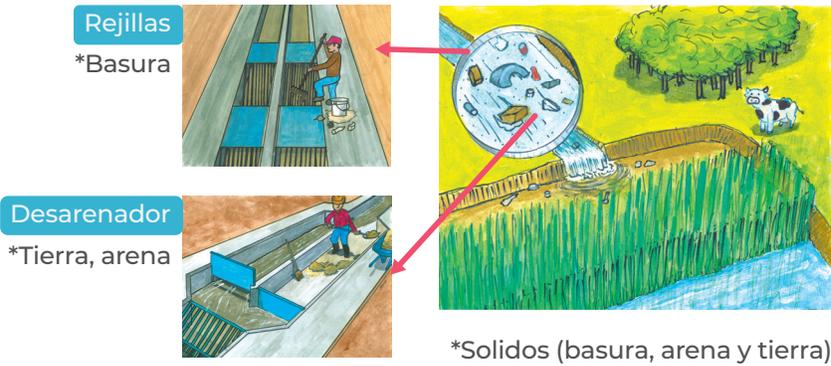


Figura 10. Remoción de sólidos y basura.

Los sólidos suspendidos son retenidos en el medio filtrante, en donde se desarrollan procesos de filtración, sedimentación o de adhesión hacia todas las superficies existentes en la grava, raíces, en el fondo y en los bordos (figura 11).

Los contaminantes disueltos son utilizados como alimento por los microorganismos, quienes transforman los materiales orgánicos en gases que van hacia la atmósfera o bien se mezclan en el agua.

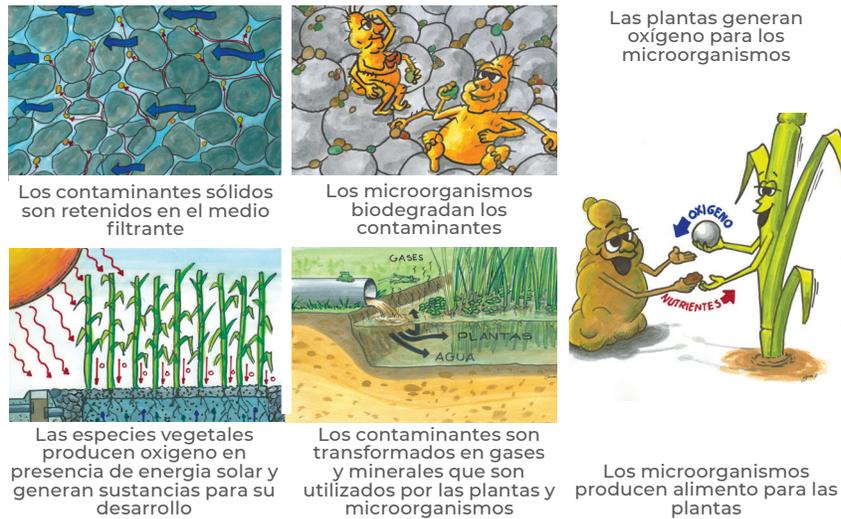


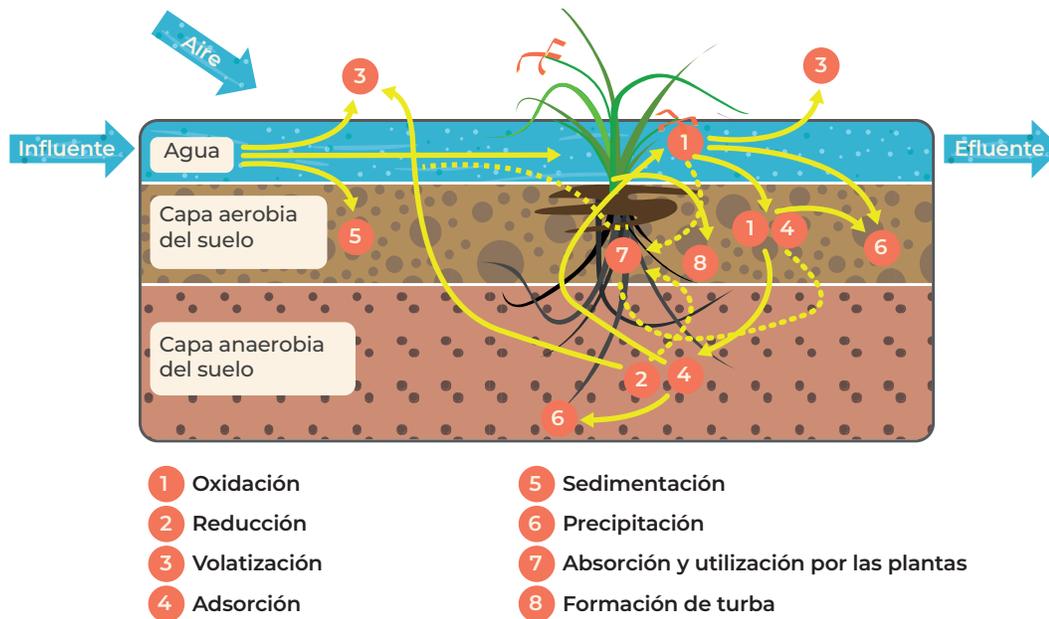
Figura 11. Procesos de conversión de contaminantes.

Las sustancias complejas y nocivas son transformadas en nutrientes y minerales que sirven de alimento a las plantas, las cuales, a su vez, proveen a los microorganismos el oxígeno requerido para su supervivencia,

además de proporcionarles un medio de hospedaje en las raíces. A este proceso de ayuda mutua entre microorganismos y plantas se le conoce como simbiosis.

Las plantas producen oxígeno en sus hojas en presencia de energía solar, desarrollando el proceso conocido como fotosíntesis. El oxígeno es conducido desde las hojas hasta las raíces por medio de los conductos tubulares que tienen las plantas.

Hasta aquí se ha mostrado de una manera sencilla los mecanismos de eliminación de contaminantes en los humedales artificiales; sin embargo, es importante señalar que estos sistemas son sumamente complejos, en los que se desarrollan de manera simultánea varios procesos físicos, químicos y biológicos (figura 12), así como se incorporan importantes conocimientos de hidráulica para obtener y mejorar las eficiencias de tratamiento, conforme lo indica la normativa mexicana para la disposición y reúso del agua tratada.

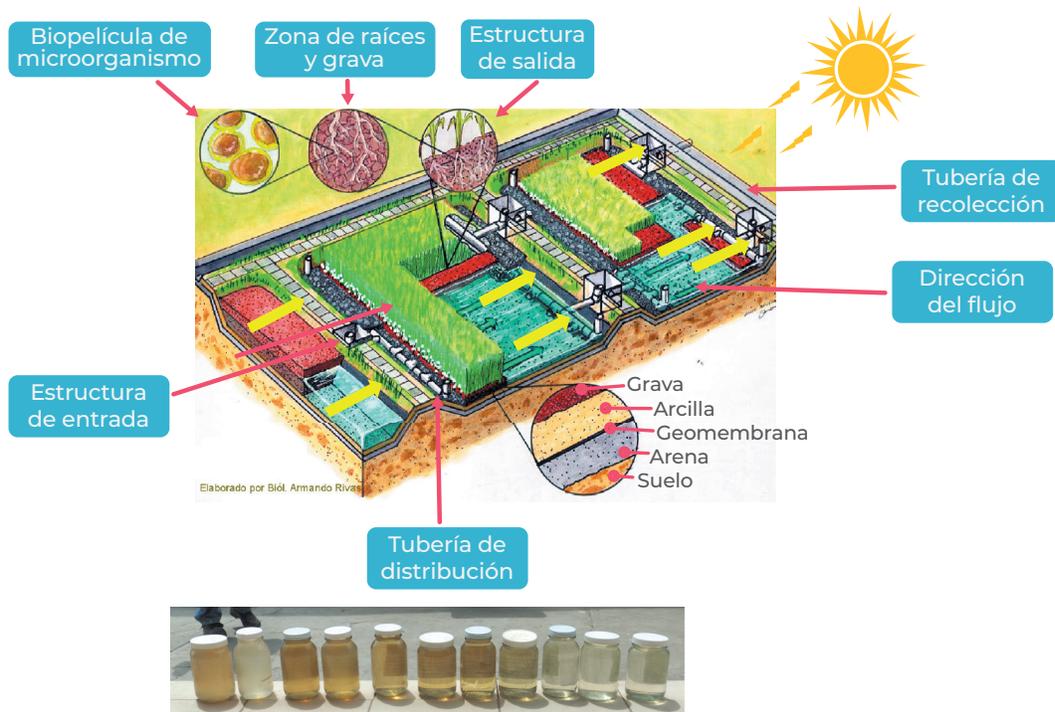


**Figura 12.** Mecanismos de eliminación de contaminantes.

De igual modo, previamente se mostró la estructura y funcionamiento de un humedal artificial; sin embargo, es importante señalar que, dependiendo de las características de calidad y cantidad del agua, así como del objetivo del tratamiento (reúso o disposición) que se tenga contemplado, especialmente para cuando se requiere tratar grandes volúmenes de agua, es de mayor conveniencia diseñar una serie de humedales artificiales, de tal modo que en cada estanque se van desarrollando procesos físicos, químicos y biológicos específicos, que en conjunto integran un sistema de tratamiento altamente eficiente.

En la figura 13 se observa un sistema de humedales artificiales conformado por tres estanques en serie. En la serie de frascos se observa que el agua es cada vez más clara, conforme avanza el tratamiento. En numerosos estudios realizados por el IMTA se ha demostrado que mediante estos sistemas es factible obtener agua tratada que cumpla con la normativa para diferentes tipos de reúso.





**Figura 13.** Sistema de tratamiento integrado por una serie de humedales artificiales.

### 3.5 ¿Cuál es la forma geométrica más recomendable para un humedal artificial?

Como se muestra en la figura 14, se han utilizado diversas formas geométricas en el diseño de humedales artificiales. Los hay alargados, rectangulares, circulares, etcétera.



**Figura 14.** Formas geométricas de humedales artificiales.

Sin embargo, con base en estudios de hidráulica, en los que se utilizan colorantes artificiales, se ha demostrado que las formas alargadas generan mejores eficiencias de tratamiento.

### 3.6 ¿De qué tamaño pueden ser los humedales artificiales?

Estos sistemas pueden ser unipersonales, por lo que su tamaño puede ser muy pequeño, o bien pueden utilizarse por una familia, en restaurantes, hoteles, escuelas, zonas rurales con

poblaciones de hasta 2 500 habitantes, en ciudades grandes (120 mil habitantes) e incluso para caudales mayores de agua residual (figura 15). Realmente el límite está determinado por la disponibilidad del terreno.

Cabe recordar que los humedales artificiales, por no requerir energía eléctrica para su funcionamiento, pueden aprovecharse en sitios donde no se dispone de esta.



**Figura 15.** Tamaños de humedales artificiales para diferentes aplicaciones.

### 3.7 ¿Cuál es la clasificación de los diferentes tipos de humedales artificiales?

Existen básicamente dos tipos de humedales: los naturales y los artificiales (figura 16). Dentro de los naturales tenemos como ejemplos los pantanos, las ciénegas y las marismas, en donde el agua fluye de una manera desordenada, se generan flujos preferenciales y las especies vegetales se desarrollan conforme a las circunstancias del sitio.

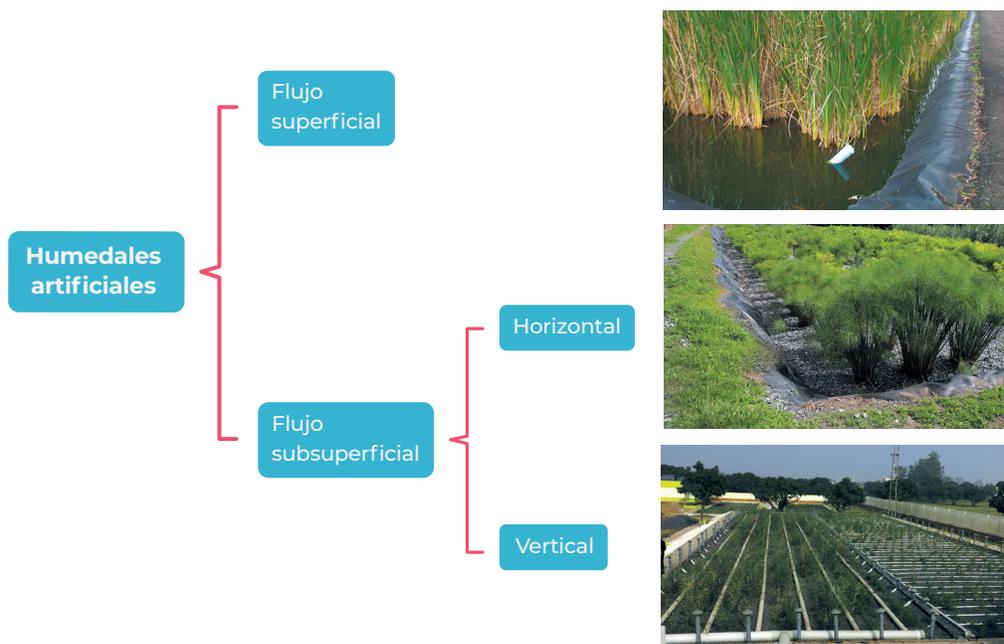
En los humedales artificiales se incorporan conocimientos de ingeniería, de tal modo que se controla y direcciona el flujo del agua, se propicia el desarrollo de microorganismos específicos y se utilizan las especies vegetales de acuerdo con los objetivos de cada caso. El propósito es obtener las mayores eficiencias de remoción de contaminantes, conforme a las regulaciones existentes.



