



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL

**PROYECTO DE HUMEDAL PARA LA ZONA
DE SAN BALTAZAR TETELA, PUEBLA**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRA EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**PRESENTA
Q.F.B. OLIVIA MARGARITA CHÁVEZ LÓPEZ**

**DIRECTORA DE TESIS:
DRA. ERIKA MÉNDEZ ALBORES**

PUEBLA, PUE.

MARZO 2014

Resumen

Muchas localidades del estado de Puebla descargan sus aguas residuales sin ningún tipo de tratamiento a los cuerpos receptores naturales, lo que provoca un grave deterioro al ambiente debido a la eutrofización que se origina causando con ello la muerte de flora y de fauna ahí existente. Aunado a ello, la mayoría de las plantas tratadoras de agua existentes en el estado, no operan eficientemente o lo dejan de hacer debido a los altos costos de operación y mantenimiento. Por lo anterior, el presente trabajo propone un tren de tratamiento donde el sistema principal sea de bajo costo de inversión y bajo costo de operación y mantenimiento, como lo es un humedal artificial de flujo subsuperficial. Como caso de estudio se presenta el proyecto de Humedal para la localidad de San Baltazar Tetela, Puebla con la finalidad de tratar el agua residual antes de ser vertida a la presa Manuel Ávila Camacho (Lago de Valsequillo), empleando, en el diseño del humedal información del INEGI, CNA y otros autores.

Aunque la fuente principal de que el lago de Valsequillo esté contaminado es debida a las descargas sin control de aguas residuales que conduce en su mayoría el río Atoyac, con esta propuesta se pretende dar a conocer a la sociedad interesada, la posibilidad de implementar un tratamiento de aguas residuales de bajo costo y redituable como son los humedales artificiales en las localidades aledañas a la presa de Valsequillo. El cumplimiento de esta meta se hará a través de la implementación de esta tecnología en la localidad de San Baltazar Tetela como punto de inicio, de manera que funcione con plantas nativas de la localidad sin el uso de sistemas de bombeo con la intención de sanear o bajar los niveles de carga orgánica de sus aguas residuales antes de verterlo al lago.

Abstract

Wastewater of several rural towns in Puebla, Mexico located around the natural reservoir such as the dam Manuel Ávila Camacho (Lago de Valsequillo) is discharged in this lake without any pre-treatment. It situation represent a big environmental problem because the lagoon suffers eutrophication which damage the flora and fauna present in this reservoir. Also, some treatment plants of wastewater that exist in the region don't work very well or simply their maintenance is costly. For that reason, in this project is proposed a treatment with low cost and minimal maintenance to treat the wastewater of San Baltazar Tetela, town that are near or the dam Manuel Ávila Camacho (Lago de Valsequillo), before to discharge its wastewater to the lake. An artificial subsurface flow wetland in a treatment train will be proposed such as treatment system to provide a cheap solution to protect this lake habitat in the future. Also, the constructed wetlands are widely recommended in order to treat the residual domestic water in small communities and towns that cannot afford traditional treatment system with high operational costs.

The wetland design is based according to results from the literature, with the purpose of diminishing the organic level at the end of the process.

Índice de Contenido

	Pág.
Índice de Figuras.....	7
Índice de Tablas.....	9
Lista de abreviaturas.....	10
1. Introducción.....	11
2. Justificación.....	12
3. Objetivos.....	14
3.1 Objetivo General.....	14
3.2 Objetivos Particulares.....	14
4. Fundamentación.....	15
4.1 Problemática del Saneamiento en México y el estado de Puebla.....	15
4.2 Sistemas de Tratamiento de Aguas Residual.....	17
4.2.1 Tratamiento Primario.....	17
4.2.2 Tratamiento Secundario.....	18
4.2.3 Tratamiento Terciario.....	18
4.3 Humedales.....	21
4.3.1 Definición.....	21
4.3.2 Clasificación.....	21
4.3.2.1 Humedales naturales.....	21
4.3.2.2 Humedales Artificiales o Construidos.....	23
4.3.2.2.1 Sistemas de flujo Subsuperficial (FS).....	24
4.3.2.2.3 Sistemas de flujo libre superficial (FLS).....	28
4.3.2.2.3 Humedales de Flujo Vertical.....	32
4.3.3 Tipo de alimentación.....	32
4.3.3.1 Alimentación por lote.....	32
4.3.3.2 Alimentación por flujo intermitente.....	33
4.3.3.3 Alimentación de flujo continuo.....	33
4.3.4 Plantas Acuáticas empleadas en los humedales.....	34
4.3.4.1 Función de las plantas.....	34

4.3.4.2	Clasificación de las Plantas Acuáticas.....	36
4.4	Aspectos Técnicos en la construcción de un humedal.....	38
4.4.1	Preparación del Sitio.....	38
4.4.1.1	Conformación del terreno y bordos	38
4.4.1.2	Impermeabilización	39
4.4.1.3	Medio Granular.....	41
4.4.1.4	Selección del medio.....	42
4.4.1.5	Selección de Plantas.....	43
4.4.1.6	Siembra de Plantas.....	44
4.5	Proceso de Remoción de contaminantes.....	45
4.5.1	Remoción del Nitrógeno.....	49
4.5.1.1	Nitrificación.....	50
4.5.1.2	Desnitrificación.....	50
4.5.2	Reducción de Sulfatos	51
4.5.2.1	Interacción de la transformación del sulfuro con otros procesos.....	52
5.	Caso de estudio	53
5.1	Problemática de la Localidad de San Baltazar Tetela.....	53
5.2	Tratamiento del agua	58
5.2.1	Características del agua residual.....	58
5.2.2	Propuesta del tren de tratamiento.....	59
5.3	Consideraciones para el diseño del humedal subsuperficial.....	60
5.3.1	Ubicación	60
5.3.2	Selección de Plantas.....	61
5.3.3	Datos de Diseño	63
5.3.4	Dimensionamiento	64
5.3.4.1	Calculo de población para el diseño	64
5.3.4.2	Determinación de la dotación de Agua Potable.....	65
5.3.4.3	Calculo de Gastos	65
5.4	Operación inicial del humedal	66
6.	Conclusiones	66
7.	Recomendaciones y perspectivas.....	67

8.	Anexos	69
8.1	Anexo 1. Cálculo de la población por diferentes métodos matemáticos	69
9.	Bibliografía	72

Índice de Figuras

	Pág.
Figura 1. Humedales construidos en la República Mexicana.....	20
Figura 2. Clasificación de Humedales Construidos (15).....	24
Figura 3. Humedal de Flujo <i>Subsuperficial</i>	25
Figura 4. Vegetación emergente más empleada en los humedales (18).....	27
Figura 5. Humedal de Flujo Libre Superficial (FLS).....	29
Figura 6. Plantas acuáticas comunes empleadas en los humedales.....	36
Figura 7. Membrana plástica colocada en un humedal.....	40
Figura 8. Malla electrosoldada.....	40
Figura 9. Colocación del medio granular.....	41
Figura 10. Medio de soporte de grava antes de la plantación.....	43
Figura 11. a) Siembra de Plantas Emergentes y b) Siembra de plantas flotantes.....	44
Figura 12. Proceso de remoción de contaminantes en un humedal.....	45
Figura 13. Ubicación de San Baltazar Tetela y la presa de Valsequillo.....	54
Figura 14. (a) Provincia Fisiográfica del Eje Neovolcánico y (b) Zonificación geológica regional de la localidad.....	55
Figura 15. Zonas de descargas localizadas a lo largo de la presa Manuel Ávila Camacho o lago de Valsequillo (a,b,c,d) descargas 1,2,3 y 4.....	56
Figura 16. Embarcadero de la presa Manuel Ávila Camacho donde se observa con mayor claridad el problema de eutrofización.....	57
Figura 17. Esquema del tren de tratamiento propuesto en este proyecto para tratar el agua residual de San Baltazar Tetela, Puebla.....	59
Figura 18 Posible ubicación del tren de tratamiento, en la zona de San Baltazar Tetela.....	61

Figura 19.	Plantas comúnmente empleadas en humedales construidos, que crecen en forma natural en San Baltazar Tetela.....	62
Figura 20.	Cálculo de la población por el método aritmético.....	69
Figura 21.	Cálculo de la población por el método geométrico aritmético....	70
Figura 22.	Cálculo de la población por el método logarítmico.....	71

Índice de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Inventario nacional de plantas municipales de tratamiento de aguas residuales en operación (11).....	16
Tabla 2. Plantas municipales de tratamiento de aguas residuales en operación, en el País (4).....	19
Tabla 3. Plantas municipales de tratamiento de aguas residuales en operación en el estado de Puebla.....	19
Tabla 4. Características usuales del medio para los humedales de flujo subsuperficial (12).....	27
Tabla 5. Ventajas y Desventajas de los Humedales de Flujo Superficial y Flujo Subsuperficial.....	31
Tabla 6. Plantas más empleadas en los humedales.....	37
Tabla 7. Resumen de los principales mecanismos de remoción y transformación en humedales artificiales para los constituyentes importantes en las aguas residuales.....	46
Tabla 8. Características del agua proveniente de las descargas de San Baltazar Tetela vs Norma 001-SEMARNAT-1996.....	58
Tabla 9. Características de la planta seleccionada para el humedal propuesto para la localidad de San Baltazar Tetela.....	62
Tabla 10. Parámetros empleados para diseñar el humedal en San Baltazar Tetela.....	63
Tabla 11. Parámetros calculados para el diseño del humedal.....	64
Tabla 12. Métodos matemáticos empleados para calcular el tamaño de población.....	65
Tabla 13. Cantidad de gasto (en litros por segundo) para el diseño del humedal.....	65

Lista de abreviaturas

AMD	Residuos ácidos de las minas
CEC	Capacidad de intercambio cationico
Ce	Concentración de DBO en el efluente
Co	Concentración de DBO en el influente
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
EPA	Enviromental Protection Agency
FS	Sistemas de flujo Subsuperficial
FLS	Sistemas de flujo libre superficial
THR	Tiempo de retención
HLR	Carga hidráulica
HPDE	Polietileno de alta densidad
LDPE	Polietileno de baja densidad
MSNM	Metros sobre el nivel del mar
PVC	Policloruro de vinilo
PAD	Polietileno de alta densidad
SST	Sólidos suspendidos totales

1. Introducción

En México, como en otros países con economías emergentes, alrededor del 50 % de las aguas residuales se descargan a los cuerpos receptores sin ningún tratamiento. Provocando el deterioro de ríos y con ello el daño al medio ambiente.

Los humedales artificiales ó construidos ofrecen una opción factible para resolver, dichos problemas de contaminación debido a los bajos costos de mantenimiento y operación. Además de que son una tecnología muy atractiva desde el punto de vista económico y técnico, ya que se logra reducir los contaminantes presentes en el agua.

Los humedales artificiales se basan principalmente en la actividad bioquímica de los microorganismo y consideran la entrada de oxígeno fotosintético al sistema a través de las raíces de las planta. Además, toman en cuenta la presencia de un material inerte empacado que sirve de soporte tanto para los microorganismos como para las plantas hidrofitas empleadas (2).

Estos humedales se diseñan básicamente para el tratamiento de caudales pequeños (comunidades menores de 5,000 habitantes) o gastos entre 3 y 6 L s⁻¹ por módulo, por lo que esta tecnología puede aprovecharse para el tratamiento de las aguas residuales generadas en áreas rurales (3).

Como se mencionó anteriormente, los humedales son sistemas de tratamiento apropiados para poblaciones pequeñas, por lo que en este proyecto se propone un tratamiento basado en humedales artificiales para sanear el agua residual doméstica proveniente de la localidad de San Baltazar Tetela ubicada en la zona conurbada del municipio de Puebla antes de ser vertido a la presa Manuel Ávila Camacho (Lago de Valsequillo), empleando plantas nativas de la localidad.

2. Justificación

El agua es un recurso no renovable, esencial para todos los seres vivos. El decremento de la calidad del agua, es muy grave y ocasiona deterioro medioambiental y socioeconómico.

En nuestro Estado como en muchos otros de la República, se han construido infinidad de plantas de tratamiento, con la finalidad de detener el deterioro de los cuerpos de agua.

Existen dos tipos de tecnologías empleadas en el tratamiento de agua: los sistemas convencionales y los naturales. Los sistemas convencionales requieren energía externa para funcionar, mientras que los sistemas naturales funcionan con energía tomada de los procesos naturales que en el mismo sistema ocurren.

En los sistemas convencionales se utiliza energía externa que es aplicada para acelerar la velocidad de las reacciones físicas, químicas y bioquímicas, de manera que el tratamiento del agua se acelera y tiene lugar en pocas horas o días. Este tipo de sistemas emplean poca superficie de tratamiento, pero tienen una considerable demanda energética y un elevado costo de operación y mantenimiento. Dentro de estos sistemas se encuentran los tratamientos secundarios, fangos activados, filtros percoladores, etc.

En los sistemas naturales, la depuración tiene lugar según el ritmo de crecimiento natural de microorganismos, vegetación y fauna. Estos sistemas funcionan con energía disponible del medio ambiente. Necesitan mayor superficie para alcanzar el mismo grado de depuración que los sistemas convencionales por lo que necesitan mayores extensiones de terreno, en nuestro país es en pequeños núcleos poblacionales donde se dispone de suficiente terreno para su ubicación.

Dada la problemática ecológica y económica que enfrenta el país, en cuanto a la contaminación de cuerpos receptores de agua, se debe promover el uso de tecnologías de saneamiento, basadas en los recursos disponibles en el medio ambiente (recursos

naturales), tecnologías que aprovechen la alta luminosidad solar, la temperatura que aporta cada estación del año, el uso de las plantas nativas del país y microorganismos útiles para degradar los contaminantes.

Las tecnologías naturales ofrecen, además de sanear las aguas negras, la no contaminación del entorno en etapas posteriores al tratamiento de ellas, como sucede con algunas plantas convencionales, las cuales transfieren la contaminación del agua al suelo y aire.

La utilización de sistemas de tratamientos de bajo costo que no requieren de mantenimiento ni entrenamiento especial para los operadores, y que además sean eficientes para la remoción de contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos mediante procesos naturales, representan una oportunidad para sanear comunidades que no cuentan con recursos suficientes para emplear tratamientos convencionales.

Una de las tecnologías que cumple con los dos propósitos anteriores y que además, se pueden implementar en pequeñas comunidades son los **humedales**, útiles para tratar el agua residual doméstica de forma eficiente usando principalmente la energía del sol, el metabolismo de las plantas y microorganismos.

Por lo anterior, en este trabajo se propone el diseño de un humedal para tratar el agua residual urbana proveniente de la localidad de San Baltazar Tetela, comunidad pequeña próxima a la Ciudad de Puebla, aprovechando plantas que crecen de manera natural en esta zona y que son útiles en los humedales. El problema con esta comunidad es que realiza sus descargas de aguas residuales sin ningún tratamiento previo a la Presa que rodea la es la “Manuel Avila Camacho”.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Diseñar un humedal de flujo subsuperficial en tres celdas dentro de un tren de tratamiento con fundamentos operacionales y técnicos para tratar el agua residual doméstica de la localidad de San Baltazar Tetela, Puebla antes de ser vertido a la Presa Manuel Ávila Camacho (Lago de Valsequillo), tomando datos referenciados de trabajos anteriores.

