

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO CIENCIAS DE SUELOS



Elementos Químicos en la Vegetación de la Planta de Tratamiento de
Agua Residual de la UAAAN

Por:

DULCE OLIVIA MAZARÍEGOS ROBLES

Trabajo de Observación Presentado como Requisito Parcial para Obtener
el Título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Saltillo, Coahuila, México

Mayo 2017

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO CIENCIAS DEL SUELO

Elementos Químicos en la Vegetación de la Planta de Tratamiento de
Agua Residual de la UAAAN

Trabajo de Observación

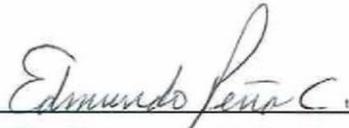
Presentado por:

Dulce Olivia Mazariegos Robles

**Que somete a consideración del H. Jurado examinador como
Requisito Parcial para Obtener el Título de:**

Ingeniero Agrícola y Ambiental

Aprobada por:



Dr. Edmundo Peña Cervantes

Presidente del H. Jurado

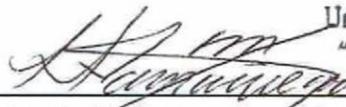

Dr. Rubén López Cervantes

Sinodal



M.C. Idalia María Hernández Torres

Universidad Autónoma Agraria
"ANTONIO NARRO"



Dr. Luis Samaniego Moreno

Coordinador de División de Ingeniería



Coordinación de
Ingeniería

Saltillo. Coahuila, México. Mayo del 2017

AGRADECIMIENTOS

A DIOS

Por darme el don de la vida, a una maravillosa familia, sabiduría, por darme la fuerza, el coraje para ser este sueño realidad y por la oportunidad de realizar una de mis grandes metas; terminar una etapa en mi vida para iniciar otra te doy gracias DIOS porque nunca me abandonaste siempre has estado conmigo en las buenas y en las malas, además siempre me levantaste las veces que caí. Estoy en gratitud con él Padre Celestial por cada regalo que me has dado y que inmereciblemente he recibido, como la beca sin lo cual hubiese batallado más en concluir mis estudios, una prueba más de tu fidelidad, prometiste una buena escuela y me diste algo que fue más allá de mis expectativas, por lo que me doy cuenta que no te vale mi desarrollo, pero antes de ser una profesionalista quiero ser siempre tu hija, ya que es el mayor privilegio que podemos tener, más valioso que cualquier título que podamos tener en la tierra y estoy en gracia porque me ilumino en cada momento de mi vida.

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

Por brindar la oportunidad de estudiar en esta institución acobijarme, hospedarme y así poder realizarme como profesionista gracias por formar parte de mi historia y por el apoyo incondicional en toda mi trayectoria de mi carrera durante los 5 años en Saltillo Coahuila como estudiante gracias Alma Mater por hacer posible esto.

Agradezco aquellas personas especiales que hicieron posible la realización de este proyecto en especial a:

A mis Asesores

Al Dr. Edmundo Peña Cervantes por su tiempo, dedicación, confianza, al brindarme la oportunidad de trabajar en este proyecto de tesis, le estoy agradecida, por esa actitud tan positiva que tiene para la realización de cada proyecto e inclusive también por los ánimos y sabios consejos que me dio cuando más necesite de ellos.

A la MC. Idalia María Hernández Torres por el apoyo, confianza y oportunidad que me brindó al desarrollarme como estudiante y por su colaboración en este trabajo.

Al Dr. Rubén López Cervantes, por contribuir en mi desarrollo como estudiante y también por el apoyo que me brindo durante este proyecto.

DEDICATORIA

A mis queridos padres

Sr. Jorge Víctor Mazariegos García por apoyarme en todo el trayecto de mi carrera sin importar el gran sacrificio que hiciste, no teniendo casi nada en la vida pero eso no fue un obstáculo para que no me apoyaras en la realización de mi más grande sueño que fue el concluir mis estudios como Ingeniero Agrícola y Ambiental.

Usted siempre me apoyo económicamente y moralmente con tus sabios consejos papí es un gran ejemplo a seguir estoy orgullosa de ser tu hija gracias por ser siempre mi pilar en la vida eres muy importante para mí te agradezco Padre por lo valiente que eres y por qué nunca te diste por vencido tu apoyo incondicionalmente, eres un gran padre agradezco a DIOS porque siempre me tienes en tus oraciones usted encomendándome ante él para que me guíe en mi caminar en cada paso de mi vida, gracias papa por permitirme construir un proyecto de vida y por creer en mí por el gran amor que me ha brindado, por su comprensión usted hizo que esto fuera posible, le debo gran parte de lo que soy en la vida.

Sra. Isabel Robles Roblero por estar ahí siempre cuando más necesite de tí por consentirme mucho y animarme cuando estaba triste con tus sabias palabras de aliento y por pedirle

mucho a Dios en tus oraciones para que me iluminara la mente mediante sus peticiones ante él doy gracias porque siempre me recordó que cualquier cosa que hiciera en la vida primero que nada debía tener presente a Dios porque nunca me iba a dejar sola en la vida si no al contrario él sería mi mejor amigo en todo el trayecto de mi carrera.

Gracias mama porque realice una de mis grandes sueños que fue concluir mis estudios. Son las personas más increíbles que el Padre Celestial me pudo haber dado en la vida por lo consiguiente mi ejemplo de vida y mi motivo para luchar por mis sueños, ustedes sin duda alguna los seres más maravillosos los mejores diría yo gracias a estoy en gratitud por permitir tener a estos magníficos padres y bendecirme al darme a estos seres humanos tan impresionantes que son ustedes por el gran amor, que me dan día a día, estoy muy agradecida por esta herencia magnífica que me brindaron la mejor que me pudieron dar los amo demasiado mis amores mi mayor orgullo tenerlos como parte de mi vida.

A mi hermana

Gracias hermana a mi **Reyna Isabel** por darme su apoyo incondicionalmente, por sus sabios consejos te agradezco hermana porque tú siempre me brindaste tu amistad incondicionalmente a pesar de las indiferencias que se nos presentaron en la vida ustedes forman parte de mí la familia que ya formaste porque son personas muy especiales en mí

vida . A tí cuñado **Johan De los Santos** a este nuevo angelito mí sobrinito **Yahel De los Santos Mazariegos** e inclusive al nuevo integrante que se incorpora a la familia a tu bebe que llevas en el vientre, hermana los quiero demasiado gracias Dios mío por bendecirme de esta manera.