**Figura 16.** Clasificación general de los humedales.



Los humedales artificiales son de dos tipos (figura 17): los de flujo superficial, en los que se distingue el agua en la superficie, y los de flujo subsuperficial, en los que se observa el medio filtrante en la superficie. A su vez, los humedales de flujo subsuperficial presentan dos variantes: los de flujo subsuperficial horizontal y los de flujo subsuperficial vertical.



**Figura 17.** Clasificación de humedales artificiales.

\*Foto proporcionada por Carlos Alberto Arias. Aarhus Univ.

Analicemos las diferencias y similitudes entre los distintos tipos de humedales artificiales: Primeramente, revisemos las similitudes. Como ya se describió en secciones anteriores, en todas las variantes de humedales el sistema está integrado por estanques impermeabilizados que contienen un medio filtrante, especies vegetales, tuberías y registros (con vertedores) en la entrada y en la salida de cada estanque.

Los sólidos contenidos en el agua residual son retenidos en el medio de empaque por filtración y por sedimentación. Los contaminantes disueltos son utilizados como alimento por microorganismos, que los transforman en sustancias minerales que sirven de nutrientes para las plantas. Las plantas utilizan la energía solar para la producción de oxígeno, que es usado por los microorganismos y por las propias plantas para su respiración.

El agua pasa y tiene contacto con los microorganismos que se encuentran suspendidos en el agua, así como con los que están adheridos a todas las superficies del fondo, bordos, raíces, tallos y hojas sumergidas en el agua.

El agua ingresa y es distribuida mediante un sistema de tuberías, fluye a través del estanque y, conforme avanza, va mejorando su calidad.

El agua es recolectada por otro conjunto de tuberías instaladas al final del estanque y, por último, llega al registro o caja de salida.

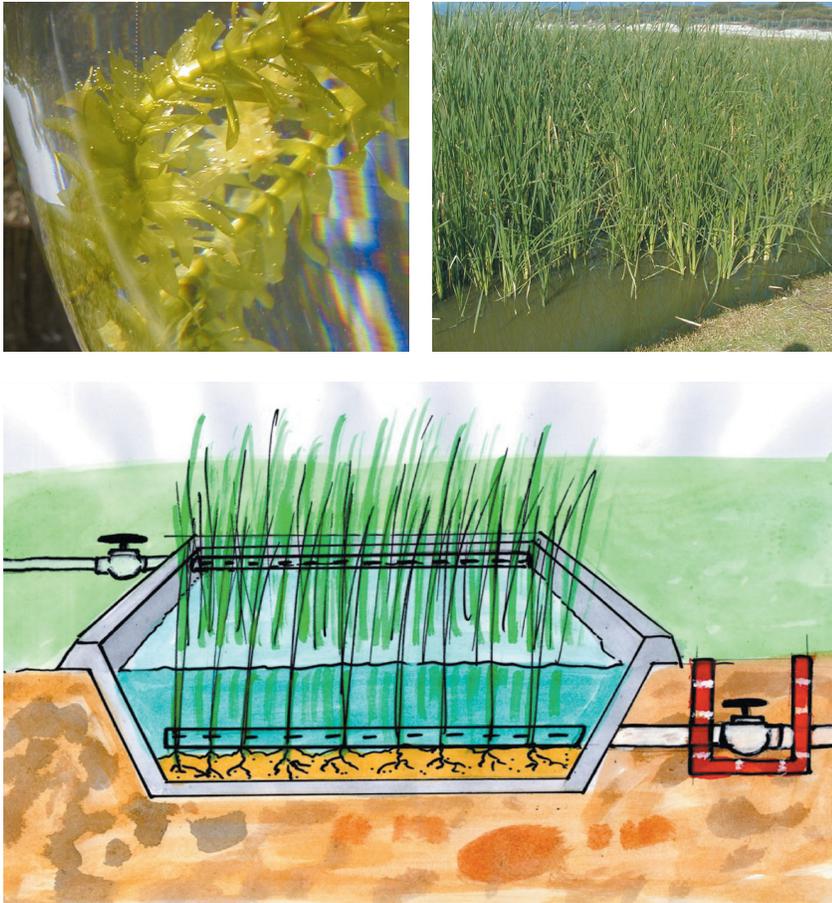
Revisemos ahora las diferencias para cada variante.

En los humedales de flujo superficial, también conocidos como de flujo inundado, el agua fluye, como su nombre lo indica, de manera superficial, por lo que puede ser observada con facilidad (figura 18).

El agua va volviéndose más clara conforme pasa a través del humedal.

Las especies vegetales se siembran en el fondo y emergen hacia la superficie.

El fondo presenta una leve pendiente para facilitar el flujo del agua.



**Figura 18.** Humedales de flujo superficial.

En los sistemas de flujo subsuperficial horizontal (figura 19) el agua fluye de manera subterránea, es decir, pasa a través del medio filtrante por debajo de la superficie, por lo que el agua no se debiera ver.

Al realizar una pequeña excavación en la superficie del medio filtrante se puede observar el nivel del agua, el que usualmente se debe mantener a 10 cm por debajo del nivel de la superficie.

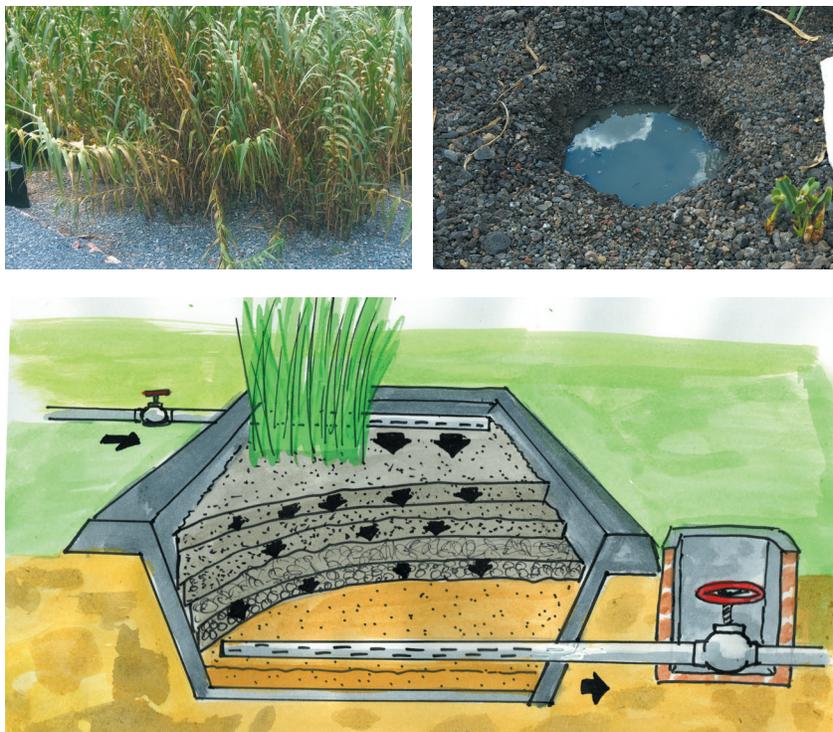
El agua residual avanza a través del estanque y va mejorando su calidad. El propósito, como antes se indicó, es que el agua lleve los contaminantes a todos los microorganismos adheridos a las superficies.

Se instala una serie de tuberías en la entrada y en la salida del estanque. Éstas tuberías tienen perforaciones o ranuras a lo largo de los tubos y se colocan de tal modo que se provoque que el agua fluya a todo lo ancho del estanque.



De manera similar a los humedales de flujo superficial, se instalan cajas o registros en la entrada y en la salida del humedal.

Las especies vegetales se siembran dentro del lecho filtrante, donde desarrollan sus raíces.



**Figura 19.** Humedales de flujo subsuperficial horizontal.

En los humedales de flujo superficial vertical (figura 20) se colocan tuberías perforadas sobre la superficie del lecho filtrante, de tal modo que el agua se distribuye desde la superficie hacia el fondo, como si se utilizara una regadera, para provocar el contacto con todas las superficies donde se han desarrollado los microorganismos. Asimismo, se colocan tuberías en el fondo del estanque para recolectar el agua tratada y finalmente llegar a la caja de salida.

También en estos humedales las plantas se siembran dentro del lecho filtrante.



**Figura 20.** Humedales de flujo subsuperficial vertical.

\*Foto proporcionada por Carlos A. Arias. Aarhus Univ.

### 3.8 ¿Qué ventajas y desventajas hay entre sistemas electromecánicos y humedales artificiales?

Los sistemas electromecánicos (figura 21) utilizan energía eléctrica para su funcionamiento, provocan contaminación a la atmósfera por los combustibles utilizados para generar energía eléctrica, son sistemas compactos que utilizan poco terreno, son complejos de operar y de dar mantenimiento, demandan personal altamente capacitado, generan lodos residuales, producen ruido, son poco estéticos (concreto y metal) y originan gases que incrementan el cambio climático.

Los humedales artificiales no utilizan energía eléctrica, usan la energía solar, demandan grandes superficies de terreno, son fáciles de operar y de dar mantenimiento, los operadores requieren una sencilla capacitación, no producen lodos residuales ni ruido, son fábricas de oxígeno que benefician al ambiente, utilizan el bióxido de carbono de la atmósfera, por lo que reducen los efectos del cambio climático, son estéticos, son aprovechados como refugio por la vida silvestre y son amigables con el ambiente.

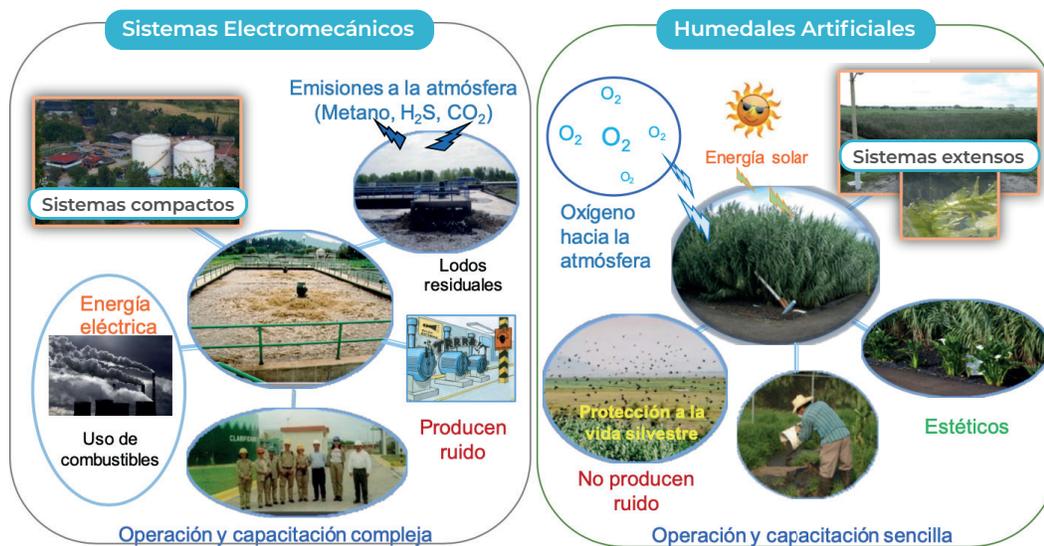


Figura 21. Ventajas y desventajas entre los sistemas electromecánicos y los humedales artificiales.

### 3.9 ¿Cómo se diseña un humedal artificial?

Antes de diseñar un humedal artificial es necesario reunir información relacionada con la cantidad y calidad del agua, el sitio donde se instalará, calcular el área que se necesitará, qué plantas se utilizarán, cuáles serán los costos de construcción, cuáles son los materiales disponibles en la zona, cuál será el uso que se le dará al agua tratada, así como otra información que se detalla en la siguiente sección.

### 3.10 ¿Qué información se necesita para diseñar un humedal?

- Población actual y población proyectada.
- Se debe determinar para cuántas personas se diseñará el humedal, ya que cada persona requiere de un área específica para realizar el tratamiento del agua. También es necesario conocer si se tiene planeado que incrementen la cantidad de personas (alumnos, maestros, personal administrativo, limpieza, mantenimiento, visitas, etc.) que generarán agua residual.