3.2 Objetivos Particulares

- a) Determinar la problemática de saneamiento de aguas residuales domésticas de San Baltazar Tetela, Puebla.
- b) Diseñar un tren de tratamiento para limpiar el agua residual doméstica antes de verterlo a la Presa Manuel Ávila Camacho (Lago de Valsequillo).
- c) Fundamentar operacionalmente y técnicamente el humedal de flujo subsuperficial incluido en el tren de tratamiento.
- d) Contemplar ciertos parámetros químicos como DBO_5 , nitrógeno y fósforo total de trabajos anteriores para evaluar el desempeño del humedal de flujo subsuperficial propuesto.

4. Fundamentación

4.1 Problemática del Saneamiento en México y el estado de Puebla.

Las diferentes descargas de aguas residuales provenientes tanto de centros de población como de industrias, ejercen una severa presión en los cuerpos de aguas superficiales de México. Las grasas, hidrocarburos y nutrientes en exceso constituyen factores que determinan la calidad de agua del país. Aunado a esto, el fenómeno de eutrofización, originado por los enormes volúmenes de material orgánico que se descargan directamente en ríos y embalses, afecta de manera considerable a los cuerpos de agua y favorece la proliferación de maleza acuática.

El Gobierno Federal ha promovido la construcción de plantas de tratamiento municipales que permiten la depuración de las aguas residuales para que sean descargadas en condiciones que no alteren el equilibrio ecológico de los cuerpos superficiales de agua.

De acuerdo con la información publicada por la Comisión Nacional del Agua en diciembre de 2013, señala que existen en el país 2,530 plantas en operación formal, con una capacidad total instalada de $60\,532\text{ L s}^{-1}$ (11).

En el estado de Puebla, según inventario de la Comisión Estatal de Agua y Saneamiento del año 2013 se cuantificó la existencia de 66 plantas de tratamiento instaladas (Tabla 1). Sin embargo, se ha observado que muchas de estas plantas se encuentran fuera de operación ante la imposibilidad de los municipios de cubrir los costos de operación.

Tabla 1. Inventario nacional de plantas municipales de tratamiento de aguas residuales en operación (11).

Entidad Federativa	En operación			
	Nº de plantas	Capacidad instalada (l/s)	Caudal tratado (l/s)	Cobertura de tratamiento (%)
Aguascalientes	132	4 783	3 352	100.0
Baja California	37	7 532	5 222	93.0
Baja California Sur	25	1 672	1 173	70.8
Campeche	26	175	147	6.8
Chiapas	40	1 584	900	23.1
Chihuahua	162	9 384	6 549	78.0
Coahuila de Zaragoza	20	4 957	3 858	48.2
Colima	56	1 866	1 356	53.3
Distrito Federal	28	6 771	3 063	14.0
Durango	174	4 452	3 396	73.2
Guanajuato	64	6 290	4 634	54.7
Guerrero	57	3 890	3 142	75.0
Hidalgo	14	203	203	7.9
Jalisco	157	7 105	6 277	47.3
México	142	8 962	6 789	29.9
Michoacán de Ocampo	33	3 675	2 856	30.4
Morelos	53	2 861	1 826	27.5
Nayarit	66	2 715	1 809	90.7
Nuevo León	63	17 754	10 623	100.0
Oaxaca	69	1 521	995	39.8
Puebla	66	3 200	2 757	49.0
Querétaro de Arteaga	84	2 293	1 506	46.9
Quintana Roo	35	2 381	1 734	61.6
San Luis Potosí	38	2 510	2 115	60.5
Sinaloa	220	6 269	5 082	77.3
Sonora	83	5 113	3 237	39.0
Tabasco	78	2 113	1 649	21.5
Tamaulipas	45	7 783	5 876	85.6
Tlaxcala	66	1 229	862	51.3
Veracruz	108	7 416	5 614	41.3
Yucatán	28	491	99	2.7
Zacatecas	73	1 195	1 049	25.5
Total Nacional	2 342	140 142	99 750	47.5

FUENTE: Conagua/SGAPDS/Gerencia de Potabilización y Tratamiento

4.2 Sistemas de Tratamiento de Aguas Residual

Los contaminantes presentes en el agua residual pueden eliminarse por medios físicos, químicos y biológicos. Los métodos individuales de tratamiento se clasifican normalmente en:

- a) Operaciones físicas unitarias: son métodos de tratamiento en los que predomina la aplicación de fuerzas físicas.
- b) Procesos químicos unitarios: son métodos de tratamiento en los cuales la eliminación o conversión de los contaminantes es provocado por la adición de compuestos químicos o por otras reacciones químicas.
- c) Procesos biológicos unitarios: son métodos de tratamiento en los cuales se consigue la eliminación de contaminantes por una actividad biológica.

Estas operaciones y procesos unitarios se agrupan conjuntamente para constituir lo que se conoce como tratamiento primario, secundario y terciario (o avanzado), donde el conjunto de dos o tres arman un tren de tratamiento. El primario se refiere a operaciones físicas unitarias, el secundario hace referencia a los procesos químicos y biológicos y el terciario consiste en combinaciones de los tres anteriormente mencionados o más especializados.

4.2.1 Tratamiento Primario

Esta etapa permite realizar la remoción de la materia flotante o la sedimentable. Todos los procesos que se emplean aplican principios físicos. Entre las operaciones que se utilizan se incluye la remoción de arena, cribado, trituración y sedimentación.

4.2.2 Tratamiento Secundario

Esta etapa se basa en la oxidación biológica, reproduciéndose el proceso de degradación que ocurre en la naturaleza. El objetivo principal es remover la DBO₅ soluble (demanda bioquímica de oxígeno al quinto día), así como los sólidos suspendidos que no son eliminados durante el tratamiento primario. Los métodos que se emplean comúnmente son los lodos activados, filtros rociadores y lagunas de oxidación.

Dentro de este tipo de tratamientos tenemos ubicados a los humedales, aunque en algunos casos se les ha utilizado en tratamientos avanzados para la eliminación de fósforo, nitrógeno, metales y componentes orgánicos refractarios (12).

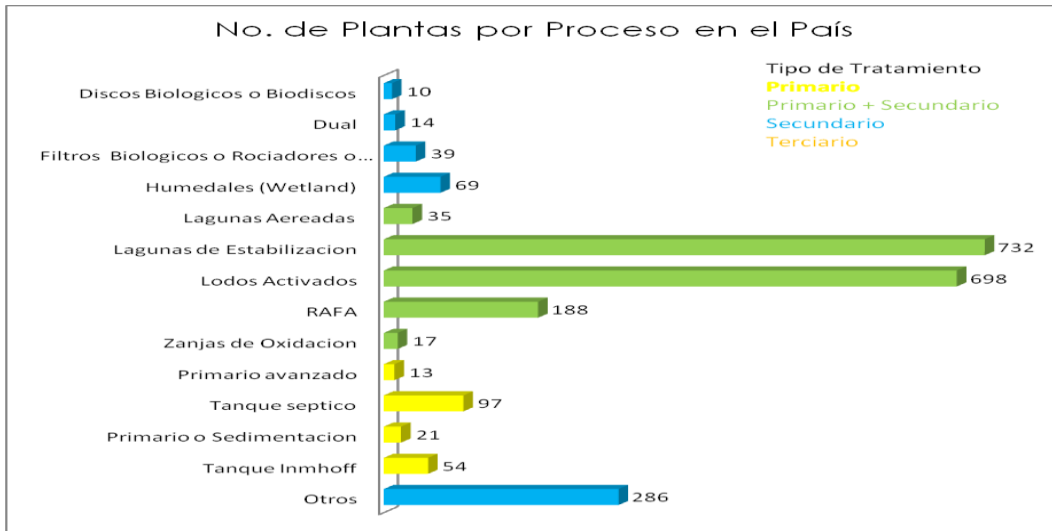
4.2.3 Tratamiento Terciario

El tratamiento terciario constituye la etapa más avanzada del tratamiento de aguas residuales e incluye varios procesos químicos.

Los métodos terciarios, que generalmente se basan en procesos químicos primarios, pueden remover la mayor parte de los contaminantes, produciendo un efluente adecuado para las necesidades de la industria. Ejemplos de ello son la filtración, adsorción, oxidación química, electrodiálisis, intercambio de iones y osmosis inversa.

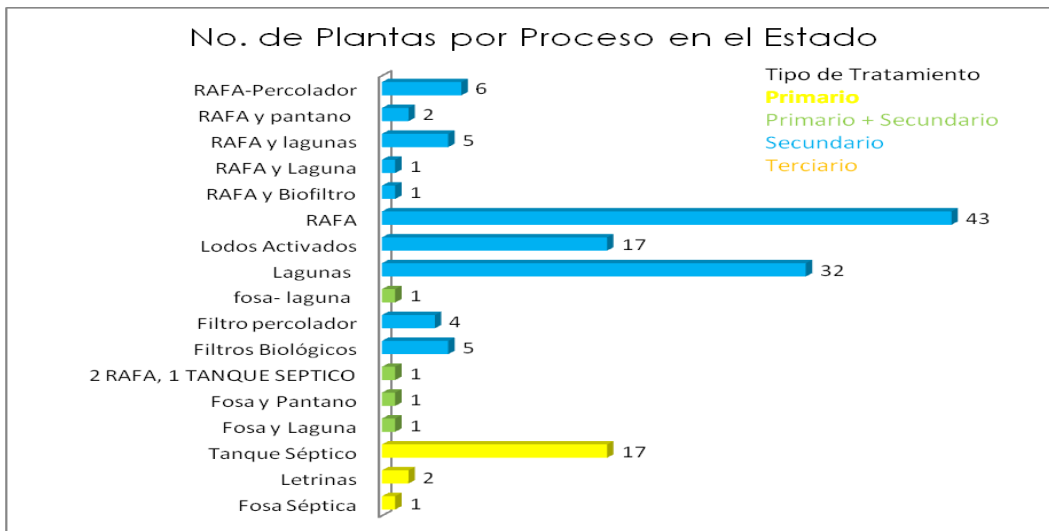
Al respecto, y de acuerdo al inventario nacional de plantas de tratamiento, las plantas tratadoras en el país se clasifican de acuerdo a su operación en primarias, secundarias y terciarias (Tabla 2). En Puebla, de acuerdo al inventario realizado por la Comisión Estatal de Agua y Saneamiento, de las plantas de tratamiento existentes (Tabla 3), únicamente de 140 de ellas se conoce el proceso de tratamiento.

Tabla 2. Plantas municipales de tratamiento de aguas residuales en operación, en el País
(11).



FUENTE: Conagua/SGAPDS/Gerencia de Potabilización y Tratamiento

Tabla 3. Plantas municipales de tratamiento de aguas residuales en operación en el
Estado de Puebla



FUENTE: Comisión Estatal de Agua y Saneamiento de Puebla. Inventario de Plantas de Tratamiento en el Estado de Puebla 2012.

De las Tablas 2 y 3 se puede observar que en la actualidad, de las 2180 plantas instaladas en el país únicamente 69 son humedales o una combinación de estos con tratamientos primarios. Además, en el Estado de Puebla como se observa en la Tabla 3 no existen humedales para el tratamiento de las aguas residuales.

Por otra parte, en la Figura 1, se observa el crecimiento que ha tenido la construcción de humedales para el tratamiento de aguas residuales en la república mexicana desde el 2004 hasta el 2012, observándose que su empleo ha sido constante, incrementándose únicamente en el 2008 (3-11).



Figura 1. Humedales construidos en la República Mexicana (3-11).

4.3 Humedales

4.3.1 Definición

Los humedales son áreas de tierra inundados, durante parte o todo el año debido a su ubicación. Históricamente los humedales han sido llamados pantanos, marismas ciénegas, etc., dependiendo de la ubicación de las condiciones del agua y el entorno geográfico. Además, los humedales tienen una mayor tasa de actividad biológica que la mayoría de los ecosistemas. Estos pueden transformar muchos de los contaminantes comunes que se producen en el agua residual en subproductos inofensivos o nutrientes esenciales que se pueden utilizar para la productividad biológica (13).

Estas transformaciones se llevan a cabo en la superficie del humedal con la energía ambiental del sol, el viento, el suelo, las plantas y los animales, los cuales pueden obtenerse por un costo relativamente bajo de tuberías, bombas y pocas estructuras y no necesitan costosos sistemas de mantenimiento y operación (13).

Los humedales pueden ser usados tanto para tratamientos de aguas residuales, como para provisión de un nuevo hábitat para aves acuáticas y otras formas de vida. De igual modo con estos lechos se puede prevenir la eutrofización de cuerpos receptores.

4.3.2 Clasificación

4.3.2.1 Humedales naturales.

En los últimos años se han reconocido las múltiples funciones y valores de los humedales naturales. Estos sistemas debido a la gran cantidad de luz, agua y nutrientes, juntamente con la presencia de unas plantas que han desarrollado adaptaciones morfológicas y bioquímicas, se encuentran entre los sistemas más productivos del mundo. La alta productividad de estos sistemas da como resultado una elevada productividad microbiana aunada con una gran capacidad para descomponer la materia orgánica.

Los humedales naturales son áreas que quedan inundadas periódicamente y donde la profundidad es suficiente para que vivan las plantas propias de los suelos naturales. Generalmente son áreas de transición entre los sistemas acuáticos y los terrestres (13). Sin embargo; los humedales varían mucho a causa de las diferencias en suelos, topografía, clima, hidrológica, composición química del agua, vegetación y otros factores incluyendo la influencia humana.

Existen cinco tipos principales de humedales: (14)

1. **Marinos** (humedales costeros, inclusive lagunas costeras, costas rocosas y arrecifes de coral).
2. **Estuarinos** (incluidos deltas, marismas de marea y manglares);
3. **Lacustres** (humedales asociados con lagos);
4. **Ribereños** (humedales adyacentes a ríos y arroyos); y
5. **Palustres** (es decir, "pantanosos" - marismas, pantanos y ciénagas).

Las interacciones de los componentes físicos, biológicos y químicos, como los suelos, el agua, las plantas y los animales, hacen posible que los humedales desempeñen muchas funciones, por ejemplo:

- almacenamiento y purificación de agua
- protección contra tormentas y mitigación de crecidas
- retención de nutrientes
- estabilización de las condiciones climáticas locales, particularmente lluvia y temperatura
- estabilización de costas y control de la erosión

De esta manera, muchos humedales contribuyen a la recarga de acuíferos subterráneos que almacenan 97% de las aguas dulces no congeladas del mundo y que en muchos casos son la única fuente de agua potable para millones de personas (14).

Además, más de 40% de las especies de flora y fauna del mundo y 12% de todas las especies animales se encuentran en los humedales de agua dulce donde algunas de ellas son endémicas, es decir, no habitan en ninguna otra parte del mundo. De esta manera, es posible encontrar humedales desde la tundra hasta el trópico y en todos los continentes exceptuando la Antártida.