A mis hermanos

Gracias Dios mío por estos seres magníficos que son mis hermanos **Jorge de Jesús** y **Víctor E dardo** por el apoyo moral que me brindan en cada momento de vida y en esta etapa como profesionista siempre que necesite de ustedes hermanos ahí estaban en las buenas y en las malas e inclusive les agradezco por apoyarme económicamente le doy gracias a mi Padre Celestial por darme esta bendición por que forman parte de mí vida Dios estoy en gratitud ya que hoy puedo decirle a ellos que la mejor herencia que nos pueden dar nuestros padres es el estudio para que el día de mañana tengamos una valiosa herramienta con el cual podernos defendernos en la vida por lo consiguiente también poder sobrevivir.

A mis tíos (as)

Gracias Dios porque estas personas forman parte de mi vida a mí tía Charito Gutiérrez García, Martha García Camas, Nelson, Luis, Sonia García Morales, Audelia, Margarita Robles Roblero, Fausto, Goñi, Felipe, Clara, Lucena, Florentino, Frida, Jorge Gutiérrez García, Manuel Gutiérrez García, Sara Gutiérrez, Blanca, Julio Cesar, Nancy Zavaleta,

Yolanda Mazaríegos, Luz García, Nelson ,Diego, Orlando, Carlos, Luís , Darwín, visantina les agradezco de corazón el apoyo moral, así como económicamente cuando más lo necesité estuvieron ahí para apoyarme y no dejarme, caer al contrario ustedes siempre tan positivos motivándome en que le echara ganas a mis estudios para sacar adelante mi carrera y en especial a mis padrinos **Julio y Ade** gracias Padre Celestial por todo el apoyo que me dieron por medio de sus oraciones así como económicamente gracias por confiar en mí .

Primas y primos

Alondra, Cesar, Yazmín, Amira, Jahert, Evolet, Brayhian, David, Samuel, Santos, Paola, Amparo, Blanca, Ernesto, Cristóbal, Isabel, Marisela, Gamaliel, Belinda, Manuela, Alex, Alexa, Karína, Kenny, Flor, David, Teresa, Alexis, Alexa, Hugo, Guadalupe, Nara e Ivana le doy gracias a Dios por mi familia ya que ellos son una motivación más para prepararse como personas y también estoy en gratitud con el Creador por lo que cuando estaba a punto de darme por vencida de dejar todo ellos me motivaron con sus sabios consejos, ánimos en cuestión emocional para que saliera adelante en la vida e inclusive alguno de ellos en lo económico.

A mis amigas y amigos

A mis amigas (os) Claudia Nayeli, Gladys, Ceci, Norma Ángel, Mariza, Florina, Catalina Garcés, Norma Fraga, Francisco, Tomas, Heidi, Icela, Felicitas, Dulce Anahí, Gerardo

González, Adry, Itza, Santiago, Gustavo Nájera, Ramiro Valdez, Víctor Manuel, Edgardo, Claudio, Ángel, Luis, Roke, Cristhián, Armando, Lamber, Xóchitl, Fabián, Lorena, Andy, Segundo, Eduardo Pérez, Chuy, Lupita, Alejandro Quesada, Guillermo, Gumer, Yessy, Barreto, Ramón, Angie, Roxana, Irene, Nancy Cano, Rusbel, Alex, Frank, Eliseo, Liz vi, Xitlali Peralta, Paola, Antonio, Angie, Samahara, Arlhey, Maya, Dinar, Oliver, Arturo, Antonio, Nopalito, Huber, Mónica, Geovany, Misacl, Rony , Sarain, Jesús, Samuel, Edgar, Ibarra, Romay, Héctor, Manzano, Javier, Monse, Carlos, Santiago Mazariegos, Néstor, Rubisol, Brenda Silvano, Alejandro Cumplido, Lourdes, Froylan, Viviana, Mauro, Teodoro Guzmán, Silverio, Adriana, Marisol, Elsei, Aracely, Marly, Fercho, Debora, Rey David, Rey. Bolívar, Yessy, Aurora, Blanca, Erick, Jorge Alberto, Juanito, Ernesto Morales, Alejandra, Alma, Karen, Sheila Manzanita, Guadalupe, Diego, Lety, Karen, Marichuy, Samuel, Brayhian, Zuleyma, Karito, Iván Leyva, Gerardo Arrellano, Darío, Miguel Adrián e Isabel.

Gracias Padre Celestial, porque siempre derramas bendiciones en vida al ponerme a estas personas ya que con ellos pase momentos de alegrías, penas, tristezas y por qué no hasta a veces fracase en algunas pero sin duda alguna ellos estuvieron cuando más los necesite e inclusive cuando me veían deprimida, me daban ánimos con sus sabios consejos hasta me llamaban la atención cuando era necesario para que no me diera por vencida sino que tuviera

fuerzas para salir adelante aunque cayendo y levantando pero tenía que superarme como persona me ayudaron a superar mis obstáculos ,miedos y cualquier barrera que se me presentó en el trayecto de mi carrera no me cansare de dar gracias a DIOS por darme a estos hermanos y hermanas , sin duda alguna mi segunda familia que confiaron en mí .

A estas personas especiales

Luis Zea, Concepción Zea, Claudia Orantes, Pedro Pérez, Gerry González, Crísthian Silva, Luis Ramiro. Le doy gracias a Dios por bendecirme de esta manera al poner en mi camino a estos seres tan queridos e inclusive porque forman parte de mi vida ya que son para mí personas especiales que estuvieron en el trayecto de mi carrera como profesionista apoyándome en las buenas y en las malas les agradezco porque nunca permitieron que mis miedos me dominaran o fuese un obstáculo para salir adelante en el trayecto de esta etapa, lamentablemente mi gran hermano Gerry se nos adelantó en el camino muy joven pero tú serás mi mayor motivación para salir adelante porque tú siempre estabas ahí en el momento que más necesite con tus sabias palabras motivándome y recuerdo que me decías échale ganas miija usted puede le agradezco a Dios por ponerme a estas personas en mi camino.

