

HUMEDALES ARTIFICIALES UNA ALTERNATIVA SUSTENTABLE PARA LA LIMPIEZA DE AGUA CONTAMINADAS EN MÉXICO

Data de aceite: 02/10/2023

Nallely Téllez Méndez

Dagoberto Ruíz Rosas

Laura Alicia Paniagua Solar

Jorge Cotzomi Paleta

Enrique de la Fuente Morales.

RESUMEN: Un problema que aqueja a la humanidad es la disminución de la disponibilidad de agua dulce para el consumo humano generado por una extracción excesiva, uso irresponsable, contaminación de mantos acuíferos entre otras. En este capítulo se refiere a la viabilidad que tiene la implementación de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales, se diferencian los diversos tipos existentes; también, se muestran modelos matemáticos para su diseño; así como las principales interacciones que existen en un humedal artificial, tanto físicos, químicos y biológicos. Se describen las características de la flora y fauna necesarios para la implementación. Finalmente se mencionan algunos ejemplos en los que se han implementado estos diseños y su funcionamiento ha sido favorable.

ABSTRACT: A problem that afflicts humanity is the decrease in the availability of fresh water for human consumption generated by excessive extraction, irresponsible use, contamination of aquifers, among others. This chapter refers to the feasibility of the implementation of artificial wetlands for wastewater treatment; the different existing types are differentiated; mathematical models for their design are shown; as well as the main interactions that exist in an artificial wetland, both physical, chemical, and biological. The characteristics of the flora and fauna necessary for its implementation are described. Finally, some examples are mentioned in which these designs have been implemented and their performance has been favorable.

INTRODUCCIÓN

Actualmente nos enfrentamos a diversos problemas relacionados con el cambio climático y la acción humana sobre los ecosistemas, uno de ellos es disminución de la disponibilidad de agua dulce para el consumo humano generado por una extracción excesiva, uso irresponsable, contaminación de mantos

acuíferos entre otras.

Una solución a este problema es la implementación de humedales artificiales, los cuales replica los procesos microbiológicos, químicos y físicos, mediante el uso de flora, sustratos y microorganismos de forma similar a lo que ocurre en un humedal natural.

Los humedales naturales son considerados purificadores de agua, y en los humedales artificiales se quiere lograr este fin imitando sus características.

Por ello, en este capítulo hablaremos de los humedales como alternativa sustentable para limpiar el agua contaminada.

HUMEDALES NATURALES

Los humedales son ecosistemas que permanecen constante o periódicamente inundados, por agua dulce, salada o ambas; representan tan solo el 6% de la superficie en el planeta. Tiene una función ecología importante debido a que protegen de las inundaciones, purifican el agua y son nido de muchas especies. Se clasifican principalmente en dos: costeros y continentales.

Costeros: Se encuentran en las costas, tiene una mezcla de agua dulce y salada, a esta combinación se le denomina agua salobre.

Continental: se encuentran ubicados cerca de ríos o lagos, la mayoría son de agua dulce; algunos son producidos por las lluvias o ríos subterráneos que emergen a la superficie, por lo que, la mayoría solo aparecen en la época de lluvias. (Gibbens, 2023)



Imagen 1: Humedal en México

Fuente: (Rural, 2022)

Los humedales están constituidos por agua dulce, salada o ambas, algunos invertebrados, vegetación de diferentes especies dependiendo la flora del lugar, el terreno que puede contener infinidad de partículas solidas de diferentes especies, además de una

gran variedad de microorganismos que cumplen una función sumamente importante en estos ecosistemas, como lo es la degradación de contaminaste.

Tratamiento de aguas contaminadas

Mekonnen y col. mencionan que actualmente existen cerca de 1. 800 millones de personas en escases absoluta de agua y 4 mil millones que han experimentado la escases por lo menos un mes al año (Mekonnen & Hoekstra, 2016), esta tendencia va a la alza, por lo que es necesario buscar opciones para sanear el agua contaminada, permitiendo pueda tener otro uso, algunas formas en que se ha tratado de efectuar la limpieza ha sido por laguna facultativas, de maduración, lodos activados entre otras.