4.3.2.2 Humedales Artificiales o Construidos

Como ya se mencionó anteriormente, dependiendo de las características de los humedales, éstos permitirán retener sedimentos, nutrientes y elementos tóxicos. Pero a pesar de ello, han sido poco empleados para aprovecharlos como una opción tecnológica para tratar residuos líquidos domésticos e industriales.

Los humedales artificiales o construidos son sistemas de pantanos artificiales que imitan las principales características de los pantanos naturales. Los residuos líquidos a tratar por este sistema deben haber sido pre-tratados por lo menos por un sistema de tratamiento primario.

Esta tecnología es altamente eficiente en la remoción de carga orgánica, y son capaces de producir efluentes con una DBO_5 inferior a 10 mg L^{-1} , parámetro que cumple con las normas más exigentes a nivel mundial. Así mismo, este sistema es muy eficiente en la remoción de sólidos suspendidos, los cuales son atrapados por las raíces de las plantas del pantano artificial para su posterior biodegradación. También es efectivo para remover patógenos y dependiendo del tiempo de residencia del efluente en el pantano, será necesaria o no una desinfección final con cloro o luz ultravioleta (16).

Los humedales artificiales o construidos se clasifican como los que han estado especialmente diseñados para el tratamiento de aguas residuales. Al respecto, la presencia de esta tecnología alrededor del mundo fue originada por una investigación dirigida por el Instituto Max Planck en el Oeste de Alemania, comenzada en el año de

1952 y en el hemisferio oeste durante los setentas. La implementación de esta tecnología en el mundo se aceleró desde 1985 (13).

En China esta tecnología ha sido considerada una de las más importantes tecnologías ecológicas para el tratamiento de aguas (15).

De acuerdo a la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (*Environmental Protection Agency, EPA*), según la forma de circulación del agua, los humedales construidos se pueden clasificar en **humedales de flujo superficial** y **humedales de flujo subsuperficial** (Figura 2).

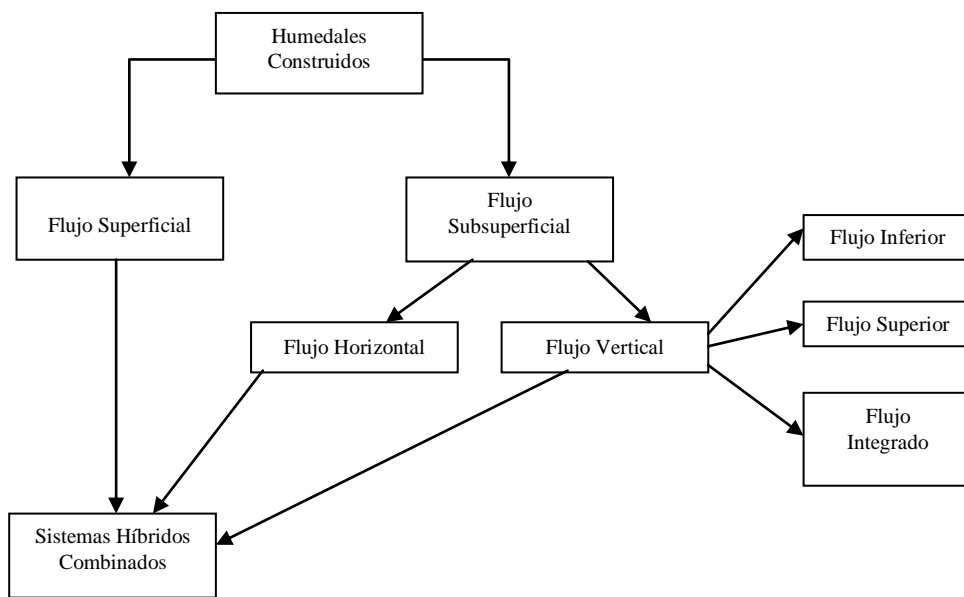


Figura 2. Clasificación de Humedales Construidos (15).

4.3.2.2.1 Sistemas de flujo Subsuperficial (FS)

Un humedal superficial de flujo subterráneo está diseñado específicamente para el tratamiento de agua residual, o como fase final del tratamiento, y está construido en forma de un lecho o canal que contiene un soporte apropiado (17).

Un ejemplo de este tipo de humedales se muestra en la Figura 3.

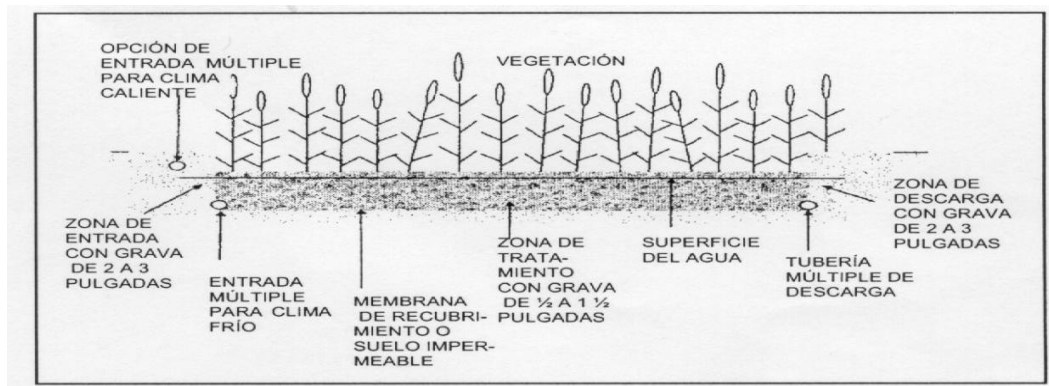


Figura 3. Humedal de Flujo *Subsuperficial* (17)

En Estados Unidos y Europa la grava es el medio de soporte más utilizado comúnmente, aunque también se emplea roca triturada, arena y otros materiales del suelo. En el medio de soporte se plantan los mismos tipos de vegetación emergente presente en las praderas inundadas y el nivel del agua se mantiene por debajo de la superficie del medio.

El nivel subsuperficial del agua previene la aparición de mosquitos y olores, además elimina el riesgo de que el público entre en contacto con el agua residual parcialmente tratada. En humedales naturales y en los humedales artificiales de flujo libre superficial, la superficie del agua favorece la proliferación de mosquitos y el aumento de la evapotranspiración.

Se considera que las reacciones biológicas se deben a la actividad de los microorganismos adheridos a las superficies disponibles de sustrato sumergido, incluyendo las raíces de las plantas que crecen en el medio y la superficie misma del medio.

Este tipo de humedales tiene zonas de oxidación y reducción, pero en conjunto están considerados como sistemas anóxicos. Numerosos factores de diseño pueden influenciar las condiciones redox en estos humedales incluyendo la longitud y la profundidad. En

general, el potencial redox se incrementa de la entrada a la salida (longitud) debido a la progresiva degradación de contaminantes y la filtración mecánica de los sólidos suspendidos. Por otra parte, el potencial redox generalmente disminuye con la profundidad, ya que es más alto en la zona superficial (5-20 cm) posiblemente por la liberación de oxígeno de las plantas y la difusión pasiva del oxígeno. Sin embargo, la variación redox con la profundidad puede estar presente, debido a la mezcla del agua a través de la matriz del humedal. De esta manera, se ha reportado que en humedales superficiales (0.27 a 0.5 m) tienen potenciales redox mas altos que humedales con camas profundas (0.5 – 1.0 m), por lo tanto son más eficientes en la remoción de DQO, DBO, NH₃ y fósforo disuelto reactivo.

Los humedales de flujo subsuperficial incluyen uno o más canales de poca profundidad de fondo recubierto para evitar la percolación a la capa freática susceptible de contaminación, donde el tipo de recubrimiento depende de las condiciones locales. En algunos casos la compactación del suelo local es adecuada, mientras que en otros se debe utilizar membranas plásticas (PVC policloruro de vinilo o PAD polietileno de alta densidad (20)).

Las estructuras de entrada y de descarga se emplean para asegurar la distribución adecuada y la recolección uniforme del agua residual aplicada. El método más utilizado en los sistemas de menor tamaño consiste de una tubería múltiple perforada. La profundidad del medio de estos humedales tiene un rango de 0.3 a 0.9 metros, siendo el valor más común 0.6 m. El tamaño del medio en Estados Unidos va desde la grava fina (≥ 0.6 cm) hasta roca grande triturada (≥ 15.2 cm) y la combinación de tamaños de 1.3 a 3.8 cm es la mas comúnmente usada. Este medio de grava debe ser de piedras limpias, duras y duraderas, con capacidad de retener su forma y la permeabilidad del lecho del humedal a largo plazo (Tabla 4).

Tabla 4. Características usuales del medio para los humedales de flujo subsuperficial (12).

Tipo de Medio	Tamaño efectivo d_{10} mm	Porosidad del efluente, n	Conductividad hidráulica, Pie/d
Arena mediana	1	0.30	1,680
Arena gruesa	2	0.32	3,280
Arena pedregosa	8	0.35	16,400
Grava mediana	32	0.40	32,800
Grava gruesa	128	0.45	328,000

La vegetación emergente más utilizada incluye espadañas y aneas (*Typha spp*), los juncos (*Scirpus spp*) y los carrizos (*Phragmites spp*) (Figura 4).




		
<p>Las aneas (<i>Typha spp</i>) son fuertes, fáciles de propagar, y capaz de producir una biomasa anual grande. Típicamente quitan cantidades grandes del nitrato y del fosfato.</p> <p>(a)</p>	<p>Juncos (<i>Schoenoplectus spp</i>, <i>Scirpus spp</i>) crecen en grupos y crecen bien en agua que tiene una profundidad de 5 cm a 3 m. Estas plantas agresivas logran una eliminación alta de contaminantes.</p> <p>(b)</p>	<p>Carrizos (<i>Phragmites australis</i>) son plantas altas con raíces profundas, que permiten más oxígeno a alcanzar la zona de raíz que las dos plantas descritos previamente.</p> <p>(c)</p>

Figura 4. Vegetación emergente más empleada en los humedales (18).

En Europa los Phragmites (Figura 4-c) son las plantas preferidas para la construcción de humedales ya que tienen varias ventajas como: durabilidad, rápido crecimiento y no son una fuente alimenticia para aves o vida silvestre. Sin embargo, en algunas zonas de los Estados Unidos el uso de Phragmites no está permitido ya que es una planta de crecimiento agresivo, por lo que se tiene preocupación de que infeste humedales naturales, por lo que en estos casos es mejor sustituirlos por espadañas y juncos.

La vegetación en un humedal subsuperficial no es un factor significativo en la remoción de nutrientes y no requiere su poda. En climas fríos, la acumulación de detritos vegetales sobre el lecho de grava proporciona un aislamiento térmico que es útil durante los meses de invierno. Las raíces de las plantas sumergidas proporcionan sustrato para los procesos microbiológicos y dado que la mayoría de las macrofitas emergentes pueden transmitir oxígeno de las hojas a las raíces, se presentan microzonas aeróbicas en la superficie de las raíces y los rizomas. El resto del medio sumergido de los humedales tiende a carecer de oxígeno. La falta de oxígeno limita la remoción biológica del amoníaco en los humedales por nitrificación ($\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{-N}$), y requieren de tiempos largos de retención en una área extensa de humedal para producir niveles bajos de nitrógeno en los efluentes. El sistema es efectivo en la remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno; Sólidos Suspendedos Totales, metales y algunos contaminantes orgánicos, dado que su tratamiento puede ocurrir bajo condiciones aeróbicas y anóxicas. La remoción de nitratos puede ser muy efectiva dado que las condiciones anóxicas requeridas están siempre presentes y se cuenta con suficientes fuentes de carbono (17).

4.3.2.2.3 Sistemas de flujo libre superficial (FLS)

Los humedales artificiales de flujo superficial son sistemas en los cuales el agua se expone a la atmósfera. La mayoría de los humedales naturales son sistemas FLS entre los que se incluyen los fangales (principalmente con vegetación de musgos), zonas pantanosas (principalmente de vegetación arbórea), y las praderas inundadas (principalmente con vegetación herbácea y macrófitas emergentes) (16).

La mayoría de los humedales artificiales FLS son praderas inundadas, pero existen algunos ejemplos de fangales y zonas pantanosas. En los humedales artificiales SFLS el agua fluye sobre la superficie del suelo desde la entrada hasta el punto de descarga. (Figura 5)

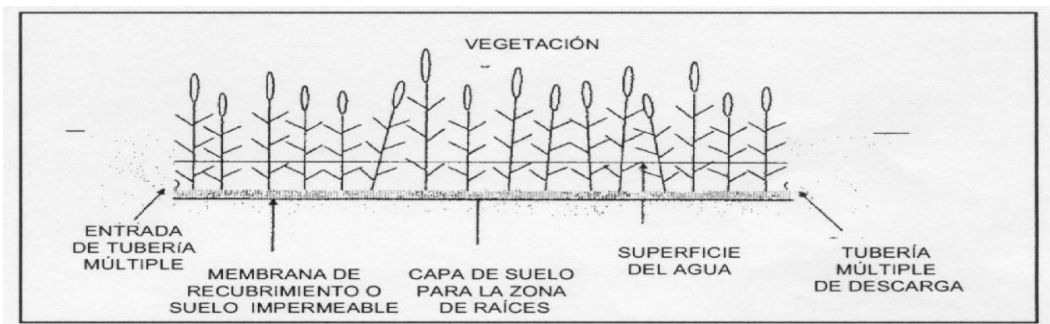


Figura 5. Humedal de Flujo Libre Superficial (FLS) (16)

En Estados Unidos existen estos humedales y se usan normalmente para tratamiento avanzado o refinamiento terciario (16).

El uso de los humedales construidos va desde el dedicado exclusivamente al tratamiento de agua residual hasta sistemas que proporcionan tratamiento avanzado y/o en combinación con mejoras del hábitat de la vida silvestre y para la recreación pública. El tamaño de los sistemas de humedales FLS va desde pequeñas unidades de tratamiento, hasta unidades de más de 16,888 hectáreas.

Los humedales artificiales de Flujo Superficial consisten uno o más canales de poca profundidad que tienen un recubrimiento en el fondo para prevenir la percolación al agua freática susceptible de contaminación, y una capa sumergida del suelo para las raíces de la vegetación macrófita emergente seleccionada. Cada sistema tiene estructuras de entrada y salida de la descarga para asegurar una distribución uniforme del agua residual y su recolección. La vegetación emergente más utilizada en humedales FLS incluye las espadañas (*Thypha spp*), juncos (*Scirpus spp*) y carrizos (*Phragmites spp*). En

sistemas diseñados para tratamiento, únicamente se seleccionan una o dos especies para la siembra (16).

La cubierta vegetal producida por la vegetación emergente da sombra a la superficie del agua y reduce la turbulencia inducida por el viento en el agua que fluye por el sistema. Aún más importantes, son las porciones sumergidas de las plantas vivas, los ramales erguidos de las plantas muertas, y los detritos acumulados del crecimiento vegetal. Estas superficies sumergidas proporcionan el sustrato físico para el crecimiento de organismos perifíticos adheridos, (bacterias zoogleales y filamentosas, protozoos, rotíferos y algas fijadas) que son responsables del tratamiento biológico en el sistema. La profundidad del agua en estos sistemas va desde unas pocas centímetros hasta más de 0.61 metros (16).