A el resto de mi querida familia

A mis abuelitas **Arcía García Camas**, **Rita Robles Arriaga**, a mi hermana **Liz Gálvez** que no te conozco en persona pero llevas mi sangre y formas parte de mi vida te quiero mucho hermana gracias Dios mío porque desde me entere que eres mi hermana me hiciste un día muy especial en mi vida. Estoy en gratitud con el Padre celestial por darme a mi bisabuela **Rosario Camas**, una gran señora ella siempre apoyando y diciéndome que siempre tenía que demostrarme a mí misma que todo lo que me proponía en la vida con la ayuda de Dios saldría adelante en este caso en mis estudios que sin importar cuantas veces cayere en la vida tenía que salir adelante pero que nunca me olvidara que con la ayuda de Dios sería posible lamentablemente te nos adelantaste usted y mi abuela **Arcía** ahora ya forman parte de unos hermosos ángeles que desde el cielo me cuidan y me mandan sus bendiciones las quiero demasiado abuelas le doy gracias a Dios por permitirme conocerlas brindándoles el don la vida , también estoy en gratitud por que tengo a una gran abuela **Rita** que aún está conmigo sin duda alguna una persona muy amorosa la cual valoro y respeto mucho porque ella ocupa un lugar muy especial en mi corazón también agradezco el apoyo que me brindaron siempre por medio de sus oraciones e inclusive también por el apoyo económico que me dieron en una etapa de mi carrera, las quiero mucho.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	I
DEDICATORIA.....	IV
RESUMEN.....	XV
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS.....	3
GENERAL.....	3
ESPECÍFICO.....	3
REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
Definición de aguas residuales.....	4
La contaminación del agua.....	5
Aguas Residuales Domésticas.....	6
Características de las aguas residuales.....	6
La legislación del agua en México.....	6
Contaminación del agua por metales pesados.....	9
Tratamiento de las aguas residuales.....	10
Definición y utilización de humedales.....	11
Ventajas de los humedales.....	12
Humedales artificiales.....	13

La Fito depuración.....	14
Plantas macrófitas.....	15
Características de las plantas acuáticas.....	17
Plantas Emergentes.....	18
Plantas anfibias.....	19
Eficiencia de remoción de contaminantes con plantas acuáticas.....	20
MATERIALES Y MÉTODOS.....	22
Localización del sitio de estudio.....	22
Metodología.....	23
Análisis de planta, agua y lodo.....	25
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	25
Análisis de las aguas residuales.....	26
Análisis elemental de los lodos de la PTAR.....	27
Análisis elemental en planta.....	28
CONCLUSIONES.....	33
LITERATURA CITADA.....	34

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Resultados de los análisis de agua en los diferentes sitios de la planta tratadora de aguas residuales.	26
Cuadro 2. Análisis elemental obtenido de las diferentes muestras de lodos.....	28
Cuadro 3. Análisis elemental de las diferentes plantas acuáticas y humedales artificiales en la PTAR. Primer muestreo.	29
Cuadro 4. Análisis elemental de las diferentes plantas acuáticas y humedales artificiales en la PTAR. Segundo muestreo.	30
Cuadro 5. Análisis elemental de las diferentes plantas acuáticas y humedales artificiales en la PTAR. Tercer muestreo.	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización del sitio experimental **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 2. Planta de tratamientos de agua residual y puntos de muestreo **¡Error! Marcador no definido.**

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo de observación, fue determinar la concentración de algunos elementos químicos, en las distintas especies vegetales utilizadas en la planta tratadora de aguas residuales (PTAR), para la depuración de las aguas residuales, así como analizar su eficiencia en la remoción de metales pesados. En la PTAR de la UAAAN, se establecieron seis sitios de muestreo y se colectaron muestras de aguas residuales (AR), lodos residuales (LR) y de tejido vegetal de follaje (TV) de seis especies ya establecidas se les midieron; Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Sodio (Na), Potasio (K), Hierro (Fe), Zinc (Zn), Cobre (Cu), Manganeseo (Mn) y los elementos pesados como Plomo (Pb) y Cromo (Cr). Se encontró que en los LR, TV los elementos dominantes fueron Ca, Mg, Na, K, Fe, Zn, Cu, Mn, Pb, Cr. En las AR no se encontró Zn, Mn, Cr y para Fe, Cu y Pb los valores encontrados fueron menores de una parte por millón. Se concluye de las seis especies evaluadas, el carrizo y lirio acuático, son las que absorbieron la superior cantidad de nutrimentos y metales pesados, lo que se refleja en el contenido de biomasa

Palabras claves: *Metales pesados; Nutrimentos; Lodos y Aguas Residuales.*

INTRODUCCIÓN

Existen en nuestro ecosistema recursos naturales que son fundamentales para satisfacer nuestras necesidades cotidianas, como es el agua, desafortunadamente el agua dulce en el mundo es insuficiente para satisfacerlas, ello implica que este recurso, como muchos, se esté agotando con rapidez. La elevada tasa de crecimiento poblacional, es una de las principales causas de la explotación del agua. En ese sentido debemos tomar en cuenta la importancia de este recurso; es preciso mencionar, que debido a la falta de fuentes de agua en México se están utilizando aguas residuales para darle uso en la agricultura de zonas áridas y semiáridas.

La Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), cuenta con una planta de tratamientos de aguas residuales (PTAR) donde se utilizan humedales y plantas acuáticas, este proceso natural de depuración se caracteriza por su bajo costo de construcción, operación y mantenimiento; así como, el nulo uso de energía fósil para remover la mayor parte de las cargas contaminantes de las aguas residuales. Sin embargo, su eficiencia debe ser evaluada mediante el análisis de las aguas obtenidas, lo que dependerá del proceso de tratamiento y, en el caso de humedales artificiales, del comportamiento fisiológico de las plantas utilizadas y capacidad de absorción de algunos elementos contaminantes.

Algunos de los principales contaminantes en estas aguas son los metales pesados y algunos elementos esenciales, entre ellos: Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Zinc (Zn), Hierro (Fe), Cobre (Cu), Manganeseo (Mn), Plomo (Pb) y Cromo (Cr), los cuales pueden acumularse en el suelo y los cultivos como consecuencia del uso de estas aguas en la irrigación.