Lagunas facultativas

Son sistemas que cuentan con tres zonas delimitadas, en la superior se lleva acabo reacciones aeróbicas, en la inferior reacciones anaeróbicas y en la parte media se encuentra bacterias denominadas facultativas que son capaces de sobrevivir en ambos medios, además se encuentran algas, protozoos, hongos, insectos entre otros, pueden tener entre 1 a 2 mts de profundidad, su principal desventaja es el requerimiento de terreno (T. F. Cortés Martínez, 2014).

Lagunas de maduración

Es una laguna aeróbica su objetivo es la eliminación de bacterias patógenas (coliformes fecales) los cuales son transmisores de enfermedades como: hepatitis infecciona, cólera, tifoidea entre otras (A. Treviño Cansino, 2016); operan a una profundidad de 0.9 a 1.5 mts, normalmente se utilizan después de que el agua ha sido tratada en una laguna facultativa. Uno de sus inconvenientes es la evaporación del agua en verano.

Lobos activados

Las aguas residuales entran a un reactor en el que se inyecta aire, aquí interviene bacterias que ayudan a la remoción de contaminantes, su desventaja son los altos costo de inversión, operación y mantenimiento. (Sela)

Humedales artificiales

El hombre a lo largo del tiempo ha tenido la idea de poder imitar a la naturaleza para tratar de hacer procesos más sustentables, disminuir el impacto ecológico y logran un equilibrio con el medio ambiente; un ejemplo de esto es la implementación de humedales artificiales que permitan tratar agua contaminada.

En general los humedales artificiales están constituidos de una superficie impermeable, que puede ser una capa de cemento o geomembrana; grava o arena, piedras y tierra que sirvan como fijadores de contaminantes y plantas acuáticas que realicen la función de liberar oxígeno (UNAM, 2023).

Se clasifican en tres:

- Humedal de Flujo superficial libre
- De flujo horizontal sub-superficial
- De flujo vertical

Humedal de Flujo superficial libre (HFS)

Está constituido por la parte impermeable con poca profundidad, su característica principal es que tiene un flujo contante y lento entre entrada y salida del humedal, está expuesto a la luz solar directa y atmosfera; la flora debe ser de la localidad adaptada a las condiciones del clima. En la parte inferior del humedal debes de tener una pendiente que permita ser drenado. Este tipo de humedal es el más adecuado para localidades rurales, debido a que no necesita energía eléctrica, hay espacios disponibles, un inconveniente es la producción de mosquitos por el agua estancada. (Elizabeth Tilley L. U., 2023) (Elizabeth Tilley L. U., 2018)

Humedal de flujo horizontal sub-superficial (HFSS)

Esta constituido por un estanque o canal impermeable, su principal característica es que mantiene un nivel de agua subsuperficial, lo que permite prever la reproducción de mosquitos y olores. La posibilidad de generar hábitats en estos humedales es limitada. (EPA, Folleto informativo de tecnologías de aguas residuales , 2000)

Humedales de flujo vertical (HSV)

La característica de este tipo de humedal es que la alimentación del agua a tratar se realiza desde un punto más alto en la superficie, por lo que el agua fluye de forma vertical al fondo del humedal. La desventaja principal es que requiere de energía para suministrar del agua a tratar, sin embargo, hay una mayor transferencia de oxígeno en todo el humedal. (Elizabeth Tilley L. U., 2023), (Amado Enrique Navarro-Frómata, 2020)