El influente se distribuye sobre un área extensa de agua somera y vegetación emergente. La velocidad lenta y el flujo esencialmente laminar proporciona una remoción muy efectiva del material particulado en la sección inicial del sistema. El material particulado, caracterizado por sólidos suspendidos totales, contiene componentes con una demanda bioquímica de oxígeno, nitrógeno total y fósforo total, trazas de metales y compuestos orgánicos más complejos. La oxidación o reducción de esas partículas libera formas solubles de DBO, fósforo total y nitrógeno total al medio ambiente del humedal en donde están disponibles para la absorción por el suelo y la remoción por parte de las poblaciones microbianas y vegetales activas a lo largo del humedal. El oxígeno está disponible en la superficie del agua, en microzonas de la superficie de plantas vivas y superficies de raíces y rizomas, lo cual permite que se produzca actividad aeróbica en el humedal. Sin embargo, la mayor parte del líquido en el humedal SFLS es anóxico o anaerobio (16).

La falta de oxígeno limita la remoción biológica por nitrificación del amoníaco ($\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{-N}$), pero estos humedales son efectivos en cuanto a la remoción de DBO, SST, metales y algunos contaminantes orgánicos dado que su tratamiento puede ocurrir bajo condiciones aeróbicas y anóxicas. Las zonas de mayor profundidad proporciona una superficie de agua expuesta a la atmósfera para la reaireación, la vegetación

sumergida proporciona oxígeno para la nitrificación. Las zonas más profundas también atraen y retienen una gran variedad de vida silvestre, en particular patos y otras aves acuáticas.

Este tipo de tratamiento, es utilizado en diversos estados de Estados Unidos, proporciona un tratamiento excelente durante todo el año en climas cálidos, y en forma estacional en climas más fríos en los cuales se presenta formación de hielo. (16)

El tiempo de retención hidráulico en cada una de estas zonas de superficie de agua expuesta debe limitarse a aproximadamente tres días para prevenir la re-emergencia de algas. Estos sistemas siempre deben iniciarse y terminar en zonas someras de vegetación emergente para asegurar la retención y el tratamiento de material particulado y para minimizar la toxicidad a la vida silvestre en las zonas de agua expuestas. En la Tabla 5 se resume las ventajas y desventajas de los humedales de flujo superficial y subsuperficial.

Tabla 5. Ventajas y Desventajas de los Humedales de Flujo Superficial y Flujo Subsuperficial

Ventajas	
Humedales de Flujo libre Superficial	Humedales de Flujo libre Subsuperficial
No necesitan electricidad, equipos mecánicos y operadores.	
Menor costo en construcción, operación y mantenimiento.	
Son espacios verdes.	
No producen biosólidos.	
Desventajas	
Extensiones grandes de terreno.	
Se llega a acumular con el tiempo fósforo, metales y algunos compuestos orgánicos.	
En climas muy fríos no son factibles económicamente hablando.	
La nitrificación no es muy buena.	
No reduce considerablemente a los coliformes.	
Se producen mosquitos.	----

4.3.2.2.3 Humedales de Flujo Vertical

Este tipo de humedal se considera que es un sistema altamente aeróbico, ya que las aguas residuales drenan verticalmente a través de las plantas, lo que permite condiciones no saturadas y excelente transferencia de oxígeno. No se ha encontrado en la literatura datos sobre mediciones directas redox, pero la evidencia circunstancial sugiere fuertemente que los humedales de flujo vertical tienen alto potencial redox que favorece los procesos microbianos aerobios. Por ejemplo, la eliminación de la DBO y la nitrificación fueron significativamente mayores en flujo vertical en comparación a los humedales de flujo superficial y subsuperficial, pero la desnitrificación es más baja. La medición directa microbiana demuestra que la actividad y la densidad microbiana se maximiza en los primeros 5 – 10 cm en el filtro de flujo vertical.(19)

La influencia del oxígeno liberado por las plantas en los humedales de flujo vertical se considera despreciable, debido a la alta cantidad de oxígeno permeado durante el periodo de drenaje (19).

4.3.3 Tipo de alimentación

4.3.3.1 Alimentación por lote.

Este es un proceso secuencial en el cual el humedal se llena con agua residual por un periodo determinado de tiempo y se drena antes de llenarlo otra vez.

Este tipo de alimentación crea una variación redox, temporal, primero un mayor descenso del potencial redox cuando el agua residual adicionada y el gradual incremento del potencial redox conforme al tiempo y degradación de los contaminantes. Por lo tanto, la alteración entre condiciones de oxidación y reducción puede influir fundamentalmente en poblaciones microbianas favoreciendo la formación de biocapas aerobias facultativas robustas que pueden operar bajo variaciones de concentración de nutrientes y fluctuaciones redox.

En general la alimentación por lotes promueve mayores condiciones de oxidación y un mejor rendimiento en la eliminación de DQO comparada con la alimentación de flujo continuo (19).

4.3.3.2 Alimentación por flujo intermitente

Esta es similar a la alimentación por lote pero no se vacía antes de agregar un lote fresco de aguas residuales al sistema. Se ha demostrado que la alimentación intermitente produce un mayor potencial redox, una mayor eliminación de amonio y menor de sulfatos, que en la alimentación de flujo continuo de un sistema similar. La mezcla de la zona anaeróbica en la parte inferior de la zona húmeda con el aeróbico y los micro-sitios anóxicos en la rizosfera podrían explicar la mayor condición redox. La alimentación intermitente se presume crea una variación temporal redox como en el proceso por lotes así como la variación espacial redox resulta en una eliminación de contaminantes más equitativa a través de todo lo largo del humedal (19).

4.3.3.3 Alimentación de flujo continuo

Esta es la técnica más simple y común, generalmente se produce un potencial redox inferior y recientemente se ha considerado menos eficaz que la alimentación por lotes y la alimentación por flujo intermitente en la eliminación aeróbica de contaminantes. La alimentación por flujo continuo tiende a generar un gradiente espacial, con un mayor potencial redox y menor concentración de contaminantes en una salida del humedal. Por lo tanto, se supone que las comunidades microbianas siguen un patrón similar, con microorganismos seleccionados para prosperar en condiciones de alta carga de nutrientes y condiciones anóxicas cerca de la entrada y los que favorecen baja carga de nutrientes y condiciones aeróbicas hacia la salida.

Independientemente del modo de alimentación, la eliminación de los contaminantes en los humedales construidos depende en gran medida del tiempo de retención hidráulica y

la tasa de carga hidráulica. Estas variables hidráulicas afectan la duración del contacto entre los contaminantes y la población microbiana en el sistema de humedales. Se ha demostrado que el tiempo de retención hidráulica (TRH) genera mayores potenciales redox y una mayor eliminación de contaminantes. Por ejemplo, en un humedal subsuperficial horizontal con una alimentación intermitente, el potencial redox puede variar entre -92 y 103 mV con RTH nominales de 10.1 días, y de -109 a 186 mV cuando el RTH nominal es de 16.1 días. En un experimento de alimentación por lotes, se mostró que el potencial redox y la concentración de DQO varían con el tiempo, con potencial redox alrededor de -150 mV en el primer día y una gama de 0-300 mV, dependiendo de las especies de plantas, después de 20 días (19).

4.3.4 Plantas Acuáticas empleadas en los humedales

4.3.4.1 Función de las plantas

Las plantas son un componente importante en los humedales construidos, ya que estabilizan la estructura superficial del sustrato del humedal. Además, proveen una buena condición para la adsorción física, mejoran el rendimiento hidráulico del sistema, evitan que el sustrato en la superficie se congele en invierno, y mejoran las áreas de superficie para el hábitat de microbios. En muchas regiones se utilizan plantas acuáticas resistentes a la contaminación, como *Phragmites australis* (Cav), *Trin. ex Steud*, *Juncus effusus*, *Nymphaea alba*, *Canna indica*, *Scirpus mariqueter* etc (17).

El papel de las plantas en los sistemas de humedales construidos, viene determinado fundamentalmente por las raíces y rizomas enterrados. Estas plantas denominadas macrófitas, que incluye plantas vasculares que tienen tejidos que son fácilmente visibles, son organismos fotoautótrofos, que recogen la energía solar para transformar el carbono inorgánico de la atmósfera en carbono orgánico. Tienen la habilidad de transferir oxígeno desde la atmósfera a través de las hojas y tallo hasta el medio donde se encuentran las raíces. La mayoría de este oxígeno es usado por la raíz de la planta y su disponibilidad es limitada para la actividad microbiana. Pero parte de este oxígeno puede

crear microambientes aerobios y se pueden producir reacciones aerobias de degradación de materia orgánica y nitrificación.

La profundidad radicular de estas plantas oscilan entre 0,5 m y 1,5 m. Estas especies vegetales tienen una gran capacidad colonizadora mediante rizomas y desarrollan una elevada densidad de tallos para recibir la máxima reserva de agua y asimilación de nutrientes. Sus raíces tienen una gran superficie específica para el asentamiento de colonias bacterianas.

Los efectos que se producen gracias a la presencia de plantas, además del valor estético y el aprovechamiento del espacio para el hábitat de la fauna autóctona son:

a) **Efectos físicos:** estabilizan el medio granular y amortiguan las variaciones de los parámetros ambientales como por ejemplo la velocidad del viento, la intensidad de luz incidente en el lecho y la temperatura.

b) **Efectos sobre la conductividad hidráulica:** la muerte de raíces y rizomas dejan huecos en forma de pequeños tubos que permiten un cierto incremento y estabilización de la conductividad hidráulica del suelo.

c) **Superficie para el crecimiento de microorganismos:** las raíces y rizomas representan un soporte físico sobre el que crecen bacterias y protozoos. Proveen un ambiente adecuado para el desarrollo de estos microorganismos, los cuales transforman y reducen las concentraciones de los contaminantes, ya que las plantas sirven como un sustrato vivo para la actividad microbiana.

d) **Asimilación de nutrientes:** las plantas para su desarrollo requieren nutrientes que obtienen principalmente a través de su sistema radicular. No obstante, las cantidades de nutrientes asimiladas son insignificantes en comparación con las cargas de nutrientes del agua residual y además, si las partes aéreas de las plantas no se siegan periódicamente los nutrientes asimilados vuelven al agua por los procesos de descomposición.

e) **Aporte de oxígeno:** los rizomas liberan oxígeno que influye en las reacciones bioquímicas estimulando la descomposición aeróbica de la materia orgánica y el crecimiento de bacterias nitrificantes.

4.3.4.2 Clasificación de las Plantas Acuáticas

Dependiendo del lugar en donde se desarrollen, dentro del cuerpo de agua, las plantas se pueden clasificar en:

Flotantes: Son plantas que viven en la superficie del agua, tales como el jacintos de agua (lirio acuático) y el chichicastle (lentejas de agua), entre las más usadas.

Emergentes: Plantas que fijan sus raíces al fondo pero crecen lo suficiente para que sus hojas aprovechen la luz fuera del agua, como el tule (espadañas) y el junco. Las hidrofitas emergentes tienen la capacidad de crecer en un amplio intervalo de sustratos y diferentes aguas residuales.

Sumergidas: Se desarrollan exclusivamente dentro del agua por eso se denominan plantas sumergidas (Figura 6).

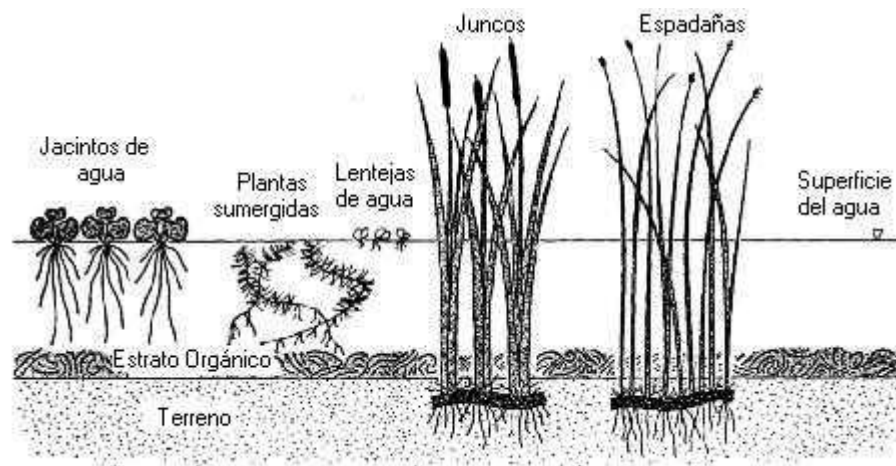


Figura 6. Plantas acuáticas comunes empleadas en los humedales (18).

Una de las funciones más significativas de los humedales es su capacidad de almacenamiento de nutrientes. Esto está directamente relacionado con los tipos de hidrófitas que se encuentren en el humedal (Tabla 6).

Tabla 6. Plantas más empleadas en los humedales (18).

Características de las Plantas	
<p>Thypha o Espadaña crecen bajo diversas condiciones medioambientales, se propaga fácilmente. Produce una biomasa anual grande y tiene un potencial pequeño de remoción de N y P por la vía de la poda y cosecha.</p> <p>Los rizomas plantados a intervalos de aproximadamente 0.60 m pueden producir una cubierta densa en menos de un año. Tiene relativamente baja penetración en grava de 0.30 m por lo que no es recomendable para sistemas de flujo subsuperficial.</p>	 <p><i>Thypha sp.</i> 1996 Kerry Drassler</p>
<p><i>Scirpus validus</i></p>  <p>Soft-stem bulrush Photo by Ann Murray Copyright 1999 University of Florida</p>	<p><i>Scirpus</i> de la familia de las ciperáceas, son perennes y crecen en grupos. Crecen en un rango diverso de aguas interiores y costeras, pantanos salobres y humedales. Los juncos son capaces de crecer bien en agua desde 5 cm a 3 m de profundidad. Las temperaturas deseables son 16-27° C. Pueden crecer en un pH de 4 a 9.</p> <p>Tiene un crecimiento moderado y puede lograr un buen cubrimiento en alrededor de un año con separaciones de 0.3 m. Pueden cubrir en un año con un espaciamiento algo menor (de entre 0.3 y 0.6 m). Penetra en grava aproximadamente 0.6 m por lo que son muy usadas en humedales de flujo subsuperficial. Existen muchas variedades de <i>Scirpus</i>.</p>
<p><i>Phragmites australis</i></p> <p>rizoma perenne extenso. Logran un muy buen cubrimiento en un año, con separación de 0.6 m. Se han utilizado en Europa y han sido la planta acuática emergente más extendida. Los sistemas que utilizan carrizos son más eficaces en la transferencia de oxígeno porque los rizomas penetran verticalmente, y más profundamente que los de las espadañas pero menos que los juncos 0.4m. Se utilizan para humedales artificiales porque tienen la ventaja de que por su bajo valor alimenticio no se ven atacadas por animales como otros tipos de plantas.</p>	 <p><i>Phragmites australis</i></p> <p>Photo by Ann Murray Copyright 1998 University of Florida</p>

La capacidad de almacenamiento en una hidrófita está en función de la velocidad de crecimiento de la planta y el tiempo de cosecha de la biomasa por unidad de área.