Las aguas de la PTAR de la UAAAN, se utilizan para riego de las áreas verdes de la Universidad; además, se usa en el riego de una huerta de nogales, siempre y cuando cumpla con la caracterización establecida en la normatividad. También, de los humedales establecidos para la depuración del agua residual, se desarrollan aproximadamente seis diferentes tipos de plantas sobre el agua, lo cual, favorece la limpieza del agua residual, sin embargo, el desarrollo de algunas de ellas, son ajenas al humedal y en sí mismas son consideradas como maleza. En este trabajo de investigación, se analizó la concentración de algunos elementos absorbidos por la vegetación para evaluar su capacidad de absorción.

OBJETIVOS

GENERAL

Determinar la concentración de algunos elementos químicos, en las distintas especies vegetales utilizadas en la PTAR, para la depuración de las aguas residuales, así como evaluar su eficiencia en la remoción de metales pesados.

ESPECÍFICO

Establecer la absorción de algunos elementos esenciales y no esenciales, por medio de plantas acuáticas, de la PTAR de la UAAAN.

REVISIÓN DE LITERATURA

Definición de aguas residuales

Aguas residuales son aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general, de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas (NOM-001-SEMARNAT-1996). En general, las aguas residuales consisten de dos fases: líquida y sólida; ésta última se conoce como lodo. Las aguas no tratadas, pueden ocasionar graves problemas ambientales y sanitarios, como infecciones bacterianas, además de mantener vectores y hospedadores. Desde el punto de vista ambiental, la contaminación de las aguas no sólo elimina una buena parte de la vegetación y fauna autóctona acuática, sino que también ocasiona desequilibrios generalizados a todo el ecosistema terrestre. El exceso de materias orgánicas y nutrientes en el agua conduce a la eutrofización. Las coliformes fecales y totales, así como, otros compuestos tóxicos producen envenenamientos y acumulación en los organismos (Otálora, 2011).

Debido a lo anterior, es necesario el estudio de nuevos métodos de purificación del agua que sean de bajo costo, que se acoplen a la naturaleza y que sean eficientes en cuanto a la remoción de contaminantes., en este caso de coliformes fecales y totales; y sólidos suspendidos totales que son, perjudiciales para la salud humana y el medio ambiente (Atlas y Bartha, 2002). En relación con los humedales, los procesos biogeoquímicos que se producen son favorecidos por la poca profundidad de sus aguas (Mitsch y Gosselink, 1993).

En los humedales pocas veces existe el proceso de eutrofización y la contaminación de cursos de agua (Fernández, 2004). Al sedimentar los sólidos, los nutrientes asociados a ellos tales como el P, se sustraen de la acumulación de agua la absorción

de nutrientes por las plantas puede disminuir la concentración de N y P del agua. Sin embargo, este proceso, puede ser revertido cuando las plantas mueren luego del crecimiento temporal y sus restos se depositan en el sedimento (Mitsch y Wu, 1995).

La contaminación del agua

El agua es uno de los elementos naturales fundamentales que, junto con el aire, la tierra y la energía, constituyen los cuatro recursos básicos donde se apoya la vida en cualquiera de sus formas, no obstante, la importancia de la calidad del agua, ha tenido un lento desarrollo, sólo hasta finales del siglo XIX se le reconoció como origen de numerosas enfermedades infecciosas, hoy en día su importancia, está fuera de toda duda (Oswald, 2011).

En México se generan alrededor de 200 m³s⁻¹ de aguas residuales, de las cuales reciben tratamiento sólo 36 %; La Comisión Nacional del Agua (CNA, 2007), lo que indica que se requiere de mayor infraestructura y recursos humanos para mejorar la calidad de este bien, además de propuestas innovadoras que permitan implementar el tratamiento en diferentes condiciones ambientales y socioeconómicas.

En las zonas semiáridas de México, la agricultura de riego se caracteriza por una alta inversión de recursos para poder mantener un aceptable margen de producción, competitividad y calidad de los productos generados. Con el propósito de valorar y asegurar en el largo plazo la integridad ecológica de los recursos naturales, durante las últimas dos décadas se ha puesto mayor énfasis en el costo ambiental que esto representa, ya que en diversas zonas del planeta se registran problemas severos de contaminación. En todos los países el agua subterránea es una reserva importante de agua potable; sin embargo, en varias regiones del planeta este recurso hídrico está contaminado hasta el punto en que ya no reúne las condiciones establecidas en las normas actuales para su consumo humano Organización No Gubernamental (ONG, 1997).

Aguas Residuales Domésticas

Las aguas residuales domésticas son producto de la actividad diaria del hombre y debido al riesgo toxicológico que representan para la salud humana y el ambiente se requiere un tratamiento previo antes de que sean descargadas en los cuerpos receptores (Mujeriego, 1990).

Características de las aguas residuales

Se considera que el agua está contaminada cuando se ven alteradas sus características químicas, físicas, biológicas o su composición, por lo que pierde su potabilidad para consumo diario o para su utilización en actividades domésticas, industriales o agrícolas. Las aguas residuales se definen como aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general, de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas (Rodríguez–Monroy y Duran de Bazúa, 2006).

El riesgo de infiltración de nitratos a acuífero obedece a múltiples factores, entre los que destaca la permeabilidad del suelo, excesivo volumen de agua aportado por el sistema de riego superficial, frecuente aplicación de riegos y prolongada longitud de los surcos (Martínez et al. 2003). Existe lixiviación de nitrato debido a que este anión no es adsorbido por las partículas del suelo (Arauzo et al. 2003).

La legislación del agua en México

En México, para cuantificar el nivel de contaminación en el agua de origen residual, se utilizan algún criterio establecidos en la normatividad oficial vigente, contenidos en las normas oficiales mexicanas: Según las Normas Oficiales Mexicanas NOM-001SEMARNAT-1996, NOM-002-SEMARNAT-1996, NOM-003-SEMARNAT-1997 y, con respecto de los lodos generados en el tratamiento de aguas, los criterios establecidos para su disposición final se encuentran en la NOM-004-SEMARNAT2002.