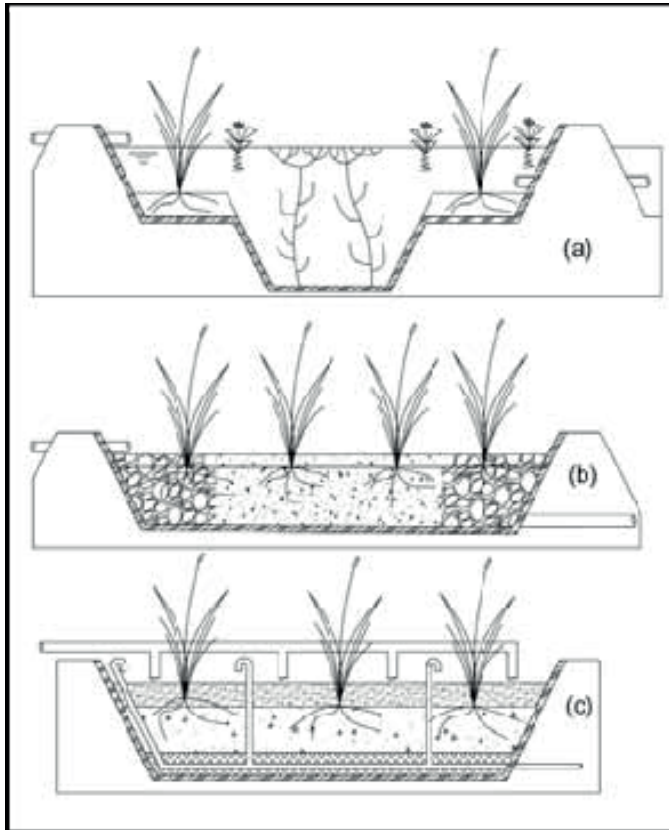


Figura 2. Tipos de humedales artificiales: (a) flujo superficial; (b) flujo subsuperficial horizontal; y (c) flujo subsuperficial vertical.

Fuente: (Vera-Puerto Ismael, 2000)

Interacciones que intervienen

El tratamiento del agua dentro de un humedal natural ocurre por la interacción entre los elementos del humedal y de los fenómenos físicos, químicos y biológicos dentro del humedal, con la intervención del sol como principal fuente de energía.

Físicos:

Los fenómenos físicos incluyen procesos de filtración y sedimentación de materia orgánica suspendida en el agua y de metales pesados mediante las raíces de la vegetación y la porosidad del sustrato.

Químicos:

Los fenómenos químicos incluyen procesos como descomposición por oxidación, que ayuda a la destrucción de virus y bacterias patógenas, así como por precipitación y absorción en el sustrato de metales pesados, nitrógeno y fósforo, siendo este último

particularmente difícil de eliminar en los humedales de flujo subsuperficial, por lo que se ha propuesto el empleo de sustratos específicos que potencien la retención del fósforo. (Sara Youcef, 2022)

Biológicos:

La parte biológica del humedal está representada por la vegetación y un sinnúmero de colonias de microorganismos presentes en el sustrato del humedal como los son bacterias, levaduras, hongos y protozoos que permiten por su actividad biológica consumir contaminantes convirtiéndolos en sustancias inocuas.

El proceso fotosintético es una ruta de reacciones por la que las plantas en los humedales adsorben CO_2 y aportan O_2 al ambiente y a sus raíces lo que permite un ambiente oxigenado que favorece la descomposición de la materia orgánica por la acción de los microorganismos; además, depuran nitrógeno, fósforo, metales pesados y materia orgánica (I. Arias, 2003). Los microorganismos en particular son responsables del proceso de nitrificación, en el cual el nitrógeno amoniacal es transformado en nitrógeno nítrico. Este proceso está influenciado por otros factores, que pueden ralentizar o acelerar el crecimiento de bacterias nitrificantes, entre estos factores se encuentran: un pH de entre 7.5 y 8.6, una concentración de oxígeno disuelto por encima de 1 mg/l y una temperatura adecuada que permita el crecimiento bacteriano. Para que la eliminación del nitrógeno este completa, al proceso de nitrificación debe seguir un proceso de desnitrificación, donde, en condiciones de falta de oxígeno, bacterias convierten nitratos en nitritos para que a continuación este pase a forma gaseosa y pueda escapar a la atmósfera (M. Romero-Aguilar, 2009).

Calidad de agua

El agua residual debe ser tratada previamente a él vertimiento de un medio natural, con el fin de que el impacto negativo que genere en el mismo sea mínimo, por ellos se mencionan a continuación los principales factores a determinar para que un agua residual tenga las condiciones apropiadas.