- Caudal actual y caudal de población futura.
- Una vez definida la cantidad de personas, y considerando un consumo por persona, se puede estimar la cantidad de agua residual que se generará.
- Temperatura promedio del mes más frío de la zona donde se implementará el humedal artificial. Para darse una idea de la importancia de la temperatura en el tratamiento del agua residual mediante sistemas biológicos se tiene que por cada 10 grados centígrados que disminuya la temperatura la eficiencia de remoción de contaminantes se reduce en un 50%. Es la razón por la que en zonas frías se requiere una mayor área de tratamiento.
- Sustancias tóxicas. Es necesario identificar la existencia de sustancias que pudieran tener efectos tóxicos sobre los microorganismos y en las plantas del humedal, como pueden ser solventes, detergentes, desinfectantes o sustancias de desecho generadas en los laboratorios, en caso de existir estos en la escuela.
- Disponibilidad de terreno. Como más adelante se verá en el ejercicio de diseño, se requieren entre 0.7 y 1.2 metros cuadrados por usuario, dependiendo de la temperatura del agua.
- Tipos de plantas existentes en la región (especies vegetales conocidas como macrófitas), que puedan utilizarse en los humedales (por ejemplo: tule, carrizo, papiro, alcatraz, etc.). Es importante que las especies vegetales se encuentren en la región, ya que presentan la ventaja de estar adaptadas al clima, al suelo y a las condiciones hídricas (del agua). Es muy importante evitar introducir especies invasoras que pudieran dañar o afectar a la vegetación existente.
- Identificación de un banco de grava o del medio filtrante a ser utilizado. Como se verá más adelante, se pueden utilizar diferentes materiales como medio filtrante, como pueden ser grava, tezontle, trozos de carrizo, bambú, o bien viruta de madera.
- Tipo de suelo. El suelo en el sitio donde se construirá el humedal puede ser arcilloso, arenoso o pedregoso. Es importante conocer sus características, con el objeto de determinar si se puede utilizar para la construcción de los bordos, o si será necesario mezclarlo con suelo proveniente de otras áreas.
- Accesibilidad al área donde se planea construir el humedal. Existen experiencias en las que se han presentado dificultades para llevar los materiales de construcción hasta el sitio donde se ubicará el humedal, por lo que es necesario determinar qué tipos de vehículos o maquinaria podrán ingresar, o bien qué medidas se deben tomar para resolver el problema.
- Porcentaje de cobertura y edad del sistema de alcantarillado. Es necesario conocer cuál es el porcentaje de cobertura real de alcantarillado, ya que es común que no todas las descargas de aguas residuales generadas en las casas, escuelas, etc. estén conectadas al drenaje. También es importante conocer si está proyectado el aumento de agua residual, ya sea por el incremento del número de habitantes o porque se incremente la cobertura de alcantarillado.
- Distancia entre el punto donde se ubica el último registro de la localidad y el sitio asignado para el humedal y tipo de suelo por donde se conducirán las aguas residuales (rocoso, arenoso, arcilloso).
- Identificar si existen terrenos de cultivo, cuyo riego, o cualquier otra fuente de agua (superficial o subterránea) pudiera infiltrarse durante la conducción y afectar la calidad del agua.
- También es importante conocer la edad del sistema de alcantarillado, ya que, en ocasiones, cuando este es demasiado viejo, podría presentar fugas del agua residual, lo que afectaría llevando una menor cantidad de agua hasta el sitio de tratamiento, además de contaminar el manto freático
- Existencia de un tratamiento. Existen casos en los que ya está construido en el sitio donde se instalará el humedal artificial algún tipo de tratamiento de agua residual, ya sea un tanque séptico, una trampa de grasas o algún tipo de pretratamiento, que pudieran aprovecharse formando parte del diseño.
- Calidad del agua residual: DBO, SST, nitrógeno total, fósforo total, coliformes fecales. Estos estudios los realizan laboratorios especializados en esta materia. Cabe señalar que las características de calidad del agua requeridas para el diseño del humedal artificial mostrado en este manual ya fueron estimadas y utilizadas en el ejercicio de diseño que se muestra más adelante, es decir, de manera alternativa, se pueden estimar los valores d estos parámetros de diseño
- Calidad del agua tratada (descarga a cuerpo receptor, tipo de reúso, por ejemplo, riego, acuicultura, etc.). El objetivo de tratamiento utilizado en este manual es para riego de áreas verdes.
- Disponibilidad y costos de materiales de impermeabilización (geomembranas, arcilla, concreto, aditivos, etc.).
- Disponibilidad y costos del medio filtrante (grava, tezontle, materiales orgánicos, etc.).

- Costos de la topografía. Es de suma importancia conocer la nivelación del terreno para poder determinar con precisión cómo van a estar ubicadas las unidades de tratamiento, qué volumen de tierra deberá ser removido durante la excavación, y si es necesario que el humedal se construya por debajo del nivel del suelo o bien sobre su superficie.
- Servicios y costos de laboratorio para efectuar estudios de mecánica de suelos.

Parecen ser muchas las preguntas, sin embargo, la mayoría de esta información es necesaria para efectuar el diseño y para la obtención de costos.

### 3.11 Cómo seleccionar el sitio

El espacio que se destinará para la instalación del humedal artificial deberá preferentemente reunir las siguientes características:

1. Ubicarse lo más lejos posible del área donde transiten las personas, especialmente de las áreas asignadas para deportes, con el fin de proteger las especies vegetales.
2. Establecerse en la parte más baja del terreno de la escuela. El propósito es que el agua residual fluya por gravedad, desde donde se origina hasta el humedal. Esto presentará la ventaja de evitar sistemas de bombeo y gastos por energía eléctrica. En caso de requerir equipo de bombeo se recomienda tener al menos dos bombas, lo que será de gran utilidad cuando se requieran reparaciones.
3. Evitar áreas inundables. Tanto durante la construcción como durante la operación y mantenimiento es muy conveniente que no se inunde el área asignada para el humedal.
4. Dejar libre un área para la construcción de un nuevo módulo de humedal artificial, en el caso de tener contemplado el crecimiento de los usuarios, ya sea por la construcción de más aulas o por la integración de un nuevo turno. No es recomendable proyectar diseños para un futuro con grandes crecimientos de la población de usuarios, es más conveniente dimensionar o modular para circunstancias actuales, o quizás con un poco más de población.
5. Deben definirse con claridad las rutas de acceso, ya sea durante la construcción o durante la operación y mantenimiento.
6. Siempre es de gran utilidad conocer las coordenadas, las que pueden obtenerse mediante Google Earth, que es una herramienta disponible en Internet. Igualmente, es importante tener fotografías o video del sitio.





## 4. Diseño del sistema

Veremos ahora cómo se calcula el área de las unidades de tratamiento que conforman el sistema, el cual está integrado por pretratamiento (rejillas y desarenador), tanque séptico, humedal de lodos, humedal de flujo subsuperficial vertical, humedal de flujo subsuperficial horizontal y un tanque de cloración.

Es importante señalar que se ha estimado que la cantidad de agua residual que genera cada persona o usuario es de 25 litros por día.

### 4.1 Cómo calcular el área de tratamiento

Para conocer el área que requiere cada una de las unidades de tratamiento solamente se necesita conocer el número de usuarios que forman parte de la escuela, la temperatura promedio del agua durante el mes más frío en la región y el valor índice que se muestra en la tabla 1.

Cabe señalar que durante el periodo de vacaciones hay menos personas; sin embargo, esto no afectará el funcionamiento del humedal, dado que durante estos periodos hay presencia de lluvias y los nutrientes retenidos en el humedal son suficientes para el desarrollo de las plantas.

Veamos un ejemplo de cómo diseñar un humedal. La escuela utilizada para este ejercicio se ubica en un sitio donde la temperatura promedio del mes más frío es de 7 grados centígrados (°C) y asisten regularmente 100 personas (usuarios), incluidos alumnos, personal docente, administrativos, personal de limpieza, cooperativa escolar, y un porcentaje para visitas.

Usualmente, la temperatura del agua de los humedales tiene aproximadamente 3 °C más que la temperatura ambiente, de hecho, los microorganismos que intervienen en la purificación viven dentro del agua, de tal modo que sumaremos 3 a los 7 °C ya citados, por lo que la temperatura de diseño será de 10°C.

En la tabla 1 se muestra el valor índice por usuario, necesario para calcular el área de cada una de las unidades de tratamiento, para diferentes grados de temperatura, entre 4 y 25°C. Para obtener el valor índice, como previamente se citó, se estimó un consumo de 25 litros por usuario por día.

**Tabla 1.** Valor índice por usuario para dimensionar las unidades de tratamiento y el área del sistema, con base en la temperatura del agua.

Unidad de tratamiento	Temperatura del agua, °C										
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Tanque séptico	0.0313	0.0313	0.0313	0.0313	0.0313	0.0313	<b>0.0313</b>	0.0313	0.0313	0.0313	0.0313
Humedal de lodos	0.0814	0.0814	0.0814	0.0814	0.0814	0.0814	0.0814	0.0814	0.0814	0.0814	0.0814
Humedal de flujo vertical	0.3422	0.3422	0.3422	0.3422	0.3422	0.3422	0.3422	0.3422	0.3422	0.3422	0.3422
Humedal de flujo horizontal	0.7927	0.7478	0.7055	0.6656	0.6279	0.5924	0.5588	0.5272	0.4974	0.4692	0.4426
Área del sistema por usuario	1.2475	1.2026	1.1603	1.1204	1.0827	1.0472	<b>1.0136</b>	0.9820	0.9522	0.9240	0.8974

Unidad de tratamiento	Temperatura del agua, °C										
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Tanque séptico	0.0313	0.0313	0.0313	0.0313	0.0313	0.0313	<b>0.0313</b>	0.0313	0.0313	0.0313	0.0313
Humedal de lodos	0.0814	0.0814	0.0814	0.0814	0.0814	0.0814	0.0814	0.0814	0.0814	0.0814	0.0814
Humedal de flujo vertical	0.3422	0.3422	0.3422	0.3422	0.3422	0.3422	0.3422	0.3422	0.3422	0.3422	0.3422
Humedal de flujo horizontal	0.4176	0.3939	0.3717	0.3506	0.3308	0.3120	0.2944	0.2777	0.2620	0.2472	0.2332
Área del sistema por usuario	0.8724	0.8488	0.8265	0.8054	0.7856	0.7669	<b>0.7492</b>	0.7325	0.7168	0.7020	0.6880

El cálculo es muy sencillo:

1. Dado que la temperatura de diseño es de 10 °C, localizamos en la Tabla 1 la columna que indica 10 grados.
2. Ubicamos el valor índice de la unidad de tratamiento. Para el tanque séptico, siguiendo el renglón hasta donde coincide con la columna de 10 °C, el valor es de 0.0313 (se observa en negritas en la Tabla 1).
3. Multiplicamos el número de usuarios (100) por el valor índice (0.0313) por lo que el área del tanque séptico será de 3.13 metros cuadrados (m<sup>2</sup>).

Se sigue el mismo procedimiento para el cálculo de las cuatro unidades de tratamiento, cuyos resultados son los siguientes:

- Tanque séptico: 100 usuarios x 0.0313 = 3.13 m<sup>2</sup>.
- Humedal de lodos: 100 x 0.0814 = 8.14 m<sup>2</sup>.
- Humedal de flujo subsuperficial vertical: 100 x 0.3422 = 34.22 m<sup>2</sup>.
- Humedal de flujo subsuperficial horizontal: 100 x 0.5588 = 55.88 m<sup>2</sup>.

Sumando todas las áreas (3.13 + 8.14 + 34.22 + 55.88) obtenemos el área del sistema, que es de 101.36 m<sup>2</sup>.

Otra manera de calcular el área requerida para todo el sistema de tratamiento consiste en multiplicar el área del sistema por usuario (1.0136, caracteres en negritas), en la parte inferior de la columna de diseño de la tabla 1, por el número de usuarios. De tal modo que al multiplicar 1.0136 x 100 se requiere de un área de 101.36 m<sup>2</sup> para la instalación de este humedal artificial

En resumen, para una población de 100 usuarios y una temperatura mínima promedio del agua de 10 °C se requiere de un área de tratamiento de 101.36 m<sup>2</sup>.

Para esta temperatura es prácticamente 1.0 m<sup>2</sup> por persona.

En el anexo A se muestran las áreas requeridas para la instalación de humedales artificiales para diferentes tamaños de población y diferentes temperaturas de diseño. El tren de tratamiento es el mismo utilizado en el ejercicio anterior (cuatro unidades de tratamiento), las poblaciones de diseño son: 25, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450 y 500 usuarios. Las temperaturas de diseño son: 5.0, 7.5, 10.0, 12.5, 15.0, 17.5, 20.0, 22.5 y 25.0 °C.

Estas tablas permiten conocer con facilidad el área requerida de tratamiento para los casos ahí existentes, aunque para valores del número de usuarios o de temperaturas de diseño diferentes debe calcularse el área siguiendo los pasos del ejercicio previamente realizado.

Recordemos que también se requiere de un sistema de desinfección, tema que se abordará en la sección de construcción del humedal artificial.

#### 4.2 ¿Qué forma geométrica tendrán las unidades de tratamiento?

Cada una de las unidades de tratamiento podrían ser cuadradas; sin embargo, la forma de estas dependerá de las características del terreno, ya que en algunos casos tendrían que ser rectangulares.

Cuando la forma de los estanques es cuadrada, para obtener el largo y el ancho sacamos la raíz cuadrada ( $\sqrt{\quad}$ ) del área de cada unidad de tratamiento.

Recordemos que la raíz cuadrada es el resultado de multiplicar un número una vez por sí mismo.

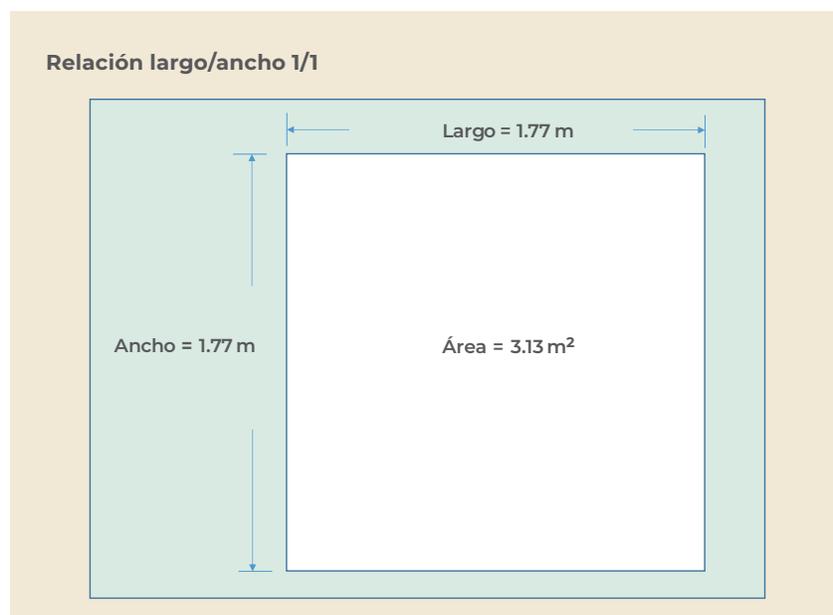
Por citar un ejemplo, y utilizando una calculadora, puede ser la del celular, para obtener la raíz cuadrada de 9 seleccionamos el símbolo  $\sqrt{\quad}$ , en seguida elegimos el número 9 y el resultado es 3, ya que al multiplicar  $3 \times 3$  es igual a 9.