Según las Leyes del agua del año 2009. La legislación se refiere a un conjunto de leyes de un estado sobre una materia o un sector, para el caso de México en materia de agua, la Ley de Aguas del año 2009 y su reglamento establece los principios que sustentan la política hídrica nacional, algunos de estos principios a los que se hace referencia son:

a). El agua es un bien de dominio público federal, vital vulnerable y finito, con valor social, económico y ambiental, cuya preservación en cantidad y calidad es tema fundamental del estado y la sociedad.

b). La conservación, preservación, protección y restauración del agua en cantidad y calidad es asunto de seguridad nacional, por lo tanto debe evitarse el aprovechamiento no sustentable y los efectos ecológicos adversos.

c).El aprovechamiento del agua debe realizarse con eficacia promoverse su reúso y recirculación. Por qué la participación responsable de la sociedad es base para la mejor gestión de los recursos hídricos y particularmente para su conservación, así que es esencial la educación ambiental, especialmente en materia del agua.

Así mismo, el título IV, capítulo III, de la mencionada ley, establece las obligaciones que tendrán el asignatario en materia de uso, explotación o aprovechamiento de agua destinada a los servicios con carácter público urbano o doméstico, los cuales deben de garantizar la calidad del agua conforme a los parámetros referidos en las Normas Mexicanas. Descargar aguas residuales a los cuerpos receptores previo tratamiento, cumpliendo con las Normas Oficiales Mexicanas, procurar su reúso y asumir los costos

económicos y ambientales que provoca sus descargas ,así como asumir las responsabilidades por el daño ambiental causado; La Comisión Nacional Del Agua (CONAGUA, 2009). En México el 58% de las aguas residuales generadas son colectadas en los sistemas de alcantarillado municipales, estimándose en más de 208 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, de los cuales sólo el 40.2% ($83.6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) reciben algún tipo de tratamiento, adicionalmente se generan 190 m^3s^{-1} de aguas residuales de uso no municipal incluyendo a la industria, de las cuales únicamente se tratan $33.7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (17.7%).

El Estado de Coahuila se ubica en el noveno lugar nacional en materia de tratamiento de aguas residuales municipales, con una capacidad instalada de 5,179 lps, lo que equivale al 82.4% de las aguas residuales generadas en las ciudades, el gasto de agua tratada actual es de 4,026 lps. Lo anterior mediante las PTAR ubicadas en Acuña, General Cepeda, Monclova, Piedras Negras, Ramos Arizpe, Saltillo, y de los sistemas lagunares localizados en Castaños, Nadadores, Nueva Rosita, Ocampo, Torreón y Viesca. Cabe mencionar que en Saltillo y Torreón se encuentran incluidas las PTAR pequeñas que dan servicio a parques recreativos, campos de golf e industria (CONAGUA, 2009)

Las aguas subterráneas son la principal fuente de abasto a las ciudades (85% del agua abastecida total), su calidad depende de las formaciones geológicas que las contienen, la variación de los niveles freáticos y la concentración de sólidos disueltos. En gran medida los principales acuíferos han sido sobreexplotados y esto ha provocado el descenso de los niveles de agua. Por lo que en algunos casos, se ha revertido el gradiente hidráulico, causando la intrusión de agua de mala calidad hacia áreas que antes registraban buena calidad; casi en su totalidad, la población se abastece de agua potable de fuentes subterráneas, que por su creciente demanda y sobreexplotación, los acuíferos, han reducido su volumen aprovechable y su calidad, por lo que en regiones como la Laguna en Torreón, Coahuila, es necesario buscar nuevas fuentes de abastecimiento para la población.

En la actualidad las granjas porcícolas, principalmente las grandes, usan como sistemas de tratamiento, tamices para la separación de sólidos seguidos de

biodigestores, estos últimos han logrado aceptación por su fácil operación y bajo costo. Sin embargo, estos sistemas resultan insuficientes para alcanzar los criterios de calidad establecidos en la legislación. (Ministerio del Medio Ambiente, 2002).

Contaminación del agua por metales pesados

Las aguas residuales con metales pesados han presentado un incremento en los últimos años (Fu y Wang, 2011). La alta toxicidad de estos elementos, aunada a su larga persistencia en el ambiente, les confiere la denominación de contaminantes prioritarios, establecida por la Organización Panamericana de la Salud (OPS) y por la Organización Mundial de la Salud (OMS), (CEPIS, 2001). Entre los más peligrosos se encuentran el cromo (Cr), mercurio (Hg) y plomo (Pb), que son utilizados y generados de manera exhaustiva en todo el mundo por industrias relacionadas con la minería, papel, curtido de pieles, galvanoplastia, producción de baterías, etc. (Fu y Wang, 2011). En relación con el plomo, este metal se acumula en los cuerpos de los organismos acuáticos, experimentando efectos en su salud por envenenamiento. De hecho, los crustáceos pueden verse seriamente afectados con pequeñas concentraciones (Demirak, *et al.* 2005; Dugo *et al.* 2006). Así mismo, se pueden alterar las funciones del fitoplancton. Éste elemento es poco soluble comparado con otros metales, sin embargo, presenta alta afinidad por proteínas lo que representa efectos tóxicos adversos (Prager, 2002). En comparación con el plomo, el cadmio es altamente soluble, por lo que está disponible al organismo, en forma disuelta en el agua (Spacie y Hamelink.1995).

En México, 18 estados presentan problemas derivados de las industrias que utilizan como materia prima o subproducto Hg, Cr o Pb, e incluso una combinación de estos metales (INE, 2004; SSA, 2006). La concentración en las formas totales de estos compuestos varía de modo amplio en función del tipo y la capacidad de producción de

la industria. Los intervalos reportados en los efluentes descargados se encuentran entre 0.0005 y 2.2 mg L⁻¹ de Hg, de 5 a 75 mg L⁻¹ de Cr y de 7 hasta 130 mg L⁻¹ de Pb (Loredo *et al.* 2003).

Las plantas de tratamiento de aguas residuales convencionales actualmente no son capaces de tratar las aguas con metales pesados, ya que el sistema biológico colapsaría por la toxicidad de estos cationes inorgánicos o saldrían sin tratamiento con el efluente. Las opciones fisicoquímicas que existen en la actualidad, como el carbón activado, intercambio iónico y precipitación química, siempre presentan alguna desventaja operacional, económica o de eficiencia. Los metales pesados agrupan elementos como cadmio y mercurio, principales contaminantes dentro de este grupo de sustancias, además de otras como cromo, cobalto, cobre, molibdeno, níquel, plomo, estaño, titanio, vanadio, zinc o plata. Éstos representan alto riesgo para el ambiente, ya que son sustancias con una gran estabilidad química ante los procesos de biodegradación, por lo que los seres vivos son incapaces de metabolizarlos, generándose una contaminación por bioacumulación y un efecto multiplicador en la concentración del contaminante en la cadena trófica (Cheng *et al.* 2002).