- Demanda Química de Oxígeno (DQO),

Se define como la cantidad de oxígeno necesario para oxidar sustancias orgánicas presentes en aguas contaminadas, para su determinación se coloca la muestra de agua a reflujos con dicromato de potasio que es un oxidante en medio ácido, después de titula generalmente con una disolución de hierro (II), para determinar el dicromato residual después de la reacción, este dependerá de la cantidad de sustancias orgánicas presentes en el agua. También se puede usar espectroscopia ultravioleta-visible. Se expresa en unidades de mg/L O_2 , en general, nos permite determinar la cantidad de contaminación del agua. Un agua pura tiene un valor de DQO 0 a 20mg O_2 /L, y arriba de 500mg/L se considera muy contaminada.

- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)

Nos permite determinar compuestos orgánicos biodegradables, en esta prueba la muestra se coloca en la oscuridad para evitar el proceso fotosintético de algunas algas que puedan contener la muestra a 20°C por 5 días, periodo en el cual se determinara el oxígeno que los microorganismos necesitaron para oxidar la materia orgánica, a valores por encima de 30mg O₂/L, se considera un agua contaminada.

- pH

Nos permite determinar la acidez o basicidad del agua, este parámetro es importante de controlar porque afecta la flora y fauna de los ecosistemas. Se considera un pH de 8.5 para poder verter un agua residual en un medio natural.

- Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Es el material constituido por los sólidos sedimentables, los sólidos suspendidos y coloidales que son retenidos por un filtro de fibra de vidrio con poro de 1,5 μm secado y llevado a masa constante a una temperatura de 105 °C ± 2 °C. (x)

NORMA MEXICANA NMX-AA-034-SCFI-2015, ANÁLISIS DE AGUA - MEDICIÓN DE SÓLIDOS Y SALES DISUELTAS EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS – MÉTODO DE PRUEBA (CANCELA A LA NMX-AA-034-SCFI-2001). (México, 2015)

- Sólidos Totales (ST)

Es el residuo que permanece e (México, 2015) n una cápsula después de evaporar y secar una muestra a una temperatura de 105 °C ± 2 °C. (México, 2015)

- Sólidos Disueltos Totales (SDT): Es el material soluble constituido por materia inorgánica y orgánica que permanece como residuo después de evaporar y secar una muestra previamente filtrada a través de un filtro de fibra de vidrio con poro de 1,5 μm a una temperatura de 105 °C ± 2 °C. (México, 2015)
- Sólidos Totales Volátiles (STV): Cantidad de materia orgánica e inorgánica que se volatiliza por el efecto de la calcinación a 550 °C ± 50 °C (México, 2015). (México, 2015)
- Análisis microbiológicos de Coliformes Totales y Fecales

Permite determinar la cantidad de bacterias patógenas dentro de la muestra de agua, es valor, es importante debido a que no se tratada adecuadamente puede generar enfermedades a la población (México, 2015).

DISEÑO DE UN HUMEDAL

Durante el diseño de un humedal artificial, se deben de considerar aspectos importantes como la ubicación, dimensiones, capacidad hidráulica, selección de los especímenes de plantas originarias de la localidad, caudales de entrada y salida, tanto en sus máximos, su media y sus mínimos; concentración de contaminantes en el agua a tratar,

así como la concentración esperada en el caudal de salida y finalmente la temperatura de operación, tomándose la temperatura del mes más frío para el diseño, puesto que se toma el peor escenario para el crecimiento de plantas y bacterias.

Por otra parte, las principales variables para el diseño son: el tiempo de retención hidráulico, que es el tiempo que el agua estará dentro del humedal para poder alcanzar la calidad deseada; la profundidad del sustrato; la geometría de la zona de tratamiento (Blázquez, 2016).

Finalmente se debe de tener en cuenta ciertas consideraciones para que el sistema tenga el funcionamiento esperado, un diseño simple, evitando en la medida de lo posible sistemas complejos de bombeo y circulación, usando la fuerza de gravedad como principal medio para la circulación del agua; además se debe de considerar el paisaje, adaptando el humedal a este, adicionalmente se considera el clima, las sequias, inundaciones y tormentas (EPA).

Metodologías de diseño de humedales artificiales

Existen varias metodologías para el diseño de humedales artificiales, que nos ayudan a diseñar de acuerdo las condiciones específicas del sitio de construcción.