La raíz cuadrada de las áreas previamente calculadas son las siguientes:

- Tanque séptico:  $\sqrt{3.13} = 1.77$  metros (m). Es decir, para una unidad de tratamiento de forma cuadrada, tanto el lado largo, como el lado ancho tendrán una longitud de 1.77 m.
- Humedal de lodos:  $\sqrt{8.14} = 2.85$  m.
- Humedal de flujo subsuperficial vertical:  $\sqrt{34.22} = 5.84$  m.
- Humedal de flujo subsuperficial horizontal:  $\sqrt{55.88 \text{ m}^2} = 7.48$  m.

Es importante señalar que debido a la cantidad de decimales utilizados puede haber una ligera diferencia en los resultados, por ejemplo, revisando el área del tanque séptico, al multiplicar  $1.77 \times 1.77$  el resultado es 3.1329, el cual es ligeramente diferente del valor 3.13 (con dos decimales) antes citado.

La forma del tanque séptico, si su geometría fuera cuadrada, sería la siguiente (figura 22):



**Figura 22.** Medidas y forma cuadrada (relación largo/ancho de 1/1) del tanque séptico del ejercicio.

En estanques con forma rectangular se debe decidir la relación largo/ancho. Por ejemplo, si se desea que el lado largo del tanque séptico sea dos veces mayor que el lado ancho, su relación largo/ancho será de 2/1. Para obtener el largo se multiplica el área del tanque séptico, que es de  $3.13 \text{ m}^2$  por el largo, que es 2, y se saca su raíz cuadrada ( $\sqrt{\quad}$ ).

Efectuando las operaciones:  $3.13 \times 2 = 6.26$

$$\sqrt{6.26} = 2.50 \text{ m}$$

Es decir, que el largo será de 2.50 m

Para obtener el ancho se divide el área ( $3.13 \text{ m}^2$ ) entre el largo ( $2.5 \text{ m}$ ) da como resultado  $1.25 \text{ m}$

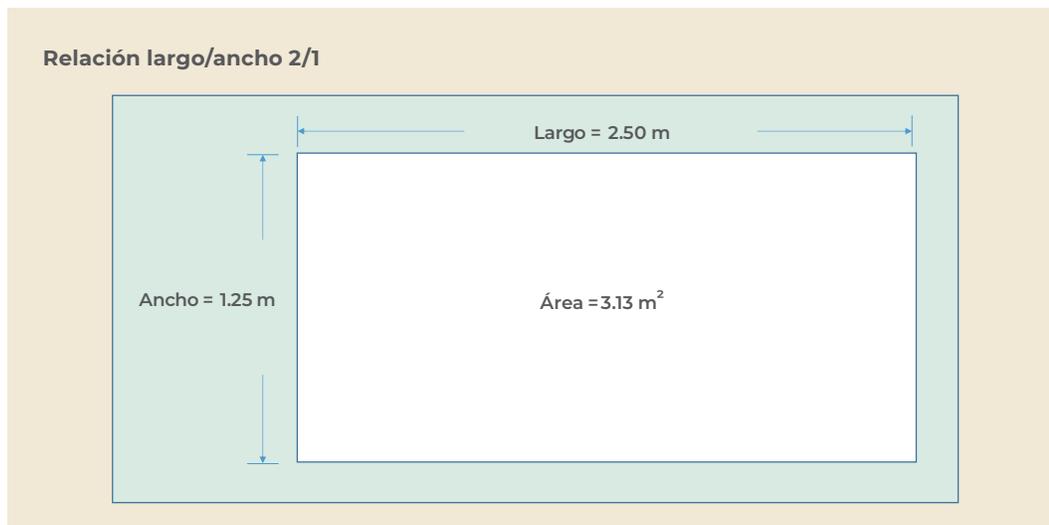
La operación es la siguiente:  $3.13/2.50 = 1.25 \text{ m}$

Para comprobar el área se multiplica el ancho por el largo

$$2.50 \text{ m} \times 1.25 \text{ m} = 3.13 \text{ m}^2$$

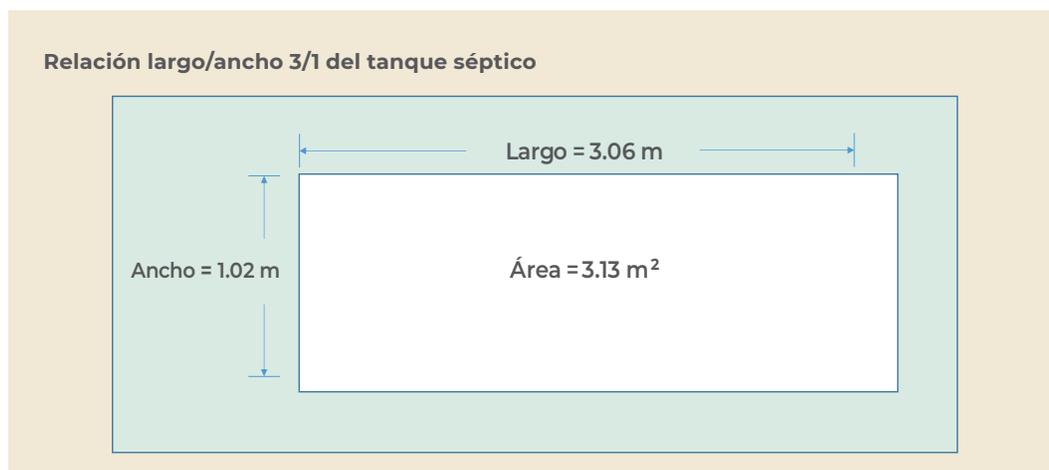
En resumen, el tanque séptico tendrá  $2.50 \text{ m}$  de largo,  $1.25 \text{ m}$  de ancho y un área total de  $3.13 \text{ m}^2$

Visto en planta, es decir, desde arriba, se tendría una figura de la siguiente forma (figura 23).



**Figura 23.** Medidas y forma rectangular del tanque séptico de este ejercicio. Relación largo/ancho 2/1.

En la figura 24 se muestra la forma rectangular del tanque séptico para una relación largo/ancho de 3/1.



**Figura 24.** Medidas y forma rectangular del tanque séptico, para una relación largo/ancho de 3/1.

Para el cálculo de las otras unidades de tratamiento se sigue el mismo procedimiento.

En el caso del humedal de flujo subsuperficial horizontal, con una relación largo/ancho de 3/1, se obtienen los siguientes resultados:

Área = 55.88 m<sup>2</sup>

Relación largo/ancho de 3/1

Multiplicando  $55.88 \times 3 = 167.65$

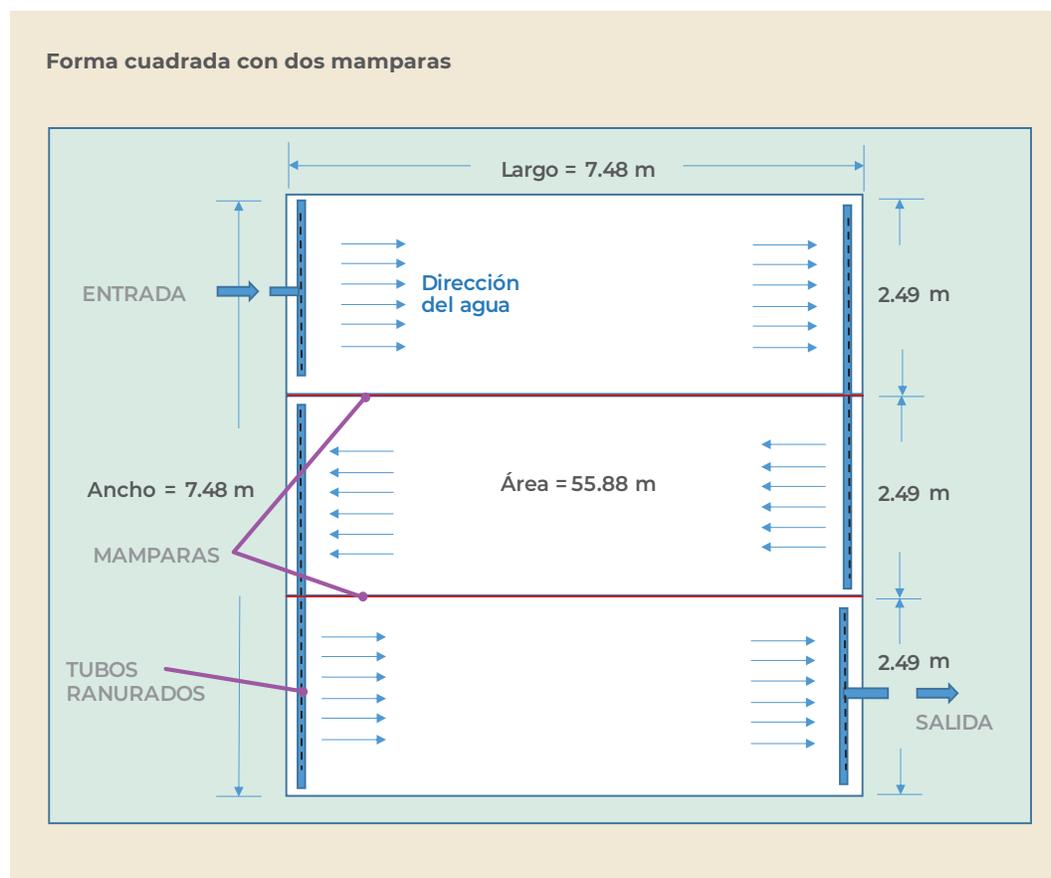
Largo:  $\sqrt{167.65} = 12.95$  m

Ancho:  $55.88 \text{ m}^2 / 12.95 \text{ m} = 4.32$  m

Comprobando el área:  $12.95 \text{ m} \times 4.32 \text{ m} = 55.88 \text{ m}^2$

Por tanto, el humedal de flujo subsuperficial tendrá 12.95 m de largo, 4.32 m de ancho y un área de 55.88 m<sup>2</sup>.

En caso del humedal de flujo subsuperficial horizontal, si el espacio del terreno sólo permite una forma cuadrada, es decir, con relación largo/ancho de 1/1, pero conociendo que las formas rectangulares de esta variante de humedales producen mayor eficiencia de eliminación de contaminantes, se tendría el siguiente diseño utilizando mamparas (figura 25).



**Figura 25.** Diseño de un humedal de flujo subsuperficial horizontal de forma cuadrada con el uso de mamparas.

### 4.3 ¿Cómo se selecciona la temperatura para el cálculo del área de tratamiento?

En México se reconocen seis zonas térmicas o variantes de clima:

1. Muy cálida, con una temperatura media mayor de 26 °C
2. Cálida, con temperatura media de 22 a 26 °C
3. Semicálida, con temperatura media de 18 a 22 °C
4. Templada, con temperatura media de 12 a 18 °C
5. Semifría, con una temperatura media de 5 a 12 °C
6. Fría y muy fría, con temperatura media menor de 5 °C

En el anexo B se muestra la temperatura mínima promedio por entidad federativa y nacional 2019. También es importante saber que en cada estado hay diferentes tipos de clima, por ejemplo, en el estado de Morelos las variantes de clima se clasifican desde cálido hasta semifrío.

En Internet se puede consultar la temperatura específica para cada sitio.

### 4.4 ¿Qué es el humedal de lodos y por qué se incluye?

Recordemos que en nuestro tren de tratamiento está incluido un humedal de lodos. Es de la variante de flujo subsuperficial vertical y tiene como función tratar los sólidos, o lodos generados en el tanque séptico. Se recomienda enviar a este humedal la mitad de lodos acumulados en el fondo del tanque séptico cada seis meses.

Si no se deseara construir el humedal de lodos, se tendría que utilizar un servicio de extracción de sólidos del tanque séptico mediante tanques pipa, los que a su vez tendrían que disponer de los sólidos en una planta de tratamiento electromecánica o en un sitio donde no contaminen el agua freática.



## 5. Construcción del sistema

Se indicará ahora qué herramientas y equipos se requieren para la construcción del sistema de tratamiento mediante humedales artificiales y se abordarán las etapas de la instalación.

### 5.1 Materiales y herramientas

Los materiales y herramientas necesarios para la construcción del humedal dependen en gran medida del tamaño del sistema y del sitio donde se construirá, por ejemplo, si el suelo está compuesto solamente de tierra o si el terreno es pedregoso.

En humedales pequeños se utilizan picos, palas, carretillas, machetes, flexómetro, hilo, estacas, cincel, martillo y pinzas. En sistemas de mayor tamaño se requiere también de equipos o máquinas de excavación (figura 26).

Claro está que para trasladar los materiales de construcción se requieren vehículos específicamente diseñados para este fin, como los carros de volteo.



Figura 26. Materiales, herramientas y maquinaria para la construcción.

### 5.2 Etapas de la construcción

En la sección de dimensionamiento se indicó que el tren de tratamiento incluye un pretratamiento (integrado por rejillas y desarenador) y un tanque séptico.

El pretratamiento puede sustituirse por un pequeño canal con rejillas para la limpieza de basuras y la extracción de arenas. En la sección de operación y mantenimiento se muestra una figura con este tema.