Tratamiento de las aguas residuales

Según (Romero, 2009). Tratamientos de aguas residuales se pueden distinguir hasta cuatro etapas que comprenden procesos químicos, físicos y biológicos. Tratamiento preliminar, destinado a la eliminación de residuos fácilmente separables y en algunos casos conlleva un proceso de pre aireación.

1. Tratamiento preliminar, destinado a la eliminación de residuos fácilmente separables y en algunos casos conlleva un proceso de pre aireación.
2. Tratamiento primario que comprende procesos de sedimentación y tamizado.

3. Tratamiento secundario que comprende procesos biológicos aerobios y anaerobios y físico-químicos (floculación) para reducir la mayor parte de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO).
4. Tratamiento terciario o avanzado que está dirigido a la reducción final de la DBO; metales pesados y/o contaminantes químicos específicos y la eliminación de patógenos y parásitos.

El tratamiento natural de las aguas residuales utiliza procesos biológicos, en particular cierto tipo de plantas presentes en humedales naturales que favorecen el crecimiento de microorganismos en su red reticular y sustrato, que contribuye a la remoción de contaminantes, los cuales son también formas de nutrientes esenciales para las mismas plantas y que son fácilmente absorbidos tales como; nitrato, amonio y fosfato, muchas especies de estas plantas son capaces de captar, e incluso acumular significativamente metales pesados, como cadmio y plomo (Romero, 2009).

La velocidad de remoción de contaminantes por las plantas varía extensamente, dependiendo de la velocidad de crecimiento de la planta y de la concentración del contaminante en su tejido; las leñosas, es decir, árboles y arbustos, proporcionan un almacenamiento a largo plazo de contaminantes, comparado con las plantas herbáceas (Córdova, 2009)

En la depuración de las aguas residuales con plantas acuáticas, arraigadas en el suelo, cuyos tallos y hojas emergen del agua, se utilizan especies de plantas como: Ciperáceas (Junco de laguna), Gramíneas (Hierba del maná, Carrizo), Indáceas (Lirio amarillo, espadaña, fina), Juncáceas (Juncos), Tifáceas (Eneas ,espadañas). Las especies del género Tifáceas toleran bajo pH son capaces de acumular en sus tejidos altas concentraciones de metales pesados, por lo que se pueden usar en minería (Novotny y Olem, 1994).

Definición y utilización de humedales

Según la Comisión Nacional De Áreas Naturales Protegidas (CONANP, 2012). Los humedales son zonas de transición entre el medio ambiente terrestre y acuático y sirven como enlace dinámico entre los dos. El agua que se mueve arriba y abajo del gradiente de humedad, asimila una variedad de constituyentes químicos y físicos en solución, ya sea como detritus o sedimentos, estos a su vez se transforman y transportan a los alrededores del paisaje.

Los humedales se dan donde la capa freática se halla en la superficie terrestre o cerca de ella o donde la tierra está cubierta por aguas poco profundas.

Los humedales proveen sumideros efectivos de nutrientes y sitios amortiguadores para contaminantes orgánicos e inorgánicos. Esta capacidad es el mecanismo detrás de los humedales artificiales, también denominados wetlands, para simular a un humedal natural con el propósito de tratar las aguas residuales de empresas y municipios.

La Convención Ramsar hace uso de una definición más amplia ya que además de considerar a pantanos, marismas, lagos, ríos, turberas, oasis, estuarios y deltas, también considera sitios artificiales como embalses, salinas y zonas marinas próximas a las costas cuya profundidad en marea baja no exceda los seis metros, los cuales pueden incluir a manglares y arrecifes de coral, Comisión Nacional De Áreas Naturales Protegidas. (CONANP, 2012).

Asimismo (Cooper, 1999), menciona que la utilización de los humedales fue desarrollada en Europa, donde siguen operando con éxito.

Ventajas de los humedales

Entre las ventajas de este sistema se encuentra el bajo costo de instalación y mantenimiento, comparado con sistemas físicos, químicos y biológicos convencionales, así como la generación de un paisaje agradable. Los humedales artificiales correctamente diseñados y construidos, pueden depurar las aguas municipales, industriales y las de lluvia, y son especialmente eficaces en la eliminación de contaminantes del agua, como son sólidos suspendidos, nitrógeno, fósforo, hidrocarburos y metales. Son una tecnología efectiva y segura para el tratamiento y recirculación del agua si se mantienen y operan adecuadamente (Miranda, 2000).

Humedales artificiales

El sistema de humedales artificiales para el saneamiento de aguas residuales consiste en el desarrollo de un cultivo de macrófitas enraizadas sobre un lecho de grava impermeabilizado. La acción de las macrófitas hace posible una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual afluyente es depurada progresiva y lentamente. El tratamiento de aguas residuales para depuración se realiza mediante sistemas que tienen tres partes principales: recolección, tratamiento y evacuación al lugar de restitución (Fernández, 2004). Los humedales construidos se han utilizado para tratar una amplia gama de aguas residuales.

Según Kadlec *et al.* (1993) y Frers (2012), la tecnología de los humedales artificiales está definida como un complejo ecosistema de sustratos saturados, vegetación (macrófitas) y agua, cuyo objetivo es la remoción de la mayor cantidad de contaminantes del agua residual mediante mecanismos de depuración que actúan en los pantanos como la remoción de sólidos suspendidos por sedimentación y filtración; degradación de la materia orgánica a partir de microorganismos aeróbicos y anaeróbicos; eliminación de microorganismos patógenos por sedimentación, filtración, adsorción en partículas de arcilla, remoción de metales pesados atribuida al fenómeno precipitación-adsorción; precipitación de los hidróxidos, sulfuros y ajuste de pH.

Los humedales artificiales se construyen de forma que los afluentes recorran un trayecto atravesando el sustrato y las raíces de las macrófitas. Como resultado se disminuye la velocidad del caudal. Manipulando adecuadamente el sistema artificial, se logran tiempos de residencia hidráulicos (dependiente del caudal y la velocidad del agua) óptimos para el resultado que se busca. El mayor tiempo de retención favorece a la sedimentación, estabilizando y estructurando el sedimento, logrando una distribución más homogénea. A su vez, se provocan corrientes de aguas verticales que impiden la formación de barrera de densidad, permitiendo la continuidad del compuesto falta de descomposición de la materia orgánica. Los rizomas crean canales de circulación de agua en el suelo, transformando al sustrato más poroso y reduciendo la erosión (Brix, 1999).