Metodología de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)

Esta metodología se basada a su vez en la Agencia para la Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos (EPA), así como la propuesta por los investigadores Kadlec y Knight. Esta se fundamenta en una ecuación derivada del modelo de cinética de primer orden y considera a los humedales como reactores biológicos cuyo rendimiento se puede aproximar al descrito en un reactor de flujo a pistón. La CONAGUA se propone con esta metodología a reducir los sólidos suspendidos totales (SST) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) principalmente, sin contemplar la eliminación del nitrógeno total ni los fosfatos. Sin embargo, nos ofrece a cambio un diseño muy completo del humedal que incluye largo, ancho, profundidad del medio, profundidad del agua, inclinación, cantidad de plantas por m² y tiempo de residencia. Es por tanto una metodología muy completa, cuya única desventaja es que no contempla la remoción de muchos contaminantes.

La principal ecuación de este modelo es la siguiente:

$$A_s = \frac{Q(\ln C_0 - \ln C_e)}{K_{v,T} D_M n}$$

Ecuación 1

Donde

- A_s = Área superficial del humedal m²
- Q = Caudal de entrada, m³/d
- C_0 = Concentración de DBO en afluente mg/L
- C_e = Concentración de DBO en efluente mg/L
- $K_{v,T}$ = Constante cinética de primer orden, d⁻¹

- D_m = Propuesta de profundidad del lecho, m
- n = Porosidad del medio

La constante cinética de primer orden se corrige de acuerdo con la temperatura promedio del agua, mediante la ecuación de Arrhenius de la siguiente forma:

$$K_{vT} = K_{v,20}\theta^{T-20}$$

Ecuación 2

Donde:

- $K_{v,20}$ = Constante de temperatura a 20°, este valor es de 1.104 d⁻¹
- θ = Coeficiente de Arrhenius, para HFSS el valor es de 1.06
- T = Temperatura promedio del agua °C

Estas dos ecuaciones son las que nos van a permitir obtener un diseño detallado de un humedal artificial, con el área obtenida podemos calcular el largo y el ancho del humedal, así como la profundidad de este. La metodología de la CONAGUA divide el humedal en diferentes zonas dependiendo de su funcionamiento en el tratamiento del agua, estas son: zona de entrada, zona inicial de tratamiento que equivale al 30% del total de la zona de tratamiento, zona final de tratamiento que corresponde al 70% del total de la zona de tratamiento y la zona de salida. Así mismo, dependiendo la zona, la elevación del fondo del humedal va a variar, así como la profundidad del agua. Para poder empezar a calcular estos datos se debe empezar por calcular la conductividad hidráulica, que define con que facilidad el sustrato dejara pasar el agua.

$$K_s = 12600D_g^{1.9}$$

Ecuación 3

Donde D_g es el diámetro de la grava multiplicada por 10% que es la cantidad de la grava que es de menor tamaño. Con la conductividad hidráulica se procede a calcular el ancho mínimo del humedal con la siguiente ecuación:

$$w = \left(\frac{QA_1}{K_{s,1\%}d_{hi}D_{w,0}} \right)^{0.5}$$

Ecuación 4

Donde:

- w = ancho mínimo del humedal, m
- Q = caudal de entrada del humedal, m³/d
- A_1 = Area inicial de tratamiento, m²
- $K_{s,1\%}$ = Conductividad hidráulica, multiplicada por 1%, $\frac{m^3}{m^2d}$
- d_{hi} = Perdida de carga máxima en zona inicial, equivalente al 10% de la profundidad propuesta del sustrato, m
- $D_{w,0}$ = Propuesta de profundidad del agua en la zona inicial, m

Una vez que se obtiene el ancho del humedal, se puede calcular la longitud de este, la cual estará dividida en dos, la longitud de la zona inicial de tratamiento y la longitud de la zona final de tratamiento. Las ecuaciones necesarias son las siguientes:

$$L_i = \frac{A_i}{w}$$

Ecuación 5

$$L_f = \frac{A_2}{w}$$

Ecuación 6

Donde:

- L_i = Longitud de la zona inicial de tratamiento, m
- L_f = Longitud de la zona final de tratamiento, m
- A_1 = Área de la zona inicial de tratamiento, m²
- A_2 = Área de la zona final de tratamiento, m²
- w = Ancho mínimo del humedal, m

La suma de estas dos longitudes será la longitud total de humedal. La CONAGUA recomienda una relación largo-ancho de 2:1 para un funcionamiento eficiente del humedal y propone que, en caso de ser necesario, se divida el ancho del humedal de tal forma que se obtengan celdas con la relación deseada. Finalmente, se tiene que hacer la observación que la zona de entrada del humedal deberá tener un mínimo de 2 m, mientras que la zona de salida del humedal deberá tener un mínimo de 1 m, esto es para evitar problemas de sedimentación, taponamiento de tubería, así como una mayor facilidad en el mantenimiento.