Plantas con una gran biomasa por unidad de área, tienen un potencial para almacenar una gran cantidad de nutrientes. Además, poseen una gran capacidad de asimilación de grandes cantidades de trazas de elementos, algunos de los cuales son esenciales para el crecimiento de las plantas. La demanda de estos elementos puede incrementarse cuando las plantas son cultivadas en agua residuales que contienen niveles altos de macronutrientes (Tabla 6).

Los lirios acuáticos y otras hidrófitas pueden absorber metales como Cu, Zn, Pb, Cd, Hg, Ni. Si las plantas no son cosechadas se presentará la muerte del tejido y éste se descompondrá rápidamente y liberará los nutrientes almacenados dentro del agua.

4.4 Aspectos Técnicos en la construcción de un humedal.

4.4.1 Preparación del Sitio

Las necesidades de preparación del sitio dependen de las características del lugar seleccionado.

Se necesita de una buena preparación del sitio cuando existe vegetación o elementos no deseados como pueden ser árboles, rocas, escombros, etc., los cuales deben ser removidos para permitir la construcción de celdas. Es importante remover todo tipo de obstáculos ya que pueden interferir con la integridad del suelo o con el crecimiento de las plantas (20).

4.4.1.1 Conformación del terreno y bordos

El terreno debe ser nivelado, el material removido puede utilizarse para la nivelación final del lecho o en el levantamiento de los bordos. La nivelación consiste en igualar el fondo de la celda, para optimizar la difusión y la lámina de flujo de aguas residuales dentro del lecho.

Los bordos son construidos en pasos sucesivos de acomodamiento y compactación de suelos, algunas veces se usan redes de alambre para prevenir que algunos animales construyan sus madrigueras y puedan dañarlos; en climas lluviosos es recomendable colocarles una cubierta antes de la nivelación final, ya que se pueden demorar los trabajos de construcción por las condiciones climáticas. La textura del suelo es un parámetro crítico durante la compactación y la construcción de las separaciones internas de las celdas (20).

Los bordos deben ser protegidos de la erosión con la ayuda de paja y/o una cubierta de hierbas, para lo cual se utiliza una mezcla específica de diferentes especies de hierbas que permita su establecimiento aún bajo condiciones climáticas variables. (20)

4.4.1.2 Impermeabilización

Los humedales de flujo subsuperficial están formados mediante la construcción de una celda que contendrá el medio granular y el flujo de agua a tratar. Si el suelo es permeable se necesita recubrir el lecho para prevenir el paso de agua hacia las corrientes subterráneas. El recubrimiento puede ser arcilla, bentonita, asfalto o geomembrana. (12) Se puede utilizar membrana plástica como polietileno de alta densidad (HPDE) o polietileno de baja densidad (LDPE) para impermeabilizar los lechos (Figura 7). La membrana plástica que con mayor frecuencia se utiliza en Europa es Monorflex (polietileno de baja densidad con fibra de vidrio reforzado), la cual tiene 0.5 mm a 0.75 mm de espesor. En algunos casos un plástico más barato puede sustituir al Monorflex (20).

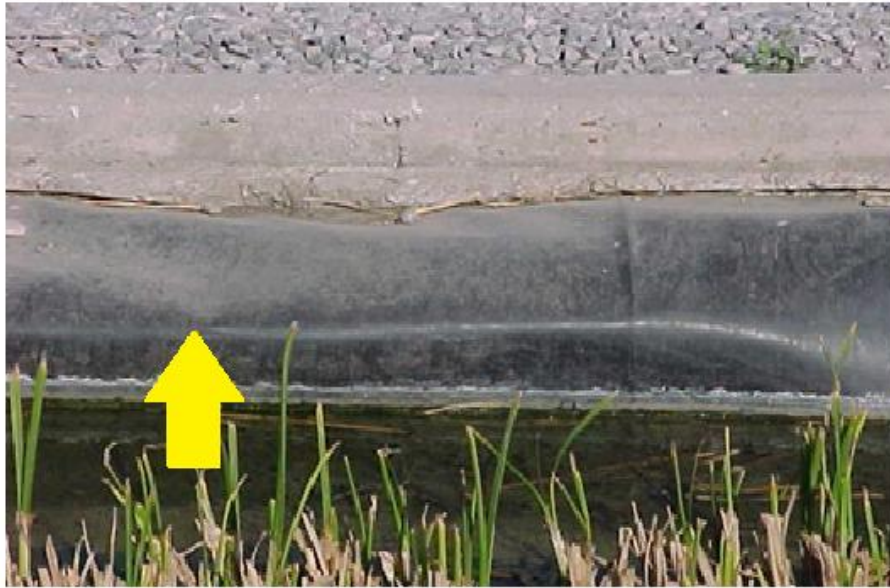


Figura 7. Membrana plástica colocada en un humedal (20).

Un gran número de sistemas han utilizado membranas plásticas hechas de bentonita y geotextil tal como Fibertex. Las Guías Europeas manifiestan que si el suelo local tiene una conductividad hidráulica de 10^{-8} m s^{-1} o menos este puede contener un alto contenido de arcilla y entonces podrá ser utilizado para impermeabilizar el fondo y los bordos del lecho. En algunos sistemas pequeños han sido impermeabilizados con losas de concreto reforzado con malla electrosoldada (Figura 8).



Figura 8. Malla electrosoldada (20).

4.4.1.3 Medio Granular

La principal característica del medio es que debe de tener la permeabilidad suficiente para permitir el paso del agua a través de él. Se utilizan suelos de tipo granular, principalmente gravas finas y bien graduadas con un tamaño máximo de árido de 5 mm aproximadamente y con pocos finos, garantizando así una elevada permeabilidad en estado compacto y una compresibilidad despreciable (Figura 9).



Figura 9. Colocación del medio granular (20).

El medio granular utiliza mecanismos directos e indirectos para la eliminación de agentes contaminantes del agua residual que circula por su interior. El medio es responsable directo de algunas formas de extracción de sustancias contaminantes mediante interacciones físicas y químicas. Para esta extracción la distribución del tamaño de partículas tiene un papel importante: la fracción fina de los limos tiene mucha capacidad de asimilar contaminantes y la fracción arenosa tiene una gran capacidad percoladora pero no elimina contaminantes, ya que estos humedales a grandes rasgos funcionan como filtros horizontales de grava (20).

De forma indirecta, el medio granular también contribuye a la eliminación de contaminantes, ya que sirve de soporte para el crecimiento de las plantas y también, de superficie específica para el desarrollo de colonias de microorganismos que llevarán a

cabo la actividad biodegradadora de la materia orgánica tan relevante en este tipo de sistemas.

El tamaño del medio granular afecta directamente al régimen hidráulico del humedal. Si el lecho granular está constituido por un elevado porcentaje de arcillas y limos, se consigue una mayor capacidad de adsorción y una mejor filtración, ya que la adsorción es alta y el diámetro de los huecos es pequeño. Por el contrario estos materiales presentan una elevada resistencia hidráulica y requieren velocidades de flujo muy bajas, limitando en estas condiciones el caudal afluente capaz de tratar.

En cambio, si el lecho granular está formado por gravas y arenas, disminuye la capacidad de adsorción y el poder filtrador del medio, pero aumenta la conductividad hidráulica. Esta conductividad no depende únicamente de la granulometría del material sino que disminuye debido al desarrollo de raíces y de la biopelícula adherida, la acumulación de sólidos en los huecos y la formación de precipitados (18).

La instalación de una capa de material granular de menor diámetro sobre la superficie del lecho, proporciona una zona más adecuada para el desarrollo de raíces. El resto del medio garantiza el correcto flujo subterráneo del agua.

4.4.1.4 Selección del medio

El medio de soporte que se utiliza en los humedales de flujo subsuperficial es con frecuencia grava (Figura 10) su tamaño oscila entre 3 a 32 mm y en la zona de entrada de largo de 50 mm. La zona de entrada debe tener un medio de diámetro más grande para disminuir el potencial de obstrucción (12)

Se recomienda que la grava sea lavada para remover las partículas finas, las cuales pueden tapar los espacios vacíos. La mayoría de las gravas utilizadas son de sílice de cuarzo.



Figura 10. Medio de soporte de grava antes de la plantación (20).

Todos los lechos de flujo vertical usan capas de grava, usualmente de diferentes tamaños. El conocimiento con respecto a los filtros intermitentes de arena sugiere la utilización de arena limpia y lavada con un tamaño efectivo de 0.2 – 0.5 mm.

4.4.1.5 Selección de Plantas

Para seleccionar el tipo de plantas a utilizar se debe considerar los siguientes puntos (2).

- a) Especies locales
- b) Adaptabilidad al clima local
- c) Adaptabilidad al suelo local
- d) Adaptabilidad a las comunidades de plantas y animales que les rodean
- e) Velocidad de fotosíntesis alta
- f) Capacidad de transportación de oxígeno alta
- g) Tolerancia a concentraciones adversas de contaminantes
- h) Capacidad acumulativa de contaminantes
- i) Tolerancia a condiciones climáticas adversas
- j) Resistencia a insectos y enfermedades
- k) Facilidad de control

La capacidad de asimilación de nutrientes de estas plantas está directamente relacionada con la velocidad de crecimiento, cultivo y composición del tejido.

En humedales construidos, la tendencia general es plantar una sola especie vegetal o como máximo 2 o 3 especies diferentes. La plantación se puede realizar utilizando semillas de las plantas, previamente seleccionadas. Secciones de rizomas, Matorrales o arbustos, Plantas de invernadero.

4.4.1.6 Siembra de Plantas

El sitio de la siembra debe ser labrado y nivelado, el suelo debe estar húmedo para tener un suelo suave y poder plantar.

Generalmente la siembra se realiza a mano, aunque se han aplicado algunas técnicas sofisticadas para plantar (Figura 11).



Figura 11. a) Siembra de Plantas Emergentes y b) Siembra de plantas flotantes.(20).

Se pueden plantar semillas, partes de las plantas (rizomas y tubérculos) y plantas completas. Las plantas pueden ser sembradas durante todos los meses del año (20). Sin embargo, la experiencia en climas extremos indica que es mejor plantar en primavera que en verano, debido a que en invierno existe el riesgo de que las plántulas no crezcan

por las heladas, además de tener el riesgo de problemas severos ocasionados por clorosis. Los retoños que no crecen activamente deben ser reemplazados (20).

La implantación de la vegetación en un humedal artificial es una de las partes fundamentales en la ejecución de proyectos de aguas residuales de este tipo.

4.5 Proceso de Remoción de contaminantes

Los humedales son capaces de proporcionar una alta eficiencia física en la remoción de contaminantes asociados con material particulado. En la Tabla 7 se resumen los principales mecanismos de remoción y transformación en los humedales.

El agua superficial se mueve muy lentamente a través de los humedales, debido al flujo laminar característico y la resistencia proporcionada por las raíces y las plantas flotantes. La sedimentación de los sólidos suspendidos se promueve por la baja velocidad de flujo y por el hecho de que el flujo es con frecuencia laminar en los humedales. Las esteras de plantas en los humedales pueden servir como trampas de sedimentos, pero su rol primario es la remoción de sólidos suspendidos para limitar la resuspensión de material particulado (Figura 12).

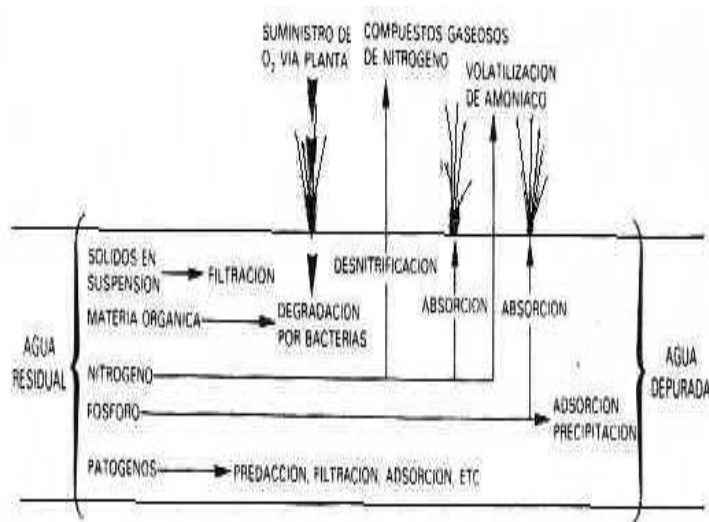


Figura 12. Proceso de remoción de contaminantes en un humedal (18).

Tabla 7. Resumen de los principales mecanismos de remoción y transformación en humedales artificiales para los constituyentes importantes en las aguas residuales (12).

Constituyente	Sistemas de flujo libre	Flujo subsuperficial	Acuáticos flotantes
Compuestos orgánicos biodegradables	Bioconversión por bacterias aerobias, facultativas y anaerobias de las plantas de detritus de la superficie de DBO soluble, adsorción, filtración y sedimentación de la DBO particulada	Bioconversión por bacterias facultativas y anaerobias en las plantas y detritos de la superficie.	Bioconversión por bacterias aerobias facultativas y anaerobias de las plantas y detritos de la superficie.
Sólidos suspendidos	Sedimentación, filtración	Filtración, sedimentación	Sedimentación, filtración
Nitrógeno	Nitrificación/desnitrificación, asimilación vegetal, volatilización	Nitrificación/desnitrificación, asimilación vegetal, volatilización	Nitrificación/desnitrificación, asimilación vegetal, volatilización
Fósforo	Sedimentación, asimilación vegetal	Filtración, sedimentación, asimilación vegetal	Sedimentación, asimilación vegetal
Metales pesados	Adsorción de las plantas y detritos de la superficie, sedimentación	Adsorción de las raíces de las plantas y detritos de la superficie, sedimentación	Adsorción de las raíces de las plantas, sedimentación
Componentes orgánicos traza	Volatilización, adsorción, biodegradación	Adsorción, biodegradación	Volatilización, adsorción, biodegradación
Organismos patógenos	Decaimiento natural, predación, irradiación UV, sedimentación, excreción de antibióticos por parte de las raíces de las plantas	Decaimiento natural, predación, sedimentación, excreción de antibióticos por parte de las raíces de las plantas	Decaimiento natural, predación, sedimentación

Proceso de remoción físico

La eficiencia de remoción de sólidos suspendidos es proporcional a la velocidad de particulado fijo y la longitud del humedal. La sedimentación se considera como un proceso irreversible, resultando en acumulación de sólidos y contaminantes asociados sobre la superficie del suelo del humedal. La resuspensión de sedimento puede resultar en la exportación de sólidos suspendidos y reducir la eficiencia de remoción, la resuspensión es el resultado de la turbulencia de la dirección del viento, bioturbación (perturbación por animales y humanos) desprendimiento de gas. El desprendimiento de gas resulta a partir de gases como el oxígeno, a partir de la fotosíntesis del agua, metano y dióxido de carbono, producido por los microorganismos en el sedimento durante la descomposición de la materia orgánica. (21)

Proceso de remoción biológico

La remoción biológica es quizá el camino más importante para la remoción de contaminantes en los humedales. Los contaminantes que son también formas de nutrientes esenciales para las plantas, tales como nitrato, amonio y fosfato, son tomados fácilmente por las plantas del humedal. Sin embargo, muchas especies de plantas del humedal son capaces de captar, e incluso acumular significativamente metales tóxicos, como cadmio y plomo. Las plantas leñosas, es decir, árboles y arbustos, proporcionan un almacenamiento a largo plazo de contaminantes, comparado con las plantas herbáceas. La velocidad de captación de la contaminante unidad de área de tierra es, mucho más alta para las plantas herbáceas, o las micrófitas. Las algas pueden también proporcionar una cantidad significativa de nutrientes captados, pero son más susceptibles a los efectos tóxicos de metales pesados. Las bacterias y otros microorganismos en el suelo también proveen, captan y almacenan nutrientes a corto plazo, y algunos otros contaminantes.