Las raíces también aportan oxígeno al medio (Armatrong *et al.* 2000). En mayor o menor medida, dependiendo de la especie y de la etapa de desarrollo en que se encuentre la planta.

La Fito depuración

Se refiere a la depuración de aguas contaminadas por medio de plantas superiores (macrófitas) en los humedales o sistemas acuáticos, ya sean éstos naturales o artificiales. El término macrófitas, dado su uso en el lenguaje científico, abarca a las plantas acuáticas visibles a simple vista, incluye plantas acuáticas vasculares, musgos, algas y helechos. Constituyen “fotosistemas”, porque emplean la energía solar a través de la fotosíntesis. Básicamente, se trata de captar la luz solar y transformarla en energía química, que es usada en su metabolismo para realizar funciones vitales. Al realizar la planta sus funciones vitales, colabora en el de las aguas, (Fernández, 2004).

El uso de las plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales, es un tema que está teniendo mayor consideración, debido a que el saneamiento es de menor costo en cuanto a su operación y mantenimiento, frente a otros sistemas convencionales, aunque los humedales artificiales requieren mayores extensiones de terreno en comparación con la PTAR convencional, suelen ser igualmente eficaces en la remoción de materia orgánica e incluso más efectivo en la remoción de elementos patógenos y nutrientes, por otra parte, el consumo de energía suele ser mínimo y su costo de mantenimiento muy bajo, requiriendo personal menos especializado, es por ello que en la actualidad se ha comenzado a utilizar las plantas acuáticas para la purificación de las aguas residuales (Delgadillo, 2010).

Plantas macrófitas

Las plantas macrófitas son un tipo de vegetación acuática que se encuentran adheridas a los fondos de estanques y cuerpos de aguas, presenta la yema de renuevo bajo tierra, resisten la sequía veraniega dejando secar la parte que está por encima del suelo y sobrevive con su órgano subterráneo de almacenamiento (bulbo, cormo, rizoma o tubérculo), estas plantas sirven para depurar el agua mediante bacterias microbianas que se ubican en sus raíces, sedimentan los contaminantes y materia orgánica depurándola de forma totalmente ecológica y natural, además de utilizarse como sistemas para depurar el agua tienen otras posibilidades de aprovechamiento como alimento del ganado, de peces y otros animales acuáticos o bien como fertilizante para suelos y cultivos (Dallas, 2005).

Las diferentes especies de plantas acuáticas que se utilicen son importantes, debido a que difieren en su capacidad de depuración del agua residual, en la remoción de nutrimentos específicos, de elementos traza y de compuestos potencialmente tóxicos como los metales pesados (Gopal, 1999). Varias de las especies de plantas acuáticas

son consideradas a escala mundial como las invasoras más destructivas económica y biológicamente (Holm et al. 1977).

Aunque muchas plantas acuáticas introducidas en los ecosistemas acuáticos al principio no causan problema, con el paso del tiempo se adecuan y en ausencia de sus enemigos naturales, se multiplican rápidamente en su nuevo medio y se diseminan invadiendo otros ecosistemas naturales, convirtiéndose en plantas invasoras que desplazan la flora y fauna acuáticas nativas (Champion, 2004).

Las macrófitas se desarrollan en contacto directo con el agua, e incluyen al grupo de las plantas acuáticas enraizadas. Las especies acuáticas invasoras pueden introducirse en una nueva región mediante rutas naturales como el viento, las corrientes de ríos o marinas y otras formas de dispersión (a gran distancia), y por rutas artificiales creadas por la actividad humana, lo que ha propiciado la entrada masiva, intencional o accidental, de especies no nativas a los ecosistemas (Ashton y Mitchell, 1989).

Las rutas artificiales se pueden dividir en dos tipos: rutas de introducción intencionales, cuando resultan del transporte, comercio, manejo y liberaciones intencionales de organismos, y rutas de introducción no intencionales, que transportan especies de manera indirecta, por ejemplo, las actividades asociadas a la construcción de infraestructura y vías de comunicación, agua de lastre, organismos adheridos a los cascos de los buques, importación de alimentos o turismo (Kriesch, 2007).

Varias especies de plantas acuáticas como *Egeria densa*, *Eichhornia Crassipes*, *Hydrilla Verticillata*, *Hygrophila polysperma* y *Salvinia molesta*, que han sido introducidas en México por el comercio de plantas de ornato para acuarios o bien han sido flora acompañante de peces, también exóticos, importados a nuestro país, aunque ya en México se han distribuido de manera natural (Novelo y Martínez, 1989; Villaseñor y Espinosa, 1998; Mora-Olivo *et al.* 2008).

De las rutas naturales, especies como *Arundo Donax* y *Pistia Stratiotes* se están distribuyendo rápidamente en los humedales de todo el país (March y Martínez, 2007);

además, de *Eichhornia Crassipes*, *Typha domingensis* y *T. latifolia*, por medio de sus mecanismos reproductivos. En este sentido, la producción de flores, frutos y semillas ha permitido que los mecanismos de dispersión de estas últimas, por viento o agua, sean los factores que han facilitado la distribución de este grupo de plantas en los diversos ecosistemas que infestan. Por otro lado, el “carrizo gigante” se dispersa en clones y de manera muy rápida desplaza la vegetación nativa pues crece más rápido que las especies del lugar (Bell, 1997; Dudley, 2000).

Características de las plantas acuáticas

Las características que deben tener las plantas acuáticas usadas para el tratamiento de las aguas residuales son las siguientes: alta productividad, eficiencia de remoción de nutrientes y contaminantes, resistencia en condiciones naturales adversas y fácil cosecha. Un tipo especial de macrófitos: son los Helófitos, plantas capaces de arraigarse en suelos anegados, con parte sumergida y otra aérea emergente. Los Helófitos más usados en depuración son aneas (*Typhal*), Carrizos (*Phragmites*), Juncos (*Juncos*), *Scirpus*, *Carex*, etc. (Olguín y Hernández, 1998).

son capaces de transportar oxígeno desde tallos, hojas hacia sus raíces y rizomas, pero en los humedales de flujo subsuperficial la cantidad de oxígeno que aporta es muy pequeña en comparación con la demanda requerida por las aguas residuales, por lo que los procesos de eliminación de materia orgánica son básicamente anaerobios por lo tanto, la nitrificación – des nitrificación, no ocurre, sin embargo, recientes estudios que comparan el rendimiento de humedales plantados o no plantados, indican que se ha sobreestimado la capacidad del transporte de oxígeno de los Halófitos hacia zonas sumergidas (U.S.Environmental Protección Agency, 2000).