Por otra parte, como se comentó anteriormente, esta metodología también nos provee de varias formulas para poder calcular las diferentes elevaciones, profundidades del agua y profundidades del medio, las cuales no serán de relevancia para el prototipo a escala que será construido, debido al tamaño de este, por lo que no serán tomadas en cuenta.

El *último* dato que nos proporciona esta metodología son el tiempo de residencia hidráulica, que es el tiempo necesario para que el agua pueda tener un tratamiento adecuado que cumpla con lo establecido en el diseño.

$$TRH_{nominal} = \frac{nD_{wF}}{\left(\frac{Q}{A}\right)}$$

Ecuación 7

Donde:

- $TRH_{nominal}$ = Tiempo de residencia hidráulico, días
- n = Porosidad del medio
- D_{wF} = Propuesta de profundidad del agua, m

- Q = Caudal de entrada, m³/d
- A = Área superficial del humedal, m²

Metodología de Kadlec y Knight

Esta complementa la metodología de la CONAGUA debido a que considera a los humedales como un sistema biológico donde la proliferación de microorganismos da lugar a la producción de materia orgánica nueva, parte de la cual quedara retenida en el propio humedal, empeorando su rendimiento con el tiempo. Esta materia orgánica se define como concentración residual o concentración de fondo y al contrario de la metodología de la EPA, la temperatura no influye en el diseño. Por otra parte, esta metodología da lugar a mayores necesidades de área superficial para el tratamiento del agua, esta área dependerá del tipo de contaminante.

La formula general de este modelo es la siguiente:

$$\ln\left(\frac{C_e - C^*}{C_0 - C^*}\right) = \frac{-K_T}{HLR_A}$$

Ecuación 8

Donde:

- C_e = Concentración del efluente deseada, mg/L
- C₀ = Concentración del afluente, mg/L
- C* = Concentración de fondos, mg/L
- K_T = Constante de primer orden dependiente de la temperatura, m/año
- HLR_A = Carga hidráulica, m/año

A partir de esta ecuación se puede obtener una expresión para obtener el área requerida para un contaminante en particular. Para ello se tiene que reordenar la ecuación 8 de la siguiente forma:

$$\ln\left(\frac{C_e - C^*}{C_0 - C^*}\right) = \frac{-K_T}{HLR_A}$$

Ecuación 9

Donde $HLR_A = \frac{Q_d * 365}{A_s}$, por lo que sustituyendo en la ecuación 9 se tiene:

$$\ln\left(\frac{C_e - C^*}{C_0 - C^*}\right) = \frac{-K_T}{\left(\frac{Q_d * 365}{A_s}\right)}$$

Ecuación 10

Despejando A se obtiene:

$$A_s = \frac{365 * Q}{K_T} * \ln\left(\frac{C_0 - C^*}{C_e - C^*}\right)$$

Ecuación 11

Con esta ecuación se puede calcular el área necesaria para el tratamiento de un contaminante en particular. En cuanto a la constante K_T , esta puede ser corregida con respecto a la temperatura de la siguiente forma:

$$K_T = K_{20}\theta^{T-20}$$

Ecuación 12

Donde:

- K_T = Constante de primer orden dependiente de la temperatura, m/año
- K_{20} = Constante de primer orden a 20 °C, m/año
- θ = Factor de corrección de temperatura
- T = Temperatura promedio del agua, °C

Siendo esta constante la encargada de la variación del área superficial del humedal dependiendo del contaminante a tratar, puesto que K_{20} y θ varían dependiendo el contaminante. Para el cálculo de esta constante se usa una tabla que recopila estos parámetros.