La lixiviación de contaminantes solubles en agua puede ocurrir rápidamente en la muerte de la planta o del tejido de planta, mientras que una pérdida más gradual de

contaminantes ocurre durante la descomposición del detritus por las bacterias y otros organismos.

En un período extenso de tiempo, la velocidad de descomposición de la materia orgánica es más baja que la velocidad de deposición de la materia orgánica en el suelo, la formación de turba ocurre en el humedal. La turba se puede acumular a grandes profundidades en los humedales, y puede proporcionar el almacenamiento de larga duración para los contaminantes. Sin embargo, la turba es también susceptible a la descomposición si el humedal se drena.

Los descompuestos microbianos, sobre todo bacterias del suelo, utilizan el carbono de la materia orgánica como fuente de energía, convirtiéndola a gases de bióxido de carbono o metano.(21)

Esto proporciona un mecanismo biológico importante para la remoción de una amplia variedad de compuestos orgánicos.

Proceso de remoción químico

El proceso químico más importante de la remoción de suelos del humedal es la absorción, que da lugar a la retención a corto plazo o a la inmovilización a largo plazo de varias clases de contaminantes.

La absorción es un término ampliamente definido para la transferencia de los iones (moléculas con cargas positivas o negativas) a partir de la fase de la solución (agua) a la fase sólida (suelo). La absorción describe realmente un grupo de procesos, que incluye reacciones de adsorción y de precipitación. La adsorción se refiere a la unión de iones a las partículas del suelo, por intercambio catiónico o absorción química.

El intercambio catiónico implica la unión física de los cationes (iones positivamente cargados) a las superficies de las partículas de la arcilla y de la materia orgánica en el

suelo. Esto es una unión mucho más débil que la unión química, por lo tanto, los cationes no se inmovilizan permanentemente en el suelo. Muchos componentes de las aguas residuales y de escurrimiento existen como cationes, incluyendo el amonio y la mayoría de trazas de metales, tales como cobre (Cu^{+2}).

La capacidad de los suelos para la retención de cationes, expresada como capacidad de intercambio catiónico, aumenta generalmente con el aumento de contenido de la arcilla y de la materia orgánica. La absorción química representa una forma más fuerte y más permanente de vinculación que el intercambio catiónico. Un número de metales y de compuestos orgánicos se puede inmovilizar en el suelo vía la absorción química de las arcillas, y los óxidos de hierro (Fe) y aluminio (Al), y materia orgánica. El fosfato también puede unirse con la arcilla y los óxidos de Fe y Al a través de la absorción química. El fosfato puede también precipitarse con los óxidos de hierro y aluminio para formar un nuevo mineral compuesto (fosfatos de Fe y Al), que son potencialmente muy estables en el suelo, produciendo el almacenamiento de fósforo a largo plazo. Otra reacción importante de precipitación que ocurre en los suelos del humedal es la formación de sulfuros de metales.

La volatilización del amoníaco puede dar lugar a la remoción significativa de nitrógeno, si el pH del agua es alto (mayor que 8,5). Sin embargo, a pH más bajo cerca de 8,5, el nitrógeno del amoníaco existe casi exclusivamente en forma ionizada (amonio, NH_4^+), que no es volátil. Muchos tipos de compuestos orgánicos son volátiles, y se pierden fácilmente a la atmósfera desde los humedales y de otras aguas superficiales. (21)

4.5.1 Remoción del Nitrógeno

La importancia de la eliminación de nitrógeno es, probablemente, el segundo lugar después de la eliminación del carbono orgánico en los humedales, utilizados en el tratamiento de aguas residuales domésticas (19). Sin embargo, las formas de nitrógeno del influente, por ejemplo, N orgánico, amoníaco, urea y nitrato, son muy variables dependiendo de la fuente y el nivel de pre-tratamiento, y varían por regiones

geográficas. En muchos casos, la eliminación de amonio a través nitrificación se considera satisfactoria, la eliminación posterior de nitrato a través de desnitrificación también puede ser necesaria. Hay cierta preocupación en cuanto a la medida en que la desnitrificación precede a N_2 o si hay emisiones significativas de los gases de efecto invernadero N_2O . También es de interés la oxidación anaerobia del amonio (anammox) debido a su potencial para convertir amonio directamente a N_2 . Sin embargo, la eliminación de amonio y nitrato son generalmente considerados como procesos operacionalmente separados que requieren condiciones aeróbicas y anaeróbicas, respectivamente. Los componentes del ciclo del nitrógeno en los humedales han sido bien estudiados, y es consenso que en este proceso dominan las transformaciones microbianas, pero pocas investigaciones se ha centrado en análisis microbiano directo, la mayoría de los estudios se basan en medidas indirectas, como la calidad del agua de entrada / flujo de salida para inferir la presencia y la actividad de los microorganismos en la transformación del nitrógeno (19).

4.5.1.1 Nitrificación

La remoción de amonio por nitrificación ha sido documentada en humedales diferentes en diseño y propósito, incluyendo tratamiento de las aguas residuales municipales utilizando humedales de flujo superficial y vertical, lixiviados tratados en los sistemas de flujo superficial, y lecho filtrante construido con un sistema de estanques abiertos. La nitrificación autotrófica consta de dos reacciones aeróbicas sucesivas, la conversión de amonio a nitrito por las bacterias oxidantes de amonio (AOB, Nitroso-) y la conversión de nitrito a nitrato por nitrito de oxidante (-Nitro NOB, bacterias) (19).

4.5.1.2 Desnitrificación

La gran disminución de nitrato observado en la mayoría de los humedales construidos (excluyendo Sistemas de Flujo vertical) sugiere que la desnitrificación es un proceso importante.

La desnitrificación en humedales construidos se calcula que representa tanto como 90% de la retirada global N. La desnitrificación es un proceso de cuatro reacción de conversión de NO_3^- a N_2 a través intermediarios ($\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$) NO gaseoso y N_2O pueden ser liberados durante la desnitrificación, pero el producto principal es N_2 . La mayoría de las bacterias desnitrificadoras son anaerobias facultativas quimioheterótrofas utilizando compuestos orgánicos como donadores de electrones y como una fuente de carbono celular y los óxidos de nitrógeno (en forma de iones y gases) como electrones aceptores.(19).

En general los bacillus, micrococcus y pseudomonas son las bacterias más comunes en suelos. En ambientes acuáticos tenemos a pseudomonas, aeromonas y vibrio (19)

4.5.2 Reducción de Sulfatos

El ciclo del sulfuro en el tratamiento de agua con humedales es un proceso muy importante considerando las cantidades y formas en las que está presente en las aguas residuales, especialmente en los residuos ácidos de las minas (AMD). Dependiendo de las condiciones, el ciclo del sulfuro puede variar grandemente dentro de las diferentes zonas del humedal. Aunque la actividad microbiana no es el único medio por el que el azufre se transforma en los humedales la mayor parte de la extensa investigación llevada a cabo en el ciclo del azufre en los humedales ha reconocido la importancia de las poblaciones microbianas, particularmente las bacterias sulfato reductoras. Sin embargo, como en los ciclos del carbono y del nitrógeno, pocos estudios han empleado técnicas microbianas (19).

La concentración relativa de sulfato u otros compuestos aceptores de electrones determinan qué procesos microbianos están ocurriendo. Por ejemplo, la desnitrificación es energéticamente mas favorable que la reducción del sulfato esta sólo se produce después de que todo el nitrato se ha eliminado la metanógenos es conocida por competir con reductores de sulfato por el carbono disponible en niveles redox similares Se ha

demostrado que el oxígeno liberado de las raíces puede ser utilizado para re-oxidar los metabolitos reducidos en los ciclos del hierro y el azufre (19).

Las bacterias sulfato reductoras son los organismos más ubicuos del planeta. Estos organismos utilizan el sulfato como un aceptor terminal de electrones en una oxidación anaeróbica de sustratos orgánicos (19). Las bacterias sulfato reductoras son críticamente importantes ya que son los únicos organismos que realizan esta función. Su rol en el ciclo geoquímico del sulfuro es vital para muchos procesos biológicos y es también importante para la generación de alcalinidad en los sistemas de tratamiento de agua.

Históricamente la reducción de sulfatos ha sido considerada estrictamente anaerobia y extremadamente sensible a las bajas temperaturas, pero en estudios más recientes se ha empezado a cuestionar este paradigma. Se han descubierto algunas especies que persisten en condiciones aeróbicas y sobreviven por largos periodos a la exposición de oxígeno. Se ha demostrado que las bacterias reductoras de sulfatos crecen bien a bajas temperaturas lo que sugiere que la reducción de sulfatos puede ser más dependiente de la concentración de sustrato y la temperatura por sí sola.

Las bajas temperaturas reducen las bacterias sulfato reductoras establecidas en bioreactores de laboratorio, pero en comunidades de bacterias sulfato reductoras a temperatura ambiente no declino la reducción de sulfatos cuando la temperatura fue disminuida a 6°C (19).

4.5.2.1 Interacción de la transformación del sulfuro con otros procesos

La reducción microbiana de los sulfatos y la precipitación de los metales está estrechamente relacionada, y en algunas revisiones de los artículos disponibles que se centra específicamente en el tratamiento de los humedales. Por consiguiente, los factores que influyen la actividad de las bacterias sulfato reductoras; incluyen insuficiente cantidad de carbono disponible, exceso de oxígeno (u otros aceptores de electrones

terminales más favorables) o bajas temperaturas pueden limitar la precipitación de sulfuro metálico. Dependiendo de las condiciones, ciertos factores pueden ser más influenciados que otros. Por ejemplo, las especies y la variación en el potencial redox fue más importante que la variación en la carga de carbono para la remoción de zinc. La reducción de hierro microbiana domina sobre otras vías metabólicas anaeróbicas de carbono tales como la reducción de sulfatos y la metalogénesis en marismas salobres.

El incremento de la actividad microbiana en la reducción del hierro parece ser estacional y lleva al aumento de las concentraciones de Fe_2^+ soluble. Del mismo modo, demostraron que en biorreactores AMD con altas concentraciones de hierro y sulfato disuelto, se produjo la reducción del sulfato sólo después que la actividad microbiana había reducido completamente Fe_3^+ a Fe_2^+ (19).

5. Caso de estudio

5.1 Problemática de la Localidad de San Baltazar Tetela

La localidad de **San Baltazar Tetela**, con categoría de Junta Auxiliar Municipal, pertenece al municipio de Puebla, localizándose en la parte sur de dicho municipio, con coordenadas geográficas $18^\circ 54' 32''$ de latitud norte y $98^\circ 10' 35''$ de longitud oeste y con una elevación media de 2,140 m.s.n.m. Esta localidad colinda al norte con Buenavista Tetela y en el resto con el vaso de la presa Valsequillo (Figura 13).



Figura 13. Ubicación de San Baltazar Tetela y la presa de Valsequillo

Basados en información del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, INEGI, la región de San Baltazar Tetela, se encuentra en la Provincia Fisiográfica del Eje Neovolcánico (Figura 14-a), región que se puede identificar como una enorme masa de rocas volcánicas de todos los tipos, acumulada en innumerables y sucesivos episodios volcánicos iniciados a mediados del Terciario y continuados hasta el presente. Le constituyen grandes sierras volcánicas, coladas lávicas, conos dispersos o en enjambre, amplios escudo-volcanes de basalto, depósitos de arenas y cenizas, dispersos entre llanuras (Figura 14-b).

Conforme a la Carta Geológica Cd. de México E14-2 editada por el INEGI y presentada de manera parcial en la Figura 14, San Baltazar Tetela está rodeada del paisaje volcánico más espectacular del país: la Malinche, como representante del período más antiguo del vulcanismo en Puebla, el Iztaccíhuatl en un período posterior, el Pico de Orizaba y el Popocatepetl, que corresponden al Plioceno Medio de las eras geológicas.

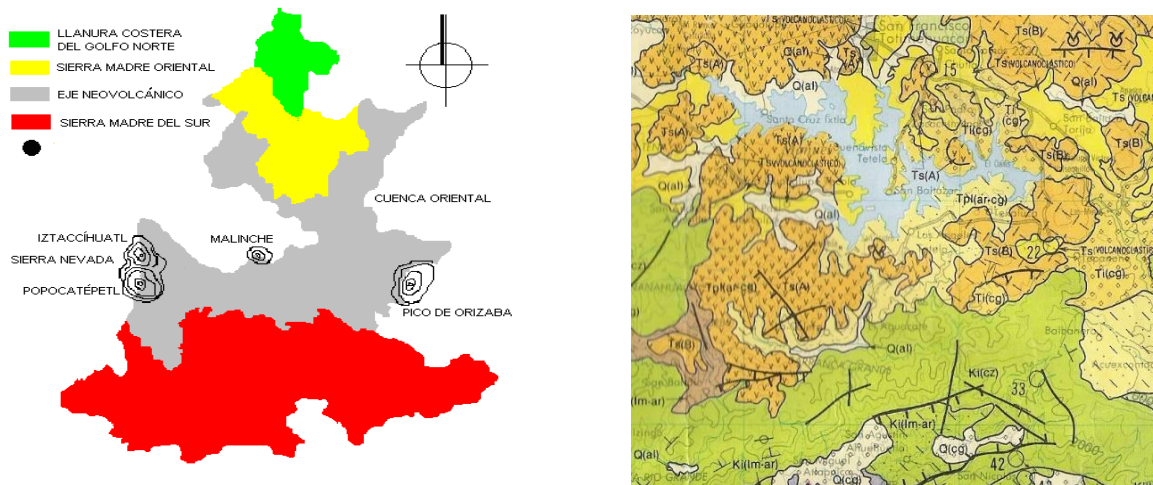


Figura 14. (a) Provincia Fisiográfica del Eje Neovolcánico y (b) Zonificación geológica regional de la localidad

La presa de **Valsequillo o “Manuel Ávila Camacho”** posee una superficie de 237.9 Km², se encuentra al sur de la ciudad capital. Ésta se ubica dentro de una cuenca conformada al norte por los flujos de 3 ríos: el Atoyac, el Zahuapan y el Alseseca, y por una serie de drenajes de varias barrancas directamente al sur de la presa. Las cuencas de estos ríos pertenecen a la del río Balsas, Región Hidrológica numero 18, la cual tiene un área de 40, 938.6 Km² (22).