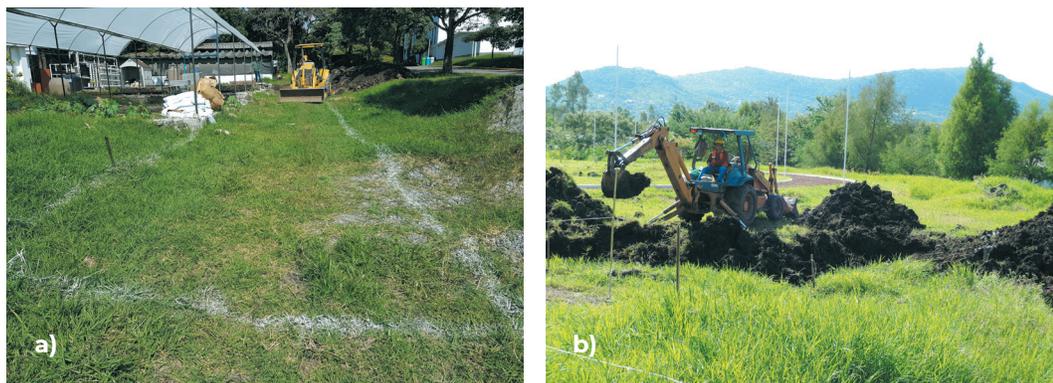
El tanque séptico puede sustituirse por un tanque biodigestor. Existen empresas que los fabrican para diferentes volúmenes, según sea el caso.

Los aspectos constructivos pueden variar, de acuerdo con sus necesidades específicas, sin embargo, las diez etapas principales de la construcción son las siguientes:

#### 5.2.1 Eliminación de cubierta vegetal y trazo del sitio

Primeramente, debe eliminarse la cubierta vegetal del sitio. La vegetación extraída puede utilizarse como composta para fertilizar los jardines o las plantas de la escuela.

Posteriormente se trazan las unidades de tratamiento utilizando cal o algún tipo de hilo clavando algunas estacas (figura 27).



**Figura 27.** Inicio de la construcción. a) Trazo de los estanques, b) eliminación de la cubierta vegetal.

### 5.2.2 Excavación del estanque.

La siguiente acción constructiva consiste en realizar la excavación de los estanques. La profundidad de excavación del humedal de flujo subsuperficial vertical puede variar entre 1.4 y 1.5 metros, mientras que esta puede ser entre 1.0 y 1.1 m en el humedal de flujo subsuperficial horizontal. En la sección de colocación del material filtrante se muestra una explicación más detallada. Cabe señalar que estas son las profundidades de excavación, no así las profundidades de los estanques, los cuales son menos profundos, como se indicará en cada caso.

Se presenta ahora una experiencia de excavación. El terreno seleccionado, mediante un estudio de topografía, se ubicó 50 centímetros por debajo del fondo del registro, desde donde se enviaría el agua residual, por lo que se determinó que el agua fluiría por gravedad, es decir, sin necesidad de bombeo. Previo a la extracción de la tierra se perforó un pozo de 1.5 metros de profundidad para verificar la existencia de rocas en el subsuelo o agua en el manto freático. No apareció una capa de rocas ni agua, por lo que se proyectó que el agua residual llegaría por gravedad, y se procedió al retiro de la tierra. Sin embargo, como se observa en la figura 28, después de los 50 cm de profundidad apareció una capa de roca, cuya extracción incrementaba de manera considerable los costos y el tiempo de construcción, razones por las que se determinó construir el humedal sobre la superficie de terreno, así como la instalación de equipo de bombeo



**Figura 28.** Excavación de los estanques. a) Los primeros centímetros de profundidad. b) Capa de roca.



Se recomienda que la construcción no se realice durante la temporada de lluvias, lo cual puede dificultar de muchas maneras cada una de las etapas del proceso (figura 29). Bajo estas condiciones se dificulta el acceso al sitio; durante la excavación se presenta inundación de los estanques, lo que a su vez requerirá el uso de bombas para vaciarlos; la impermeabilización no se puede realizar bajo condiciones de lluvia; y, además, se incrementan de manera considerable los costos.



**Figura 29.** Problemas de inundación. a) En el estanque. b) En el área seleccionada.

### 5.2.3 Nivelación del fondo del estanque.

Una vez lograda la excavación del estanque se debe realizar la nivelación de su fondo, además de eliminar todo tipo de residuos, como son pequeñas piedras, basuras, ramas, etc. que pudieran dañar la geomembrana que se utiliza para la impermeabilización (figura 30). La nivelación se puede realizar con arenilla o con tierra arcillosa.



**Figura 30.** Nivelación del fondo del estanque: a) con tierra, b) con arenilla

### 5.2.4 Construcción de bordos

Los bordos, dependiendo de cada caso, pueden construirse en muros de piedra, concreto o tabique (cada uno con su respectivo aplanado), así como de una mezcla de tierra con arcilla (figura 31). Cuando se utilice concreto o se realice el aplanado es aconsejable utilizar algún aditivo para sellar los poros y evitar infiltraciones, ya sea del subsuelo o entre los estanques.



**Figura 31.** Formación de los bordos con distintos materiales. a) Muro de piedra. b), c) y e) Muros de concreto. d) Tierra mezclada con arcilla.

### 5.2.5 Impermeabilización de los estanques

La siguiente etapa consiste en la impermeabilización de los estanques (figura 32), la cual puede realizarse con arcilla que tenga características de impermeabilidad, o bien con geomembrana, que es un plástico altamente resistente y que fue especialmente diseñado para este fin.

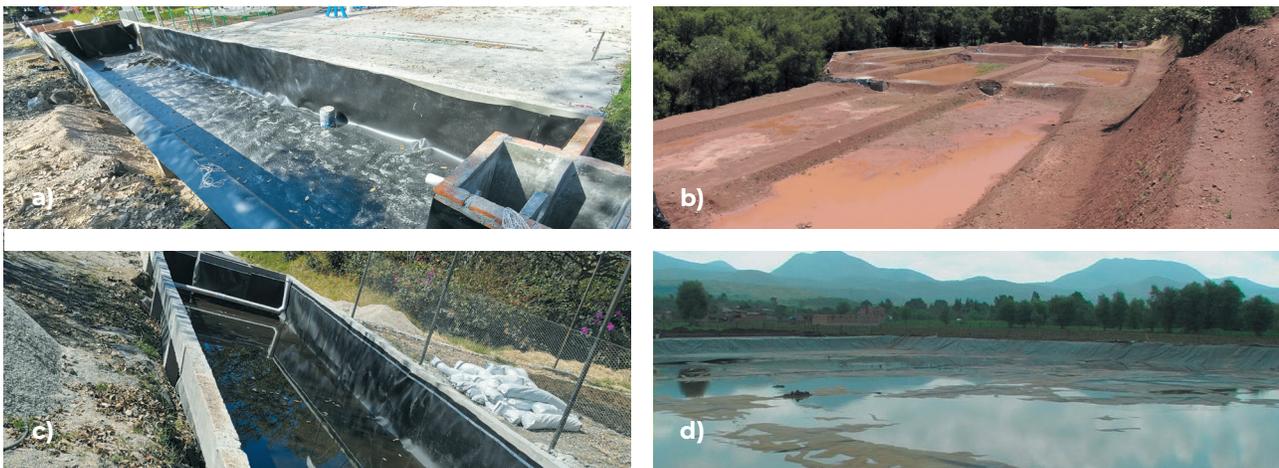
Antes de la colocación de la geomembrana debe hacerse una cuidadosa eliminación de pequeñas piedras o ramas que pudieran dañarla. Existen varias experiencias en las que no se realizó esta acción y como consecuencia se requirieron reparaciones costosas de la geomembrana.

Se aconseja que la impermeabilización con geomembrana preferiblemente sea durante la temporada de

calor, sin lluvias, ya que el material permanece más flexible, lo que facilita su instalación.

El grosor de 1.0 mm es el más conveniente, aunque también puede usarse de 0.75 mm, pero es menos durable y podría romperse con mayor facilidad. Usualmente su periodo de vida útil es cercano a los 20 años. No se recomienda el uso de textiles, que por lo regular se degradan y aportan al humedal residuos que provocan taponamientos.

Es importante cerciorarse de que la impermeabilización se haya efectuado de manera eficiente, para lo cual se requiere hacer una prueba de infiltración, que consiste en introducir una pequeña capa de agua sobre el material impermeable y verificar detalladamente que no existan infiltraciones o fugas (figuras 32 a, c y d).



**Figura 32.** Impermeabilización de los estanques: a) arcilla altamente impermeable, b, c y d) geomembrana.



### 5.2.6 Colocación de capa de arcilla

Es necesario colocar sobre la geomembrana una capa de arcilla de entre 8 y 10 cm, con objeto de evitar que el medio filtrante pueda dañarla (figura 33). Además, esta arcilla interviene en el tratamiento del agua residual, ya que los contaminantes se adhieren a este material, siendo también de esta manera retenidos.



Figura 33. Colocación de la capa de arcilla.

### 5.2.7 Colocación del medio filtrante

Previamente se comentó que pueden utilizarse diferentes materiales como medio filtrante, como pueden ser trozos (entre 20 y 30 cm de longitud) de carrizo, bambú o de pequeñas ramas, así como materiales pétreos, como la grava y el tezontle.

En la figura 34 se muestran los materiales (geomembrana, arenilla, arcilla y grava o tezontle), el grosor de las capas y el tamaño de la granulometría del medio filtrante para un humedal de flujo subsuperficial horizontal.

Sumando las tres capas de 20 cm se tiene una profundidad de 60 cm; sin embargo, es necesario sumar 10 cm más para la nivelación del terreno, 10 cm para colocación de una capa de arcilla y 20 o 30 cm de bordo libre, por lo que la profundidad total variará entre 100 y 110 cm de altura, que es la profundidad de excavación.

Se aconseja poner una capa adicional de materiales orgánicos duraderos (trozos de carrizo, viruta de madera) sobre la superficie de los humedales en regiones donde haga mucho frío. Esta capa puede ser de aproximadamente 10 cm, y servirá como protección térmica. Estos materiales suelen durar varios años. De igual modo, puede sustituirse la grava o tezontle de la capa superficial por estos materiales orgánicos.

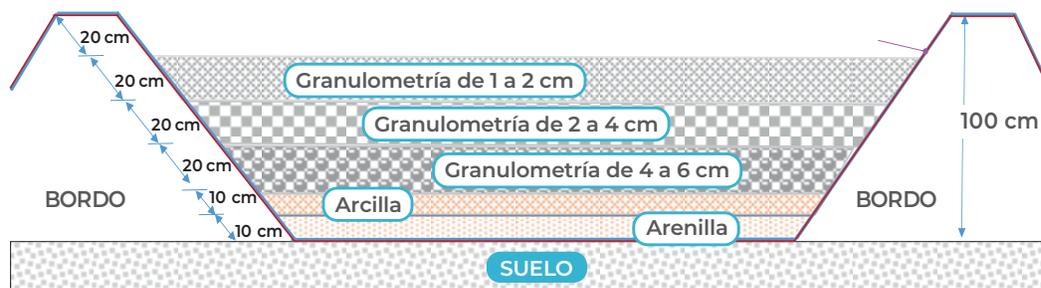


Figura 34. Arreglo de las capas del medio filtrante en el humedal de flujo subsuperficial horizontal.

En la figura 35a se muestran las tres granulometrías del medio filtrante (tezontle en este caso). En la figura 35b se observa en la superficie del humedal la granulometría de menor tamaño (1.0 a 2.0 cm).



**Figura 35.** Colocación de las capas del medio filtrante: a) vista de tres capas, b) capa de la superficie.

En la figura 36 se muestra el arreglo del medio filtrante del humedal de flujo subsuperficial vertical. El medio filtrante puede consistir en trozos de carrizo o de bambú de 20 a 30 cm de longitud, relleno hasta un metro de profundidad y dejando 20 o 30 cm de bordo libre, para evitar derramamientos de agua.

En caso de no disponer de suficiente material orgánico (carrizo o bambú) se puede utilizar la granulometría indicada para el humedal de flujo subsuperficial horizontal, aunque cabe recordar que el medio filtrante de tipo orgánico presenta un ambiente más adecuado para el desarrollo de los microorganismos purificadores del agua.



**Figura 36.** Materiales de relleno dentro del humedal de flujo subsuperficial vertical.

### 5.2.8 Instalación de tuberías y estructuras de control de caudal

La siguiente acción consiste en la instalación del sistema de tuberías. Se recomienda utilizar tubería de PVC hidráulico, ya que es más resistente. Su diámetro es de 4 pulgadas, para facilitar su limpieza y evitar taponamientos.

Es necesario ranurar las tuberías, ya sean de distribución o bien de recolección del agua. Las ranuras deben realizarse en ambos lados del tubo, con ranuras de 10 cm de longitud y 1 cm de ancho. La distancia entre ranuras puede realizarse a cada 20 cm (figura 37).

Es más sencillo hacer perforaciones que hacer hendiduras en los tubos, sin embargo, no se recomiendan las perforaciones, ya que suelen taparse con mucha facilidad, aun las menores de 1.5 pulgadas de diámetro.