	SST	DBO ₅	N _{ORG}	N-NH ₄	N-NO ₃	N _T	P _T
K₂₀	1000	180	35	34	50	27	12
θ	1.065	1	1.05	1.04	1.09	1.05	1
C*	7.8+0.063C ₀	3.5+0.053C ₀	1.5	0	0	1.5	0.02

Tabla 1 Valores de K_{20} , θ y C^* para distintos contaminantes en HAFSS

Gracias a este modelo, ahora es posible diseñar un humedal artificial que pueda remover varios contaminantes de manera efectiva, al contrario que la metodología de la CONAGUA, donde se enfocaba principalmente en la remoción de DBO y SST. Así mismo, se pueden ocupar las ecuaciones del modelo de la CONAGUA para obtener las medidas del humedal y el tiempo de residencia hidráulica, teniendo de esta forma un modelo completo tanto en la parte de remoción de contaminantes como en la parte de diseño.

Para finalizar y como se mencionó anteriormente, esta metodología arroja áreas de tratamiento mayores que las arrojadas por la CONAGUA, siendo el N_T el contaminante que tiende a requerir la mayor cantidad de área para su remoción, por lo que es un dato para tener en cuenta por si no se cuenta con el suficiente espacio para su construcción. Por otra parte, el P_T tiende a requerir un área aun mayor que el N_T , por lo que se recomienda usar otro tratamiento alternativo o en conjunto para poder remover de manera eficiente el fósforo.

Flora y fauna en humedales artificiales.

Como se ha mencionado la flora y fauna son indispensables para el buen funcionamiento de un humedal artificial, la Flora más utilizada para este propósito se basa

en especies endémicas de la región que tengan las características de degradar materiales contaminables, mediante la asimilación directa, estabilización de la conductividad hidráulica o generando microambiente propicio para la actividad microbiana (Conagua), A estas especies se les denomina macrofitas al utilizar especies de la región se tiene un costo bajo, no necesitan ser climatizadas a la temperatura y estar bien adaptadas a la zona, por lo que dependerá de las especies que se encuentren en el lugar de construcción del humedal, algunas especies son: carrizo, plantas de ornato como el alcatraz entre otras.

Dentro de las especies de fauna identificados en los humedales mexicanos se destaca el pato mexicano, la focha americana en su mayoría, además de otras especies en menor cantidad como la sora. (HERNANDEZ-COLINA & YADEUN, 2018).

Humedales artificiales en México

- **Las arenitas en Baja california**

Está ubicada en el kilometro 23 de la carretera Mexicali-San Felipe en Baja California, mide 97 hectáreas y puede llegar a tratar un afluente de 880 L/s, beneficia a casi 880 mil 364 personas de las localidades aledañas (Pineda, 2021).

El humedal de las arenitas trata de manera natural el agua contaminada, generando la proliferación de flora, y fauna en la localidad, ayudando a las especies endémicas y a algunas que se encuentra en peligro de extinción (González, 2022).



Imagen 2. Humedal las arenitas fuente: (Campos, 2019).

- **Humedal artificial en San Juan de Aragón**

Ubicado en el Bosque de San Juan de Aragón en la Ciudad de México, tiene la capacidad de tratar 140 mil litros de agua por día, la que se utiliza para riego y protección de la vida silvestre en el parque. Permite un incremento en las especies vegetales lo que permite una mayor captura de CO₂ y con ello, más aporte de O₂ por medio del proceso

fotosintético.



Imagen 3. Humedal de Aragón, Fuente: (UNAM, Gaceta UNAM, 2020).

- **Humedal artificial en Acamixtla, Taxco**

Construida en la comunidad de Acamixtla del municipio de Taxco en el estado de Guerrero, desarrollada para sanear la microcuenca del río San Juan. Su capacidad es tratar 3 L/seg. Sin embargo, el más uso, por verter otro tipo de aguas como la de rastro propicio que las especies de flora murieran y no realizara la función correctamente, actualmente se está trabado para volver a activar este humedal (Chilpancingo, 2016).