Esta presa fue construida entre 1941-1946 para aprovechar los escurrimientos del río Atoyac. El embalse cubre unas 2,750 has en la cota 2,059 msnm y 3650 has en la cota 2,062 msnm. Inicia sus operaciones en 1946 para cubrir una necesidad de riego en la zona de Tecamachalco-Tehuacán.

La presa de Valsequillo, abarca un área total de 2,006 Km², comprendida en los Municipios de Puebla y Totimehuacán. Como actividades adicionales se tienen la pesca y el turismo. Los principales cultivos irrigados con esta agua son: maíz, caña de azúcar, papa, frijol, chile, alfalfa y jitomate. La presa pertenece a la cuenca hidrológica del Alto Balsas y está rodeada por gran número de poblaciones como San Francisco

Totimehuacán, Santo Tomás Chiautla, San Pedro Zacachimalpa, **San Baltazar Tetela**, San José Tejaluca, Los Angeles Tetela, La Libertad Tecola, San José el Rincón, Santa María Tecola, La Paz Tlacoxtpan, San Andrés Azumiatla, Santa Cruz la Ixtla, Santa María Malacatepec, San José Chapulco, San Juan Xilotzingo, San José Atotonilco, San Diego Atoyatenco y San Bartolo Coatepec (22).

La problemática que tiene esta presa, es la descarga desmedida de aguas residuales sin previo tratamiento de las localidades situadas en la periferia del lago, tal es el caso de la región de San Baltazar Tetela. Esta situación, producto de las actividades antropogénicas realizadas en las comunidades aledañas, han ocasionado proliferación de lirio acuático en el embalse (Figura15 a-d).



a)



b)



c)



d)

Figura 15. Zonas de descargas de aguas residuales localizadas a lo largo de la presa Manuel Avila Camacho o lago de Valsequillo (a-d).

Esta situación brinda problemas no solo de eutrofización en el lago (Figura 16), sino también de comunicación, ya que el lirio en ocasiones y en función del viento impide que la panga utilizada como medio de transporte entre las poblaciones de San Baltazar Tetela y los Angeles Tetela quede varada por horas o días.

Aunado a esto, existen datos del 2004 donde especifican que las personas que habitan de la zona de el lago de Valsequillo, padecen enfermedades del tipo respiratorias, diarreas agudas, parásitos y desnutrición, que causan la muerte; incluyendo el cólera, que causó gran letalidad en esa región entre 1992 y 1997 (23).



Figura 16. Embarcadero de la presa Manuel Avila Camacho donde se observa con mayor claridad el problema de eutrofización.

La normatividad con la que tienen que cumplir las descargas de aguas residuales para ser vertidos a cuerpos receptores está señalada en la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. Por lo anterior, en este trabajo se propone el diseño de un humedal contenido en un tren de tratamiento para tratar las aguas negras provenientes de la zona de San Baltazar Tetela antes de ser vertidas al Lago de Valsequillo.

5.2 Tratamiento del agua

5.2.1 Características del agua residual

En la Tabla 8 se indican los valores de ciertos parámetros evaluados en trabajos anteriores del agua residual de la Localidad de San Baltazar Tetela, (Comisión Estatal de Agua y Saneamiento). Además, se hace un comparativo con los valores que señala la Norma NOM-001-SEMARNAT-1996 (los límites máximos permisibles) antes de verterse a un cuerpo receptor.

Tabla 8. Características del agua proveniente de las descargas de San Baltazar Tetela vs Norma NOM-001-SEMARNAT-1996.

Parámetro	Caracterización de la Descarga	Límites máximos permisibles NOM-001-SEMARNAT-1996
pH	7.78	5-10
Material flotante	Presente	Ausente
Conductividad ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	1,100	-----
Sólidos suspendidos tot.	242.5	75.0
Sólidos sedimentables	3.0	1.0
DBO (mg L^{-1})	260.0	75.0
DQO (mg L^{-1})	638.61	-----
Nitrógeno orgánico (mg L^{-1})	18.56	-----
Nitrógeno amoniacal (mg L^{-1})	25.19	-----
Nitrógeno total Kjeldhal (mg L^{-1})	43.75	40.0
Fósforo total	9.4	20.0
Grasas y Aceites (mg L^{-1})	84.47	15.0
Coliformes totales (NMP/100 ml)	2.0E+08	-----
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	1.9E+08	2000
Huevos de helminto	0.5	5
Arsénico	0.072	0.2
Cadmio	0.013	0.2
Cianuros	<0,020	2.0
Cobre	0.040	4.0
Cromo	<0,04	1.0
Mercurio	<0,0010	0.01
Níquel	<0,04	2.0
Plomo	0.07	0.5
Zinc	0.15	10.0

FUENTE: Análisis de Calidad de Agua, tomada en la Localidad de San Baltazar Tetela, CEAS, 2008.

Como se puede observar en la Tabla 8, los resultados obtenidos corresponden a una agua residual domestica y los metales pesados que ha sido señalados en color gris no rebasan los límites máximos permisibles por la NOM-001-SEMARNAT-1996 al no encontrarse industrias en la zona.

5.2.2 Propuesta del tren de tratamiento

El tren de tratamiento propuesto para limpiar el agua residual de la Localidad de San Baltazar Tetela se resume en el esquema de la Figura 17, donde se aprecia la existencia de una criba desarenadora, una fosa séptica, cuatro celdas de humedales, una de ellas empleada para el tratamiento de lodos procedentes de la fosa séptica y las otras tres conectadas en serie para el tratamiento del influente.

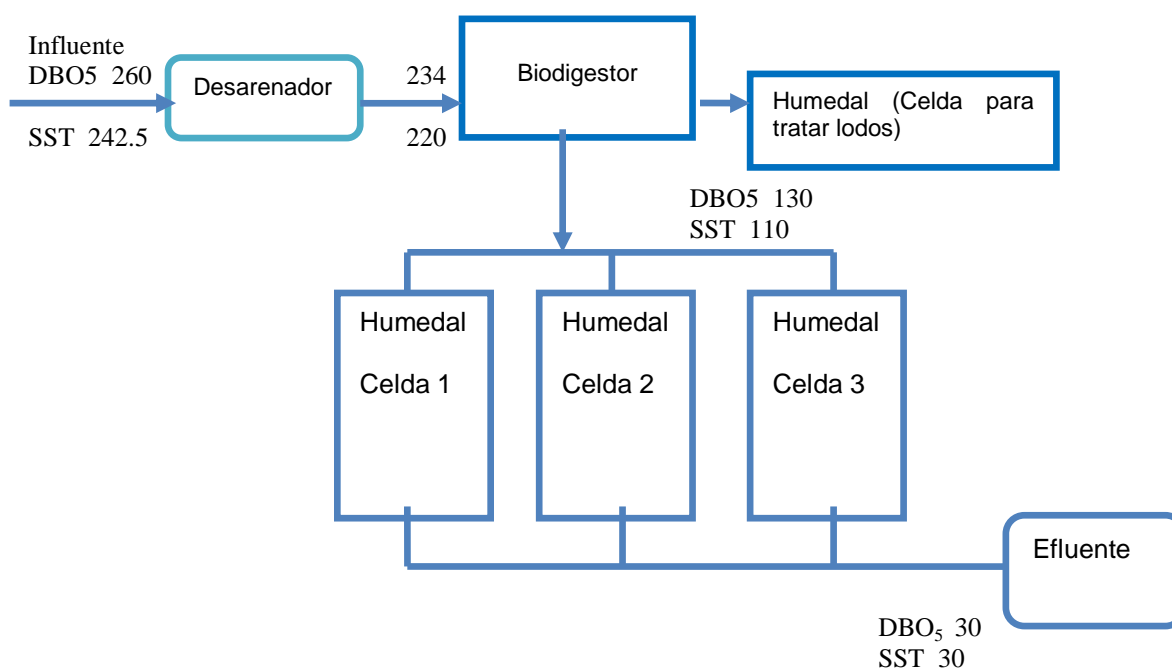


Figura 17. Esquema del tren de tratamiento propuesto en este proyecto para tratar el agua residual de San Baltazar Tetela, Puebla.

La criba desarenadora: Permitirá conducir el influente a la planta, tendrá una rejilla no mayor de $\frac{3}{4}$ de pulgada que permita la retención de basuras y piedras de gran tamaño, además de retener partículas grandes que se sedimenten en esta unidad del tratamiento. Puede estar bifurcado para el caso en que se tengan variaciones en el flujo.

Biodigestor: En esta unidad del tratamiento se llevará a cabo tanto la sedimentación de sólidos como la digestión anaeróbica de la materia orgánica. En este punto se separan los sólidos en suspensión, y como contendrá un lecho de material grueso (piedras) sobre ellas se encontrarán adheridas películas de microorganismos los cuales descompondrán las aguas residuales a medida que percolan hacia el fondo del biodigestor.

Las celdas del humedal: En estas celdas se llevara a cabo la sedimentación, nitrificación, biodegradación, adsorción y volatilización de los contaminantes. Tanto la celda para tratar lodos como las celdas para el tratamiento del influente, se conformará con material del sitio previamente compactado y se recubrirán con una geomembrana para evitar lixiviaciones al manto freático. En las cuatro celdas se sembraran las plantas seleccionadas.

5.3 Consideraciones para el diseño del humedal subsuperficial

5.3.1 Ubicación

Debido a que las descargas de aguas residuales domesticas de la región de San Baltazar Tetela al Lago de Valsequillo son intermitentes y se ubican a lo largo y ancho de la población. Lo que se busca es construir un solo colector que lleve todas las descargas a un solo sitio donde se construirá la planta de tratamiento.

El terreno elegido para instalar la planta de tratamiento cuenta con un área de aproximadamente $30,000 \text{ m}^2$ y posee una pendiente suave hacia el lago de Valsequillo, por lo que es factible llevar a la práctica la propuesta de tratamiento (Figura 18).

La línea azul de la Figura 18 muestra la pendiente natural que se aprovecharía para reunir en un solo colector el agua residual de la localidad.

A la fecha no se ha iniciado la construcción del colector que concentre las descargas que corren a lo largo y ancho de la localidad, la misma se prevee se realice en la reciente administración municipal 2014-2017. De esta manera, el colector correrá a lo largo de 8,800 m y tendrá una diámetro de doce pulgadas.

El tener un solo colector permitirá la conducción de todas las descargas de la localidad hacia el sitio de la planta de tratamiento, evitando tener múltiples descargas que actualmente significan múltiples focos de contaminación.



Figura 18. Posible ubicación del tren de tratamiento, en la zona de San Baltazar Tetela.

5.3.2 Selección de Plantas

Tomando en consideración lo antes expuesto y las condiciones socio-económicas de la región, la propuesta de este proyecto consiste en la implementación de un humedal

artificial o construido de flujo subsuperficial para tratar el agua residual de la localidad de San Baltazar Tetela. Este tratamiento se construirá tomando las plantas que crecen de forma natural en el sitio como los carrizos y las espadañas (Figura 19).



a) Phragmites o carrizos

b) Thypha o espadaña

Figura 19. Plantas comúnmente empleadas en humedales construidos, que crecen en forma natural en San Baltazar Tetela.

De esta manera, se eligieron a los **carrizos** como la planta empleada en el humedal, cuyas características se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Características de la planta seleccionada para el humedal propuesto para la localidad de San Baltazar Tetela.

Carrizos	
Familia	Poaceae (Gramineae)
Sub-familia	Arundinoideae
Tribu	Arundineae
Nombres comunes	Common reed, Reed Grass, Reed
Sinónimos	Phragmites australis, P. vulgaris, Phragmites arundo, Arundo vulgaris.

Las plantas remueven los contaminantes mediante la asimilación directa de estos dentro de sus tejidos, además proporcionan un ambiente adecuado para la actividad microbiana a través del transporte de oxígeno a la rizosfera estimulando la degradación aeróbica de la materia orgánica y el crecimiento de bacterias nitrificantes.

Se deben sembrar rizomas de 10 cm de largo y deben de tener brotes en el extremo del corte, la raíz debe colocarse a 5 cm por debajo de la superficie del medio, es conveniente inundar la superficie o bien rociarse frecuentemente, cuidando que los brotes no estén sumergidos en el agua. La densidad de siembra debe de ser de 0.5 m para carrizos y juncos, se debe permitir que la vegetación crezca de 3 a 6 meses y se implante antes de la aplicación del agua residual (12).

Se recomienda realizar una o más podas anuales para evitar que las plantas superen la altura de un metro.

5.3.3 Datos de Diseño

Los parámetros presentados en la Tabla 10 y 11, son los necesarios para el diseño del humedal para el tratamiento de las aguas residuales de la localidad de San Baltazar Tetela.

Tabla 10. Parámetros empleados para diseñar el humedal en San Baltazar Tetela.

DBO ₅ Co	260 mg/L
DBO ₅ Ce	30 mg/L
Q	6.87 m ³ d
Temperatura mínima del agua	6 ° C
Medio	Arena gruesa
Pendiente	0.01 %
Profundidad del estanque	0.3 m

Valores para alfa, ks y K20 para arena gruesa	
Alfa	0.39
Ks	480 m ³ /m ² d
K20	1.35
II	alfa x h
II	0.117
K _T	K ₂₀ - 1.1 ^{t-20}
K _T	0.355

Tabla 11. Parámetros calculados para el diseño del humedal.

<i>Tiempo de Retención (días)</i>	$t = (-\text{LN}(\text{Ce}/\text{Co})) / (kt)$	t = 6.075
<i>Superficie transversal Ac</i>	$Ac = (Q) / (Ks * p)$	Ac = 122.4 m²
<i>Anchura del estanque w</i>	$w = (Ac) / (H)$	w = 408 m
<i>Longitud del estanque Lo</i>	$Lo = t * Q / w * II$	Lo = 73.85
<i>Superficie necesaria As</i>	$As = (w * Lo) / (10000)$	As = 3.05 ha

Los cálculos obtenidos nos indican que el tiempo en que el agua residual estará retenida en las celdas de los humedales 6 días y las dimensiones del humedal serán de 3.05 ha. Esta área se repartirá entre las cuatro celdas del humedal teniendo celdas de 102 m de ancho por 73.85 de largo

5.3.4 Dimensionamiento

5.3.4.1 Calculo de población para el diseño

Para calcular el tamaño de población con el que se abastecería el tratamiento del humedal, se realizó por cuatro métodos, de acuerdo a la Tabla 12:

Tabla 12. Métodos matemáticos empleados para calcular el tamaño de población

Método matemático empleado	Población calculada (habitantes)
Metodo aritmético	4 823
Metodo geométrico	5 128
Metodo logarítmico	5 334
Metodo de Malthus	4 503
Promedio	4 947

Se tiene una Población Proyecto = 4,947 habitantes para el año 2030.