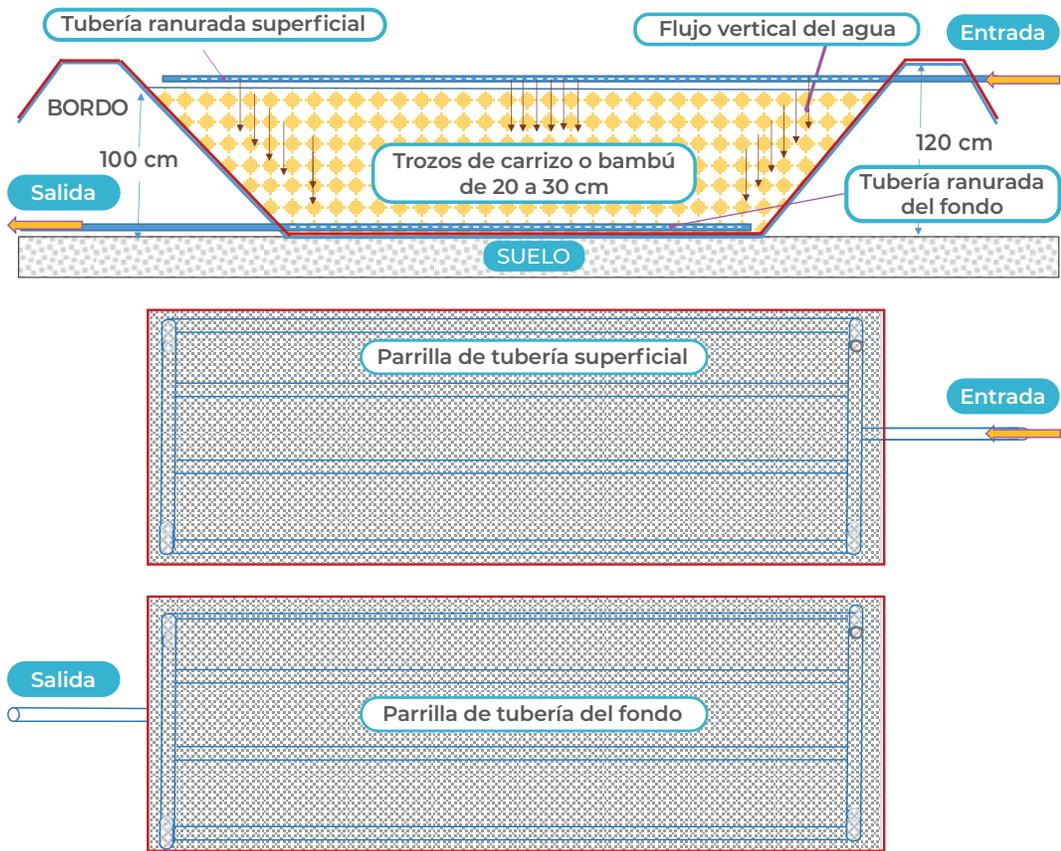
**Figura 37.** *Detalle del ranurado de las tuberías.*

Las tuberías del humedal de flujo subsuperficial vertical se muestran en las figuras 38 y 39. La parrilla de tuberías de la alimentación (entrada o influente) se coloca sobre la superficie del medio filtrante. La parrilla de captación se instala en el fondo del humedal artificial.

Esta parrilla del fondo puede sustituirse por la instalación de un solo tubo de salida, aunque es preferible instalar la parrilla, ya que contribuye a controlar la dirección del flujo del agua y, en consecuencia, se obtiene una mejor eficiencia.

El diámetro de la tubería que conforma la parrilla superficial puede ser de 2.5 pulgadas, mientras que en la parrilla del fondo debe de ser de 4 pulgadas, para facilitar su limpieza y evitar taponamientos.

Se utilizan codos a 90 grados para unir las tuberías de las parrillas, así como tees, ya sea en el tubo de entrada o en el de salida.

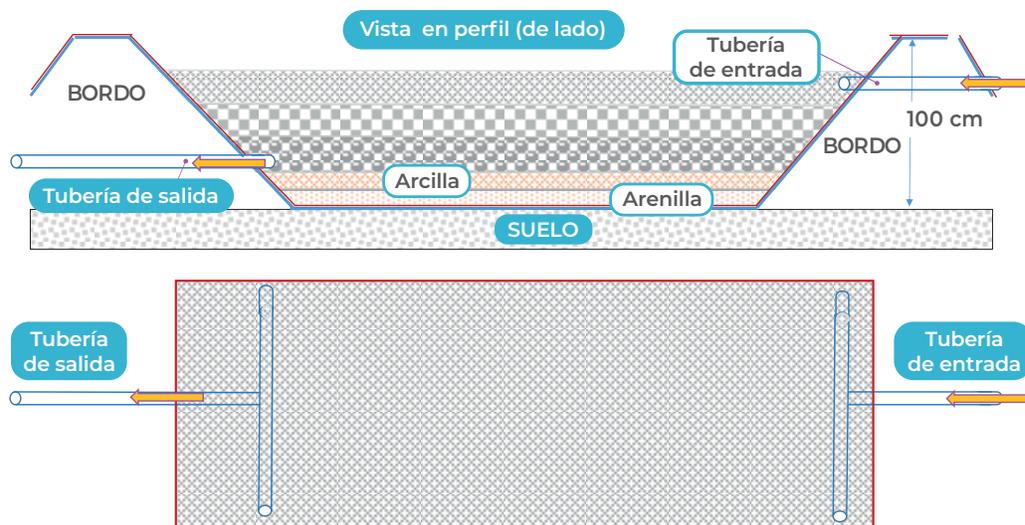


**Figura 38.** Ubicación y arreglo de las tuberías en el humedal de flujo subsuperficial vertical.



**Figura 39.** Instalación de la parrilla de tubería en la superficie de un humedal de flujo subsuperficial vertical.

Respecto al humedal de flujo subsuperficial horizontal, la tubería de entrada se coloca ligeramente por debajo de la superficie, mientras que la tubería del fondo se coloca unos centímetros arriba del nivel de la capa de arcilla, como se muestra en la vista en perfil de la figura 40.



**Figura 40.** Ubicación de las tuberías de entrada y salida en el humedal de flujo subsuperficial horizontal.

En la figura 41 se muestran distintas vistas de las tuberías en diferentes partes del humedal: a) en la caja de entrada, b) en la salida, al fondo del estanque y c) en la interconexión entre dos estanques. En este último caso se muestra que el tubo pasa a través de la pared de concreto y se colocan tubos verticales en los extremos para realizar la limpieza. Los tubos verticales se unen mediante dos codos de 45 grados, ya que un codo de 90 grados dificultaría la limpieza.

Se observan en la figura 41c algunos tubos verticales, con diámetro de 6 pulgadas, colocados al centro del humedal. Se utilizan para la extracción de muestras de agua. De este modo



**Figura 41.** Instalación de tuberías en el humedal de flujo subsuperficial horizontal: a) ingreso a la caja de entrada, b) tubo de salida en el fondo del estanque, c) tubo de interconexión entre dos estanques contiguos.

se evita enturbiar el agua, si se tuviera que excavar el medio filtrante. Debe colocarse una tapa en la entrada de estos tubos, la cual puede ser de tela mosquitera o bien, tapas de coladeras. Esto evitará que ingresen y se dañen animales de la vida silvestre.

Otro aspecto importante consiste en la construcción de las cajas o registros para el paso del agua y para el control de niveles. En la figura 42 se muestra un detalle de estas estructuras.



**Figura 42.** Caja de paso con vertedor triangular.

Se observa en funcionamiento un vertedor en forma de “V”, que se utiliza para distribución y medición de pequeños caudales. En el compartimento donde vierte el agua se presenta el tubo alternativo de salida, conectado mediante un codo de 90 grados al tubo proveniente del compartimento previo. El codo no fue pegado al tubo de salida, presenta un empaque para sellar y asegurar que el agua no se infiltre en esa zona y puede girarse para variar el nivel del agua. Se usa cuando se desea vaciar el estanque, ya que el vertedor de acero permanece fijo.

Este codo puede ser sustituido por una manguera flexible, del tipo que utilizan los bomberos. Primeramente, se coloca un tornillo inoxidable sobre la parte alta de la pared del registro, posteriormente se unen el extremo de la manguera y el tornillo. La manguera flexible se fija al tubo de PVC mediante una abrazadera inoxidable. El nivel del agua se puede controlar subiendo o bajando la altura o nivel de la manguera.

Tuberías para el vaciado del agua. Es necesario dejar instalada tubería, con sus respectivas válvulas, en cada uno de los estanques, para vaciar el agua cuando se requiera hacer mantenimiento, como se muestra en la figura 44b.

### 5.2.9 Siembra de especies vegetales

Como se citó anteriormente, deben utilizarse preferentemente las especies vegetales existentes en la región, ya que además de estar adaptadas al ambiente local pueden obtenerse a un menor costo. Las plantas pueden obtenerse de ríos o lagos cercanos, o bien ser adquiridas en viveros.

Deben extraerse de preferencia con todo y tierra para evitar que el aire desequie las raíces, lo que podría ocasionar su debilitamiento, e incluso su muerte. La tierra debe eliminarse introduciendo las raíces en un contenedor con agua, justo antes de la siembra.

Las raíces deben permanecer húmedas durante el traslado. Antes de realizar la siembra deben llenarse los estanques aproximadamente a unos 30 cm por debajo de la superficie,



con el propósito de que las plantas se introduzcan en un medio acuoso inmediatamente después de haber sido extraídas de su medio natural.

Se recomienda que el llenado se efectúe por bombeo cuando el agua pueda enviarse desde un manantial, río o lago cercanos, de no ser así, el agua residual puede introducirse poco a poco para evitar se generen malos olores durante el llenado. También funciona mezclar agua de los dos tipos mencionados.

Igualmente importante es dejar listos los pozos para la siembra, como se muestra en la figura 43, de tal modo que una persona sostiene la planta dentro del pozo y otra persona la cubre con el medio filtrante. Las plantas pueden sembrarse entre 0.5 y 1.0 m de distancia.

Entre más cercanos se siembren se desarrollará una mayor densidad de plantas y se obtendrán mejores eficiencias de remoción de contaminantes en tiempos más cortos.



**Figura 43.** Siembra de especies vegetales.

En la sección de especies vegetales se citaron siete diferentes plantas para utilizarse en los humedales artificiales. Sin embargo, no todas las especies transfieren el oxígeno a la misma velocidad, ni resisten las mismas condiciones de calidad del agua, por lo que se recomienda utilizar el carrizo en los estanques iniciales, aunque también se pueden utilizar el tule y el papiro. Las especies de ornato, como el alcatraz y el ave del paraíso pueden aprovecharse en el estanque final, aunque también se pueden colocar en la periferia de los estanques iniciales, con el fin de mejorar la estética.

En el Anexo C se presenta una lista con varias especies utilizadas en diversos humedales artificiales en México.

Un principio biológico es que, a mayor biodiversidad, se desarrollan mejores condiciones de competencia, lo que beneficia en incrementar la eficiencia de remoción de contaminantes, razón por la cual se recomienda colocar dentro de los humedales diferentes especies. Solamente que, por la competencia, las más fuertes tenderán a eliminar a las de menor tamaño, lo que se puede controlar mediante las podas, extrayendo algunas de las plantas que estén ganando mayor espacio.

### 5.2.10 Desinfección del agua tratada

Aunque los humedales artificiales presentan altos niveles de remoción de bacterias, virus y otros microorganismos causantes de enfermedades, es necesario incluir dentro del tren de tratamiento un sistema de desinfección. Usualmente se diseñan y construyen tanques de contacto

con cloro, también conocidas como cámaras de cloración, dentro de las cuales, al inicio del canal, se agregan pastillas de hipoclorito de calcio. El tiempo de contacto recomendado es de entre 20 y 30 minutos.

Como referencia, una concentración de 10 ppm (partes por millón) de cloro con un tiempo de contacto de 15 minutos permite un efluente con una cantidad menor de bacterias coliformes a la señalada en la norma. También se puede construir una pileta o adquirir un tinaco de agua. Algunas empresas lo ofrecen desde 40 hasta 1 000 litros. Las pastillas de hipoclorito pueden variar en el tiempo de su total dilución. Se recomienda introducir una pastilla por semana y vigilar que siempre haya una visible.

### 5.2.11 Inicio de operaciones o puesta en marcha del sistema

Una vez construido el sistema de tratamiento, debe iniciar su operación, para lo cual se requiere hacer fluir el agua residual. El tiempo de estabilización o maduración del humedal artificial dependerá en gran medida de la calidad y cantidad del agua a tratar, de la temperatura en la zona, de la presencia de sustancias tóxicas y de la correcta operación y mantenimiento que se le dé.

Este tiempo de aclimatación puede variar entre 6 y 10 meses. Durante los primeros meses la vegetación tiene un aspecto como si estuviera dañada, pareciera que las plantas se están secando; sin embargo, es necesario esperar para que tanto los microorganismos, como las especies vegetales, se adapten y comiencen a reproducirse bajo las nuevas condiciones que se tienen en el agua residual.

Las plantas que se verán mayormente afectadas son las que se ubican en las etapas finales del tratamiento.

### 5.2.12 Control de niveles

En la figura 44a se muestra una caja de salida con un vertedor en “V” fijo. Este vertedor determina el nivel del agua dentro del estanque, ya que permanece fijo, y por lo tanto no se puede variar el nivel del agua. Para resolver este problema se recomienda instalar un tubo o manguera alterno para control del nivel, como fue citado en la figura 42. Otra manera de controlar el nivel del agua consiste en utilizar las válvulas de vaciado (figura 44b).

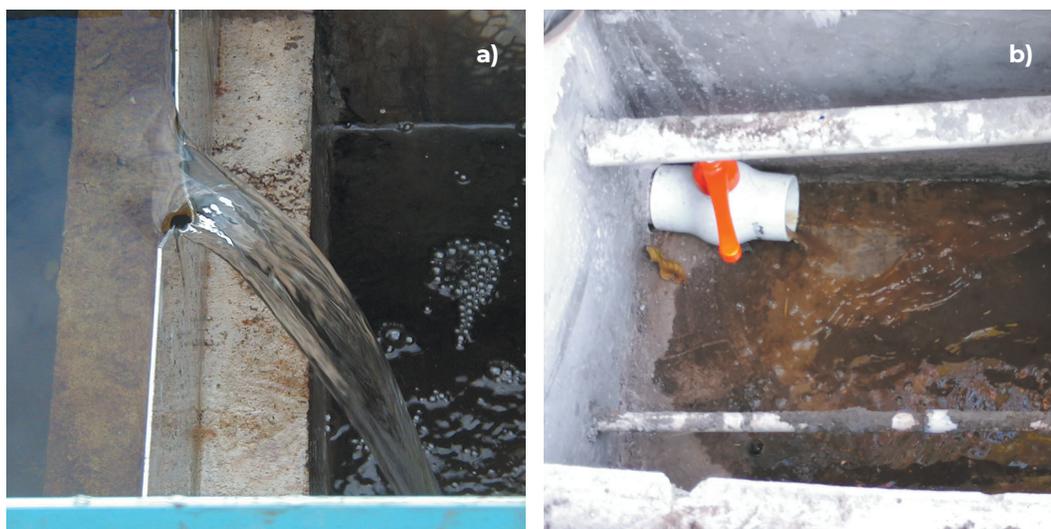


Figura 44. Siembra de especies vegetales.