Fuente: (Guerrero, 2016)

Los humedales artificiales son una opción viable para el saneamiento de aguas contaminadas en las regiones de México donde se cuente con espacio suficiente para su implementación, utilizando especies de flora y fauna endémicas, además, no requiere de mantenimiento especializado, ayudando a la reutilización de agua residual y un uso sustentable de la misma.

REFERENCIAS

- A. Treviño Cansino, F. C. (2016). Método de diseño reducido para lagunas de estabilización. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.*
- Blázquez, A. T. (2016). Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración.
- Campos, A. (2019). *Tratamiento para vida "Las arenitas"*. Obtenido de <https://www.lavozdelafrontera.com.mx/local/tratamiento-para-la-vida-las-arenitas-3218872.html>
- Chilpancingo, S. d. (22 de 3 de 2016). *Sol de Chilpancingo*. Obtenido de Rehabilitará CAPASEG humedales de Acamixtla con apoyo del IMTA: <https://www.elsoldechilpancingo.mx/2016/03/22/rehabilitara-capaseg-humedales-de-acamixtla-con-apoyo-del-imta/>
- Elizabeth Tilley, L. U. (2018). *Compendio de Sistemas y Tecnologías de Saneamiento*. Banco Interamericano de Desarrollo and Habitat para la Humanidad.
- Elizabeth Tilley, L. U. (2 de 3 de 2023). *SSWM*. Obtenido de <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-tecnologias-de-saneamiento/tratamiento-semi-centralizado/humedal-artificial-de-flujo-vertical>
- EPA. (s.f.). "A HANDBOOK OF CONSTRUCTED WETLANDS."
- EPA. (septiembre de 2000). *Folleto informativo de tecnologías de aguas residuales*. Obtenido de https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/cs_00_023.pdf
- Gibbens, S. (15 de 06 de 2023). *National Geographic*. Recuperado el 15 de 6 de 2023, de <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/que-son-los-humedales-y-por-que-son-tan-importantes-para-la-vida-en-la-tierra>
- González, E. (2022). *La voz de la Frontera*. Obtenido de <https://www.lavozdelafrontera.com.mx/analisis/las-arenitas-7684003.html#!>
- Guerrero, G. d. (22 de 3 de 2016). *El regional de la Costa*. Obtenido de <https://elregionaldelacosta.com.mx/regiones/zona-norte/8115-rehabilitara-capaseg-humedales-de-acamixtla-con-apoyo-del-imta.html>
- I. Arias, A. C. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*.
- M. Romero-Aguilar, A. C.-C.-S.-H. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Rev. Int. Contam. Ambient.*

Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2016). Four Billion People Facing Severe Water Scarcity. *Sci. Adv.*, 2.

México, G. d. (2015). *Norma Mexicana*. Obtenido de ANÁLISIS DE AGUA - MEDICIÓN DE SÓLIDOS Y SALES DISUELTAS EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS – MÉTODO DE PRUEBA: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166146/nmx-aa-034-scfi-2015.pdf>

Pineda, J. A. (03 de 01 de 2021). *México Travel Chanel*. Obtenido de Conoce el humedal artificial que purifica el agua contaminada en Baja California - México TravelChannel (mexicotravelchannel.com.mx)

Rural, S. d. (02 de Febrero de 2022). *Gobierno de México*. Recuperado el 14 de 05 de 2023, de <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/los-humedales-de-mexico-belleza-y-riqueza-de-enorme-importancia-145780>

s. (s.f.).

Sela, G. (s.f.). *Cropaia*. Recuperado el 8 de 07 de 2023, de <https://cropaia.com/es/blog/lodos-activados/>

T. F. Cortés Martínez, A. T. (2014). Objective function in the desing of the facultative lagoon (case study). *Rev. Mex. Cienc. Agríc.*

UNAM. (02 de 2020). *Gaceta UNAM*. Obtenido de <https://www.lavozdelafrontera.com.mx/local/tratamiento-para-la-vida-las-arenitas-3218872.html>

UNAM. (23 de 05 de 2023). *Ecotec*. Obtenido de Humedales Artificiales – Unidad de Ecotecnologías, UNAM, Campus Morelia

Vera-Puerto Ismael, M. S. (2000). Consideraciones para la eliminación de nitrógeno en humedales artificiales. *Tecnología del agua*, 40-49.