Por lo que es viable realizar un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de las aguas residuales.

5.3.4.2 Determinación de la dotación de Agua Potable

De acuerdo a las normas para proyecto de agua potable y alcantarillado en las localidades rurales y clima templado le corresponde una dotación de 150 L/Hab día⁻¹ y una aportación del 80% de 120 L/Hab día⁻¹.

5.3.4.3 Calculo de Gastos

Este gasto indica la cantidad de agua residual que se esta vertiendo al Lago de Valsequillo (Tabla 13).

Tabla 13. Gasto (en litros por segundo) considerados para el diseño del humedal.

Gasto	Lps
Qmin (Gasto Mínimo)	3.44
QMD (Gasto Medio)	6.87
Q M.Inst (Gasto Máximo instantáneo)	22.33
Q M. Ext. Gasto Máximo extraordinario	33.49

5.4 Operación inicial del humedal

La operación del sistema es muy sencilla ya que el sistema de tratamiento no incluye bombas, ni otros elementos que requieran electricidad. Se recomienda realizar podas a las plantas de cuatro a seis veces por año. Se monitoreará mensualmente la calidad del agua de entrada y salida para determinar el porcentaje de remoción de la planta de tratamiento.

Según la bibliografía (12) el porcentaje de remoción de la DBO en los humedales ha sido del 65 al 88%, para el nitrógeno se han reportado remociones del 20 al 70%, la remoción de fósforo en los humedales de flujo subsuperficial es muy poco efectiva debido al contacto limitado entre los lugares de adsorción y el agua residual que se aplica. Dependiendo de la tasa de carga, del tiempo de retención y de las características del medio la remoción puede variar entre 10 y 40%.

Este tipo de humedales son eficientes en la remoción de sólidos suspendidos, con niveles de SST en el efluente por debajo de 10 mg L^{-1} .

6. Conclusiones

El tratar el agua residual de la comunidad de San Baltazar Tetela en un humedal de flujo subsuperficial permitirá que el agua descargada hacia el lago cumpla con la normatividad establecida. Si todas las localidades aledañas participan en el proyecto se logrará que a largo plazo haya una disminución de la presencia del lirio acuático en el lago y además proporcionará un hábitat para las aves migratorias que año con año arriban al lago en la época invernal.

Las dimensiones de la planta piloto se determinaron en base al valor propuesto en la literatura, considerando la cantidad de materia orgánica inicial.

Para disminuir la materia orgánica al final del tratamiento se debe de considerar factores como la acumulación de contaminantes en etapas previas, la la concentración de oxígeno disuelto, la cosecha de las plantas, el monitoreo constante, etc.

De acuerdo a la normatividad, las concentraciones estipuladas por la NOM-001-SEMARNAT-1996 son de 60 mg/l para la DBO₅, 25 mg/l para NT y 10 mg/l para fósforo total.

7. Recomendaciones y perspectivas

Esta propuesta de tratamiento para eliminar los contaminantes de la descarga de agua residual proveniente de la localidad de San Baltazar Tetela, Puebla es una pequeña aportación para resolver el problema de contaminación en la Presa Manuel Ávila Camacho (Lago de Valsequillo), y una propuesta para que el resto de las localidades que circundan la presa y que también vierten sus aguas residuales, tomen cartas en el asunto y establezcan plantas de tratamiento basadas en tecnologías naturales para contribuir a disminuir los contaminantes de la Presa Manuel Ávila Camacho.

Tomando en cuenta que aun no se cuenta con un colector construido, es conveniente que una vez que exista este, se realice una caracterización de la descarga que llegara hacia el sitio de la planta y un aforo para conocer el gasto real para la realización del proyecto.

Una vez instalada la planta se puede difundir y demostrar su funcionamiento para invitar a las demás poblaciones a adoptar la tecnología de tratamiento mediante humedales de flujo subsuperficial.

Este proyecto pretende provocar una reacción en cadena, concientizando a las comunidades aledañas para instalar plantas de tratamiento de aguas residuales basadas en humedales de flujo subsuperficial, ya que además de sanear el agua, a largo plazo también se puede lograr el crecimiento económico de las comunidades, a través de la

utilización de los carrizos para obtener biocombustibles para las lanchas que se utilizan para el transporte, elaborar artesanías, instrumentos musicales o algún otro uso de utilidad económica para la comunidad.

Por otra parte se puede considerar crear estanques con el agua tratada proveniente de la planta donde se efectúe cultivo de tilapia, provocando no sólo una fuente de ingresos extras para los pobladores si no también además para el autoconsumo.

Se puede combinar los carrizos con plantas de ornato tanto para consumo nacional o con miras para la exportación conservando siempre las especies endémicas de la zona, y por último lograr un atractivo turístico para la región con la instalación de centros turísticos donde pueda llevarse a cabo turismo ecológico, pesca, etc.

8. Anexos

8.1 Anexo 1. Cálculo de la población por diferentes métodos matemáticos

(a) Cálculo de la población por el Método Aritmético

Año	Censo	Incremento	% Anual
1990	2,543	0	0.00
1995	2,621	78	15.60
2000	3,051	430	86.00
2005	3,309	258	51.60
2010	3,683	374	74.80
2030	4,823		57.00

Periodo de Diseño = 20 Años

% Anual Promedio = 57.00

PF = PA + IN = 4,823 Habitantes

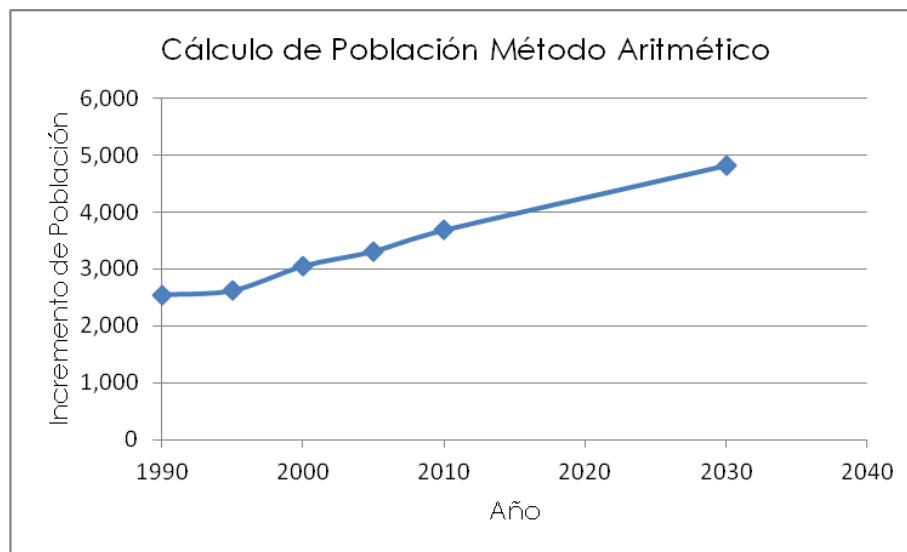


Figura 20. Cálculo de la población por el método aritmético

(b) Cálculo de la población por el Método geométrico por porcentaje

Año	Censo	Incremento	%	% Anual
1990	2,543	0	0.00	0.00
1995	2,621	78	3.07	0.61
2000	3,051	430	16.41	3.28
2005	3,309	258	8.46	1.69
2010	3,683	374	11.30	2.26
2030	4,823		Promedio	1.96

% Anual Promedio = 1.96

PF = PI + PI (% N)/100 = 5,128 Habitantes

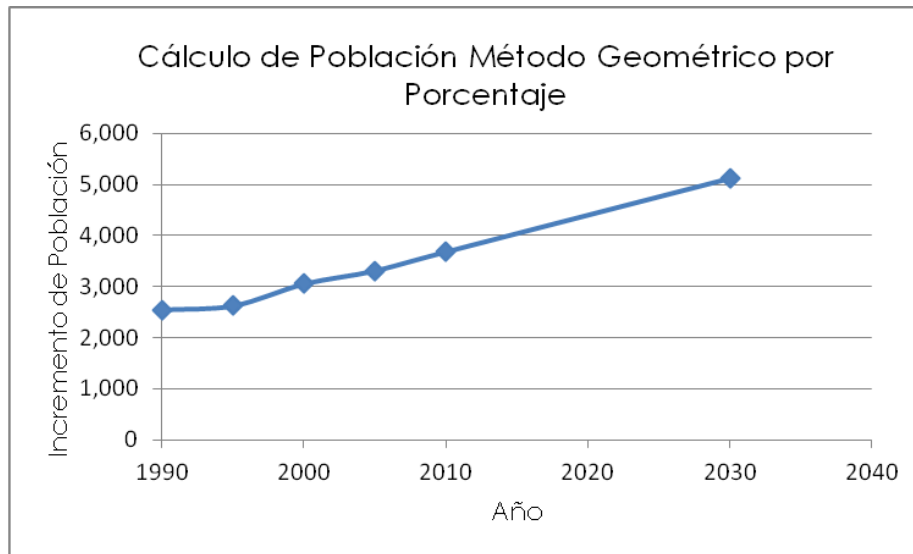


Figura 21. Cálculo de la población por el método geométrico aritmético

(c) Cálculo de Población Método Logarítmico

Año	Censo	Log. Población	N Log (1 + R)
1990	2,543	3.40535	0.0000
1995	2,621	3.41847	0.00262
2000	3,051	3.48444	0.1320
2005	3,309	3.51970	0.00705
2010	3,683	3.56620	0.00930
2030	4,823	3.72706	0.00804

Promedio N Log (1 + R) = 0.00804

Log (PF) = Log PA + NLog (1 + R) = 3.72706

PF = Antilog (3.72706) = 5,334 Habitantes

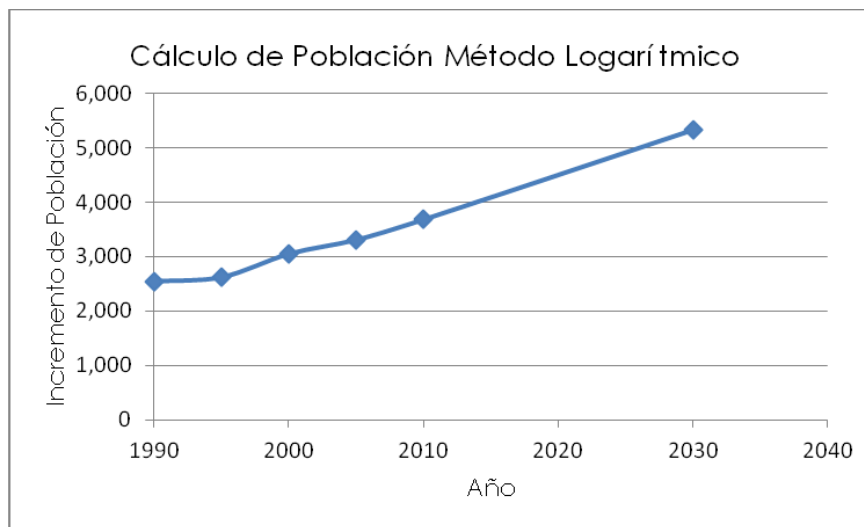


Figura 22. Cálculo de la población por el método logarítmico

(d) Cálculo de la población por el Método de Malthus

Y = Período de Diseño
 PF = PA X X = 1.01
 PF = 4,503 Habitantes

9. Bibliografía

1. Guido Zarate, Alejandro y Duran de Bauza, Carmen 2008.
Remoción de Contaminantes en un Sistema Modelo de Humedales Artificiales Escala de Laboratorio. Tecnología, Ciencia, Educación, enero-junio. Año (volumen 23, numero 001). Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos, México, D.F. pp 15-22.
2. Rivas Hernández, Armando, Ramírez González, Antonio, Balderas Castrejón, Juventino y García Maldonado, Juan Gabriel. 1999. Diseño y Diagnostico de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales Mediante Humedales de Aguas Residuales Mediante Humedales (Wetlands). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos.
3. Comisión Nacional del Agua. Diciembre 2004.
Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana. www.cna.gob.mx
4. Comisión Nacional del Agua. Diciembre de 2005
Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. www.cna.gob.mx
5. Comisión Nacional del Agua. Diciembre de 2006.
Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. www.cna.gob.mx
6. Comisión Nacional del Agua. Diciembre de 2008.
Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana. www.cna.gob.mx
7. Comisión Nacional del Agua. Diciembre de 2009.

- Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. www.cna.gob.mx
8. Comisión Nacional del Agua. Diciembre de 2010
Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. www.cna.gob.mx
 9. Comisión Nacional del Agua. Diciembre de 2011
Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. www.cna.gob.mx
 10. Comisión Nacional del Agua. Diciembre 2012.
Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana. www.cna.gob.mx
 11. Comisión Nacional del Agua. Edición 2013.
Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento.
Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana. www.cna.gob.mx
 12. Crites, Ron y Tchobanoglous George. 2000.
Sistemas de manejo de Agua Residuales para núcleos pequeños y descentralizados.
Tomo 2. McGraw-Hill Interamericana, S.A.
 13. Kadlec , Robert H. y Wallace, Scott D. 2009.
Treatment Wetlands, Segunda Edición. CRC Press. Florida.
 14. Tabilo-Valdivieso, E. 1999.
El Beneficio de los Humedales en América Central. Centro Neotropical de Entrenamiento en Humedales. Heredia, Costa Rica.
 15. Ting Zhang, Dong Xu, Feng He, Yongyuan Zhang y Zhenbing Wu. 2012.

- Application of constructed wetland for water pollution control in China during 1990-2010. *Ecological Engineering* 47 (2012) 189-197.
16. Environmental Protection Agency. Septiembre de 2000.
Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Humedales de flujo libre superficial. EPA 832-F-00-024.
 17. Environmental Protection Agency. Septiembre de 2000.
Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Humedales de flujo subsuperficial. EPA 832-F-0023
 18. Lara Borrero, Jaime Andres. 1999.
Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona
 19. Jennifer L. Faulwetter , Vincent Gagnon, Carina Sundberg, Florent Chazarenc, Mark D. Burr, Jacques Brissonb, Anne K. Campera, Otto R. Stein . 2009. Microbial processes influencing performance of treatment wetlands: A review. *Ecological Engineering* 35 (2009) 987–1004
 20. Henestrosa, Zarate Milton. 2003.
Apuntes Curso de Plantas de Tratamiento-Rurales. Comisión Nacional del Agua.
 21. Llagas Chafloque, Wilmer Alberto y Gómez, Enrique Guadalupe, (2006)
Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG* Vol. 15, N° 17, 85-96 UNMS MISSN: 1561-0888 (impreso) / 1628-8097 (electrónico).

22. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2000. Carta Hidrológica de Aguas Superficiales, 1:250 000. INEGI. Carta Topográfica, 1:50 000 (2ª edición).

23. Aceves-Capri, Salvador Gerardo y Ramírez Macías José Isaac. 2004. Evaluación de la Capacidad de la presa Manuel Ávila Camacho “Valsequillo” para el desarrollo de la acuacultura con *Cyprinus carpio* (Carpa común).