### 5.2.13 Seguridad del área

Es conveniente la instalación de cercas protectoras (malla ciclónica) en la periferia del sistema, con lo cual se puede evitar el ingreso de animales que pudieran causar destrozos dentro de los humedales. Las cercas con alambres de púas no son funcionales, ya que con facilidad pueden entrar animales a la planta de tratamiento y ocasionar daños. En una experiencia, un roedor cayó en el registro de entrada, tapó el ingreso del agua y se generó un desastre con el agua desparramada fuera de las unidades de tratamiento. Asimismo, se controla el acceso de las personas, de tal manera que únicamente ingresen las asignadas para efectuar las labores de operación y mantenimiento (figura 45). También es importante colocar avisos informando que se trata de la planta de tratamiento de aguas residuales. Los niños podrían pensar que es un área de diversión.



**Figura 45.** Protección del humedal mediante malla ciclónica.

La vida útil del humedal es mayor a 20 años, siempre y cuando se utilicen materiales de buena calidad, sean bien construidos y tengan una eficiente operación y mantenimiento.

## 6. ¿Cómo se opera y da mantenimiento a un humedal de tratamiento?

Una vez terminada la construcción del sistema inicia la etapa de su operación, que consiste en hacer fluir el agua a través de los estanques. Se debe revisar que los niveles estén correctos. De no ser así, es momento de hacer las correcciones correspondientes.

Las actividades que se realizan con más frecuencia consisten en la limpieza de rejillas y del desarenador, poda de la vegetación, limpieza de tuberías y control de niveles de agua. Estas actividades se describen a continuación.

### 6.1 Limpieza de rejillas y del desarenador

La frecuencia de limpieza de rejillas y desarenador dependerá de los hábitos existentes respecto a no tirar basura en los excusados y de si el drenaje pluvial está mezclado con el agua residual generada en la escuela. Durante el tiempo de lluvias se deben retirar los residuos diariamente, especialmente la arena y hojas que son acarreadas por la lluvia. En la figura 46 se muestran las actividades de limpieza de rejillas y del desarenador.



**Figura 46.** Labores de limpieza: a) retiro de basuras de las rejillas, b) extracción de sólidos del desarenador.

### 6.2 Poda de la vegetación.

Se recomienda efectuarla una o dos veces por año, ya que las plantas utilizadas en los humedales, en su mayoría, tienen una duración de vida de un año.

No se debe de podar la vegetación de toda el área, como cuando se poda el pasto. Recordemos que las plantas producen y transfieren el oxígeno hacia las raíces, el cual utilizan los microorganismos. Tengamos en cuenta que las plantas tardan en crecer y el oxígeno se necesita de manera continua. El oxígeno se produce en la parte inferior de las hojas (en los estomas, mediante la fotosíntesis, durante el día) y una pequeña parte ingresa durante el día y durante la noche, a través de pequeños orificios llamados lenticelas, existentes en los tallos y raíces.

De hecho, es mucho mejor si se van retirando los ejemplares que presenten un aspecto senil (como si estuvieran marchitándose), ya que estas plantas, por encontrarse en la última etapa de su vida, ya no toman los nutrientes con mucha fuerza, como lo hacen las plantas más jóvenes. El objetivo es inducir un desarrollo vigoroso de las plantas. Simplemente se

tiene que, a mayor toma de nutrientes, mayor velocidad y eficiencia en la reducción de contaminantes.

Usualmente las plantas presentan un aspecto senil entre el otoño y el invierno, mientras que durante la primavera y el verano presentan un color verde oscuro.

Aunque durante el invierno las plantas se vean seniles, no es conveniente eliminarlas o podarlas, es más recomendable esperar a que reverdezcan durante la primavera.

El corte de las plantas (poda) debe hacerse dejando entre 20 y 30 centímetros del tallo, ya que de este remanente de tallo se formarán nuevos ejemplares.

Con frecuencia se desarrolla dentro de los humedales una gran diversidad de especies invasoras, las cuales deben ser extraídas desde su raíz. Usualmente, la profundidad de raíz de estas especies no tiene la longitud suficiente para llevar el oxígeno hasta las zonas profundas del humedal. En algunos casos crecen plantas enredaderas, que se desarrollan y afectan a las plantas sembradas para el tratamiento.

La vegetación resultante de la poda, así como la vegetación invasora extraída, deben ser dispuestas fuera del humedal, ya que, si permanecen sobre el humedal, tienden a descomponerse y a liberar nuevamente los nutrientes que ya habían absorbido.

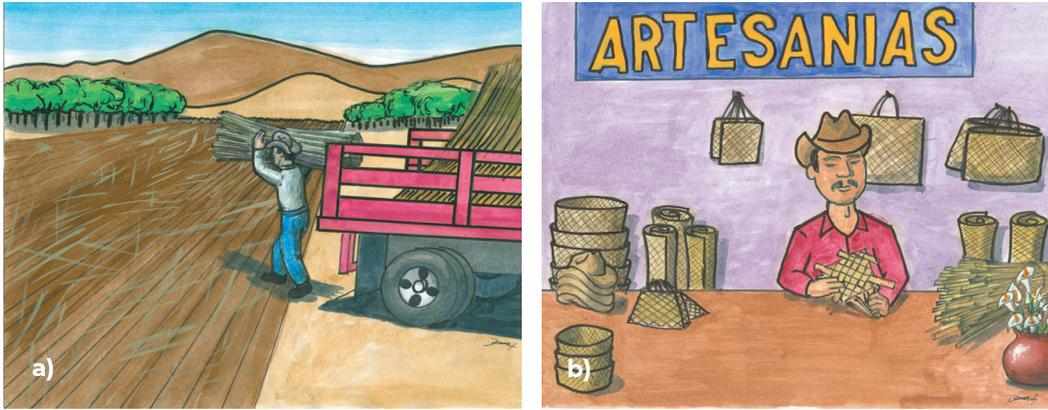
En la figura 47 se muestran las actividades de poda de la vegetación y la extracción de especies invasoras.



**Figura 47.** Poda de vegetación: a) especies sembradas en el humedal, b) especies invasoras.

Otra opción consiste en convertir en composta la vegetación extraída, y puede utilizarse para fertilizar las áreas verdes, o bien ser dispuesta en áreas de cultivo. Esta opción no es recomendable en los casos de tratamiento de aguas residuales que contengan sustancias tóxicas, como es el caso del agua residual descargada por industrias que generan residuos tóxicos. Claro está, no debiera ser el caso del agua residual generada en las escuelas.

También puede utilizarse la vegetación resultante de la poda como materia prima para la elaboración de artesanías. Por supuesto, el tipo de artesanías dependerá de las características de las especies podadas (figura 48).

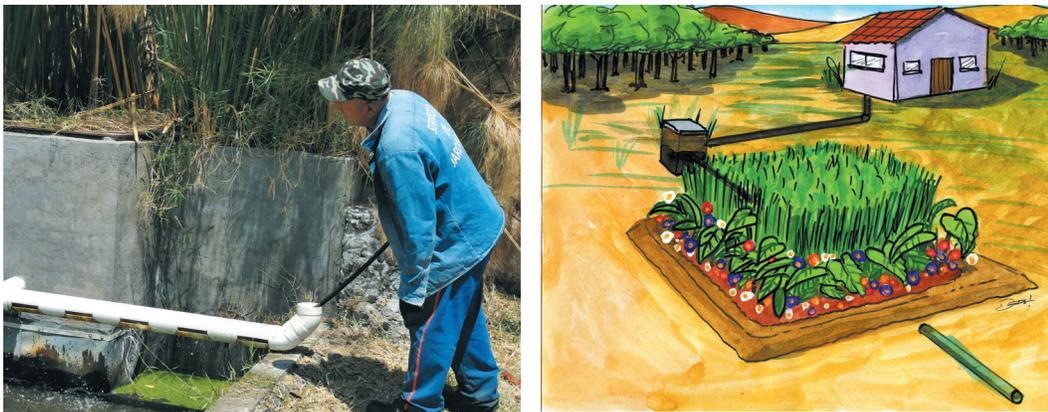


**Figura 48.** Reciclaje de la vegetación podada: a) como mejorador de suelos en áreas de cultivo, b) como materia prima para la elaboración de artesanías.

### 6.3 Limpieza de tuberías

Esta actividad debe realizarse tan pronto como se identifiquen taponamientos, los cuales pueden localizarse cuando aparezcan sobre la superficie del humedal algunos flujos preferenciales (pequeños flujos de agua) o bien porque el agua no fluye hacia las siguientes unidades de tratamiento.

Para efectuar esta acción se requiere amarrar un trapo sobre el extremo de una manguera negra, la cual se introduce en uno de los extremos de la tubería, y se procede a empujar y jalar, hasta que vaya enviándose la basura o el sedimento hacia el extremo opuesto del tubo (figura 49).



**Figura 49.** Limpieza de tuberías.

### 6.4 Control de niveles del agua

Otra actividad de gran importancia consiste en revisar con frecuencia el nivel del agua dentro de los estanques. De acuerdo con el diseño, en los humedales de flujo subsuperficial horizontal, el agua debe fluir a 10 cm por debajo de la superficie (figura 50a). Es importante mantener el nivel del agua también durante el periodo de vacaciones, el cual no es lo suficientemente prolongado para provocar el desecamiento total del humedal. Además, algunos de los periodos vacacionales se presentan durante la temporada de lluvias, lo cual contribuye para evitar el desecamiento de los estanques.

En la figura 50b se muestra la medición del caudal, mediante el apoyo de una regla, en un vertedor triangular. Con frecuencia, este tipo de vertedores son afectados por la acumulación de basura, por lo cual se requiere realizar su limpieza, tan pronto como sea posible.

En el caso de que no descargue agua de cualquiera de los estanques, o bien que la descarga sea visiblemente menor a la cantidad de entrada, significa que hay daños en la impermeabilización, lo cual debe repararse de inmediato.



**Figura 50.** Control de niveles del agua: a) verificación del nivel del agua dentro del humedal, b) medición de caudal.

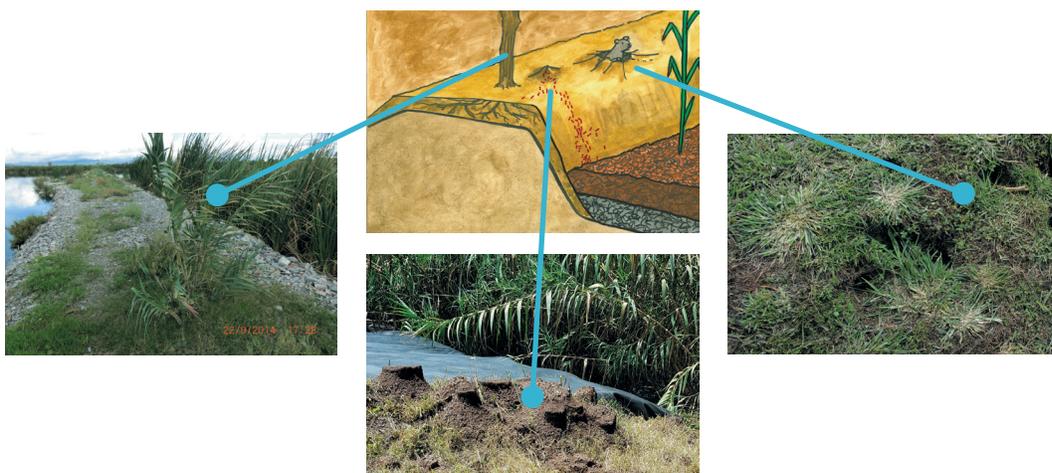
En los humedales de flujo subsuperficial vertical el agua fluye por el medio filtrante, el cual solamente permanece húmedo.

## 6.5 ¿Cuáles son y en qué consisten y las principales labores de mantenimiento?

El mantenimiento consiste en conservar el sistema de acuerdo con el diseño. Básicamente se deben realizar las reparaciones necesarias para evitar daños que pudieran afectar el funcionamiento del sistema. Algunas de las acciones principales son las siguientes:

### 6.5.1 Reparación de bordos

Se deben evitar los hormigueros, madrigueras de roedores y el desarrollo de especies arbustivas o arbóreas, cuyas raíces pudieran destruir los bordos (figura 51).



**Figura 51.** Mantenimiento de los bordos. Eliminación de hormigueros, madrigueras de roedores y de plantas arbustivas o arbóreas.

### 6.5.2 Resiembra de especies

Como ya se mencionó, las especies vegetales viven aproximadamente durante un año. Después de su muerte se generan espacios sin vegetación, lo que afecta reduciendo la cantidad de oxígeno que las plantas envían hacia la zona de raíces.

Ante esta situación es necesario extraer las plantas muertas, incluida su raíz, y sembrar especies jóvenes para recuperar la producción de oxígeno (figura 52a). También se pueden resembrar plantas de ornato en la periferia de los humedales con objeto de mejorar su estética (figura 52b).



**Figura 52.** Resiembra: a) plantas dentro del humedal, b) especies de ornato en la periferia.

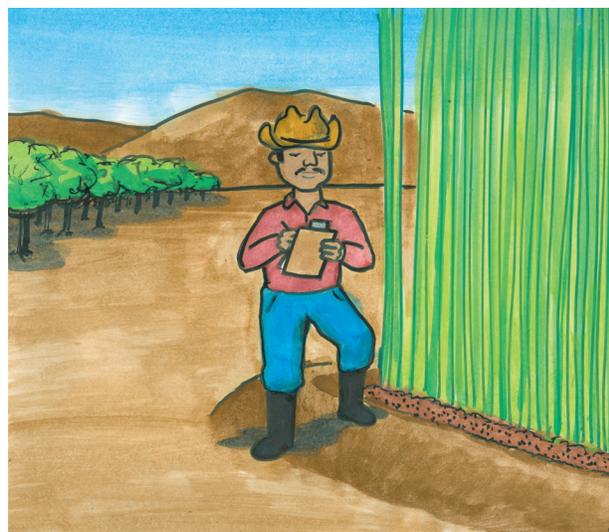
### 6.5.3 Otras actividades de mantenimiento

Otras acciones de mantenimiento consisten en la oportuna restauración o reparación de registros, tapas oxidadas, tuberías tapadas o rotas, válvulas, compuertas, daños en la geomembrana o en la malla de seguridad, reemplazo de equipos, reparación de áreas de acceso, limpieza general de la planta y cuidado de su aspecto estético.

### 6.5.4 Registro en bitácora

Una actividad muy importante consiste en el registro de actividades de operación y mantenimiento en una bitácora (figura 53). Esta información no solamente sirve para identificar las acciones más frecuentes, sino que permite proyectar y presupuestar acciones y gastos a corto y mediano plazos, con lo cual se deben tomar las precauciones pertinentes.

La siguiente bitácora fue desarrollada para servir como base del registro de las actividades de operación y mantenimiento, sin embargo, puede actualizarse y adecuarse a las necesidades específicas de cada caso.



**Figura 53.** Registro de actividades de operación y mantenimiento en bitácora.

# BITÁCORA DE ACTIVIDADES DEL HUMEDAL DE \_\_\_\_\_

Hoja 1

Fecha	Nombre del operador		
ACTIVIDAD	Marcar con X	Tiempo (minutos)	Fecha de realización
Limpieza de rejillas			
Extracción de lirio del tanque de lecho orgánico			
Limpieza de basuras sobre los vertedores triangulares			
Poda de plantas seniles			
Poda sistemática de la vegetación			
Limpieza del interior de los tubos de interconexión			
Extracción de natas del tanque de almacenamiento			
Revisión de las telas mosquiteras o tapas de los tubos de visita o muestreo			
Revisión de nivel de agua del humedal			
Regado de plantas del humedal			
Regado del talud de tierra			
Extracción de basura dentro de los humedales			
Accionar las llaves de paso de todos los registros			
Poda de árboles fuera del sistema			
Poda de la vegetación herbácea en áreas fuera del sistema de tratamiento			
Revisión del candado de la puerta de acceso al sistema para mantenerlo cerrado			
Revisión de la malla perimetral			
Revisión del sistema de bombeo			
Sustitución del medio de empaque orgánico			

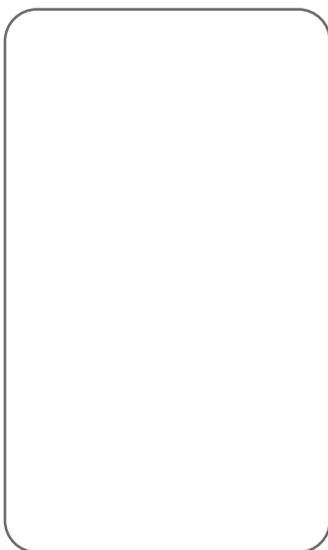
# BITÁCORA DE ACTIVIDADES DEL HUMEDAL DE \_\_\_\_\_

Hoja 2

ACTIVIDAD	Marcar con X	Tiempo (minutos)	Fecha de realización
Extracción de lodos del tanque séptico			
<b>Otras actividades</b> (especifique). Ejemplo: reparación de la malla perimetral, reparación del talud, reparación de la bomba, desinfección del agua tratada, etc.)			

**Observaciones y comentarios** (ejemplos: periodos de escasez de agua, aspecto general de las plantas, presencia de vida silvestre, visitas recibidas, durabilidad de las herramientas utilizadas, malos olores, etcétera).  
Puede señalarse en un círculo el sitio donde realizó la actividad, dentro del esquema del sistema de tratamiento. o bien, citarse el sitio de la acción.

**Esquema**





Es importante señalar que todas deficiencias que se presenten durante el dimensionamiento, diseño físico, construcción, operación y mantenimiento se reflejarán en deficiencias en el tratamiento del agua residual, así como de un aumento de costos de tratamiento. De tal modo que si el sistema se sobredimensiona o sub dimensiona afectará las eficiencias de remoción de contaminantes.

Si hay fallas durante la construcción, por ejemplo, en la impermeabilización, se producirán fugas o infiltraciones que afectarán el balance del agua dentro del sistema, y por tanto la eficiencia.

Si durante la operación no se realiza la limpieza de las rejillas el agua puede desbordarse generar problemas, o si no se limpian las basuras de los vertedores el agua podría distribuirse de una manera incorrecta, afectando nuevamente deficiencia de tratamiento. En conclusión, todas las etapas requieren de una cuidadosa y comprometida atención y supervisión.

## 7. Reúso del agua tratada

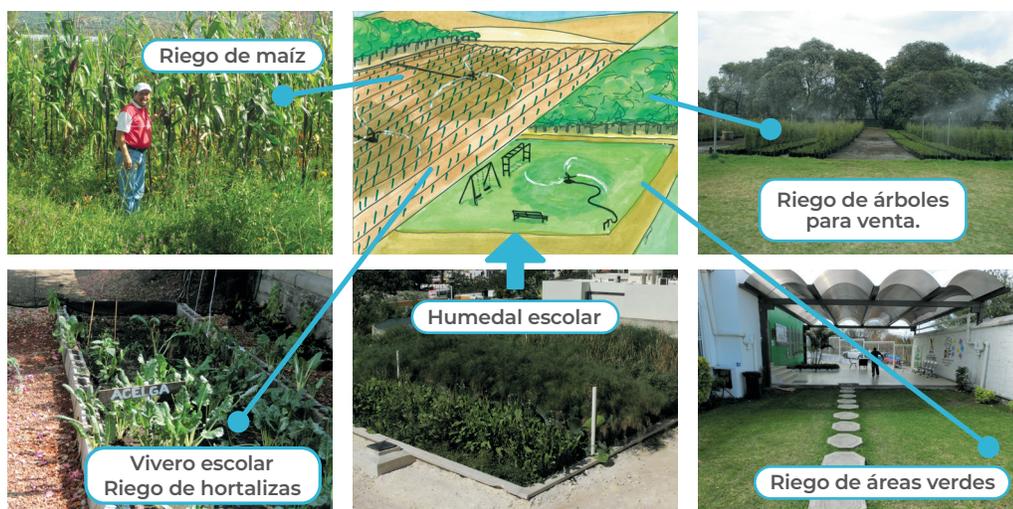
¿En qué se puede utilizar el agua tratada con el humedal artificial?

Hasta aquí hemos aprendido como se diseña, construye, opera y da mantenimiento al humedal artificial, pero no olvidemos que el objetivo no solo es el tratamiento del agua, sino el uso que le vamos a dar, una vez que le fue restaurada en su calidad.

El agua tratada mediante el tren de tratamiento aquí propuesto, que incluye humedales artificiales, es viable para obtener agua que cumpla con la normativa mexicana para riego de áreas verdes (figura 54), riego de cultivos y para ser vertida a los cuerpos receptores (ríos, lagos, océano y suelo).

El reúso del agua presenta varios beneficios:

- Reducción de la demanda de agua proveniente de los pozos, lo que a su vez favorece la conservación del agua subterránea y previene problemas de escasez.
- Se disminuye la descarga a ríos y lagos de agua que aún contiene pequeños remanentes de nutrientes. Estos nutrientes sirven como abono natural para riego de especies vegetales.
- Protección de la vida silvestre.
- El agua tratada puede aprovecharse en algunas industrias.



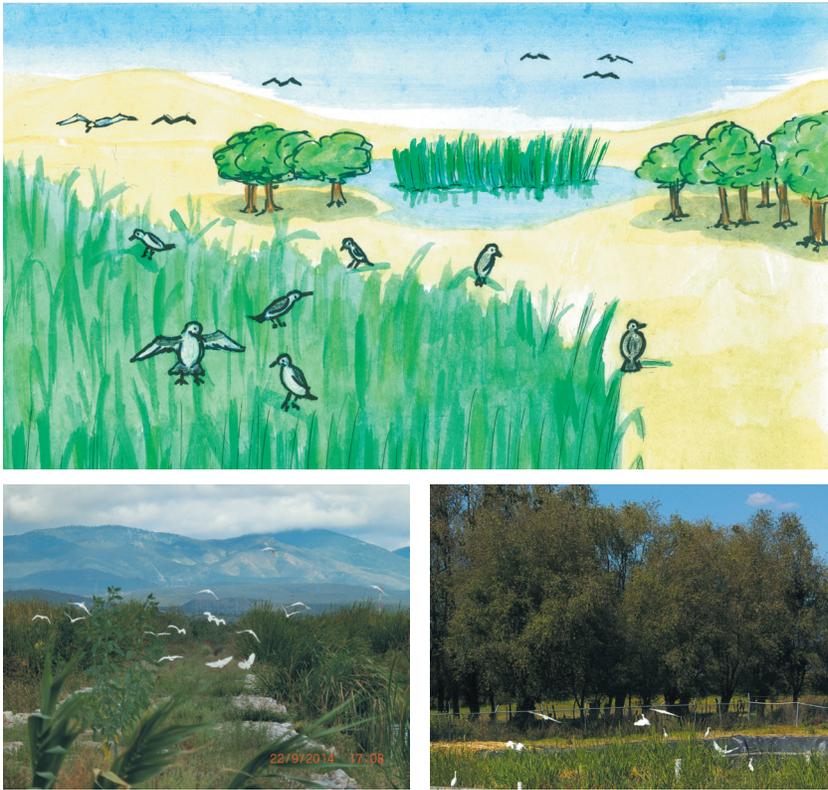
**Figura 54.** Reúso del agua tratada en riego de áreas verdes y riego de cultivos.

Es necesario tener siempre presente que reutilizar el agua significa reciclarla; es contribuir con su conservación y protección dentro del ciclo del agua.

De igual modo, que para reciclarla se requiere el tratamiento del agua residual, y que los humedales artificiales son una alternativa eficiente y económica para lograr este fin y que armoniza con el medio ambiente.

Los humedales artificiales también constituyen áreas de protección de la vida silvestre (figura 55).

Existen en México numerosos casos, en donde un sinnúmero de aves, de muchos tipos, migratorias y locales, se resguardan, alimentan y descansan en los humedales artificiales. Se presentan auténticas condiciones de sobrevivencia



**Figura 55.** *Presencia de vida silvestre en los humedales artificiales.*

## 8. Hemos aprendido en este manual:

Qué es el agua residual, cuáles son sus principales contaminantes, los riesgos de salud y ambientales por su contaminación, y por qué es necesario tratarla.

Qué es el agua virtual y la huella hídrica.

Sabemos que hay diferentes alternativas de tratamiento de agua residual.

Aprendimos qué son los humedales artificiales, su estructura, funcionalidad, clasificación, ventajas y desventajas con los sistemas electromecánicos, dimensionamiento, construcción, así como las actividades de operación y mantenimiento.

Tenemos presente en qué se puede reutilizar el agua tratada, conforme a la normativa mexicana.

Se concluye que los humedales artificiales, cuando son bien diseñados, construidos y operados, constituyen una alternativa viable y confiable para el tratamiento del agua residual. Sabemos que es factible utilizarla en las escuelas, aun en diferentes condiciones climáticas, y que, además, son sistemas sencillos de operar y son amigables con el ambiente.

## 9. Anexos

ANEXO A - Áreas requeridas para la instalación de humedales artificiales para diferentes tamaños de población.

ANEXO B - Temperaturas mínimas promedio por estado en México, 2019.

ANEXO C - Lista de especies para ser utilizadas en los humedales artificiales.

## Bibliografía

Amado Enrique Navarro Frómata y Raúl Jacobo Delgado Macuil. 2021. Tecnologías para la gestión sostenible del agua. CONACYT. México.

CONAGUA, SEMARNAT. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: humedales artificiales. México.

EPA. 2000. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Humedales de flujo subsuperficial.

Igma Pacheco. Rivas. 2019. Como depurar las aguas residuales de tu casa con sistemas naturales. Taller Karuma.

Karen Setty. 2007, Manual de Construcción: Humedales Construidos para el Tratamiento de Aguas negras. Bren School of Environmental Science and Management, University of California, Santa Barbara. Microsoft Word - Diseno\_Humedal\_AguasNegras.doc (iiap.org.pe)

Jaime Andrés Lara Borrego. 1999. Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Universidad Politécnica de Cataluña.

Joan García Serrano, Angélica Corzo Hernández. 2008. Guía práctica de diseño, Construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial. Universidad Politécnica de Cataluña.

María Teresa Alarcón Herrera, Florentina Zurita Martínez, Jaime A. Lara-Borrero, Gladys Vidal. 2018. Humedales de tratamiento: alternativa de saneamiento de aguas residuales aplicable en América Latina. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.

Mariano Seoáñez Calvo. 1999. Aguas residuales: Humedales artificiales. Fundamentos científicos. Tecnologías. Diseño. Ediciones Mundiprensa.