Las plantas acuáticas sumergidas permanecen con todo su cuerpo vegetativo al interior del agua, sobresaliendo sólo sus flores en la época reproductiva; poseen hojas que flotan en la superficie del agua, y las radicales emergentes se caracterizan por presentar una parte de su tallo bajo el agua y la mayor parte de él, la que lleva las

hojas y flores, en el aire. A este último grupo se les llama también Halófitos plantas palustres o paludícolas (Ramírez *et al.*1979). Según estos mis autores mencionan que son plantas muy interesantes en los humedales naturales a causa de su efecto oxigenado en la columna de agua; al estar los órganos asimiladores sumergidos, el oxígeno liberado por fotosíntesis pasa directamente al agua. En este grupo se encuadran especies muy comunes de los humedales naturales, como *Ranunculus acuátiles* (ranúnculo de agua) y *Potamogeton Spp.*, y otras que se utilizan frecuentemente en estanques ornamentales por su capacidad oxigenadora, como son *Ceratophyllum demersum* o *Myriophyllum verticillatum*. Algunas especies sumergidas emergen sólo para florecer, como por ejemplo *Lobelia dortmanna* (lobelia de agua).

Plantas Emergentes

Las plantas emergentes contribuyen al tratamiento del agua residual y esorrentía de varias maneras: estabilizan el sustrato y limitan la canalización del flujo. Dan lugar a velocidades de agua bajas y permiten que los materiales suspendidos se depositen. Toman el carbono, nutrientes y elementos traza y los incorporan a los tejidos de la planta. Transfieren gases entre la atmósfera y los sedimentos. El escape de oxígeno desde las estructuras subsuperficiales de las plantas, oxigena otros espacios dentro del sustrato. El tallo y los sistemas de la raíz dan lugar a sitios para la fijación de microorganismos (Lara, 1999).

Los sistemas de depuración que utilizan plantas acuáticas se citan a continuación:

Según Brix y Schierup, (1990). Sistemas naturales totalmente respetuosos e integrado con el medio ambiente, que eliminan sólidos en suspensión, materia orgánica, elementos eutrofizantes y microorganismos patógenos. Coste de instalaciones muy

inferiores al de una depuradora convencional, mantenimiento sencillo, con bajo coste y reducido o nulo consumo de energía.

Las plantas acuáticas que crecen en los FSS (flujo subsuperficial) se supone que actúan como canales de transporte de gases (dióxido de carbono, metano, etc.) hacia la atmósfera y oxígeno hacia el relleno. Por lo tanto, al aporte de oxígeno por difusión atmosférica a través de la superficie de la grava se le suma el aporte de la planta. La cantidad de oxígeno aportado por la planta depende de muchos factores: de la especie, del tamaño, de la época del año, de la edad de la planta, de las condiciones ambientales, y de las condiciones oxidativas de las raíces.

Las plantas suministran oxígeno a sus propias raíces para mantener condiciones aerobias. Si se encuentran con un lecho muy reductor, tienen que suministrar más oxígeno para contrarrestar esas condiciones. Es por esto que una misma especie puede aportar más oxígeno cuando está en contacto con agua residual. Esta cantidad de oxígeno transportado al lecho ha sido medida por varios autores y se encuentra en un amplio rango, incluso para la misma especie de plantas. Para *Phragmites Australis* creciendo en lechos de grava, los valores varían entre 2.08 g. (y 12 g (Brix y Schierup, 1990).

Las plantas contribuyen a estabilizar el cauce, influyen en la conductividad hidráulica del terreno, distribuyen y ralentizan la velocidad del agua, lo que favorece la sedimentación de los sólidos suspendidos y aumenta el tiempo de contacto entre el agua y la vegetación (Pettecrew y Kalff, 1992).

Toman el carbono, nutrientes, y elementos de traza y los incorporan a sus tejidos. (Vymazal *et al.* 1998; Dierberg y Brezonik, 1984).

La influencia de las raíces de las plantas es bastante grande. Alrededor de las raíces, existen gradientes de muchas de las especies químicas presentes en el agua (Kadlec y Knight, 1996). Éstos son atribuibles a la extracción de nutrientes y de otras sustancias por las plantas hacia su sistema de raíces. Esto agota las sustancias disueltas en el

agua. Compactan el lecho dotándolo de estabilidad. Las raíces actúan como superficie para la fijación de microorganismos, aumentando así, la superficie de biopelícula (Kadlec y Knight, 1996).

Minimizan el gradiente de temperatura dentro del relleno, protegiéndolo del frío en invierno y evitando flujos indeseables por diferencias de temperatura (Brix, 1994).

Cuando se mueren y se deterioran, dan lugar a restos de vegetación.

Plantas anfibias

Las plantas anfibias habitualmente son terrestres, pero que son capaces de acomodarse a la vida acuática, soportando períodos variables de inundaciones. A veces es muy difícil discernir entre las plantas anfibias (Pisano, 1976).

Las macrofitas acuáticas han sido consideradas por varios autores como una plaga debido a su rápido crecimiento, ya que en ocasiones llegan a invadir lagunas, represas, canales de riego y generan varios problemas, al interrumpir el flujo del agua, propiciar eutroficación y crear ambientes para la crianza de vectores de enfermedades. Sin embargo, si las plantas acuáticas se manejan adecuadamente, su poder de proliferación, capacidad de absorción de nutrientes y bioacumulación de contaminantes del agua las convierten en una herramienta útil en el tratamiento de aguas residuales. Además, con base en los estudios de remoción de compuestos tóxicos por plantas acuáticas, se pueden considerar estos sistemas de tratamiento como una alternativa ecológica y económicamente viable, tanto para el tratamiento de los efluentes municipales domésticos como industriales (Zambrano, 1974).

En la fábrica de Imusa S.A., localizada en el municipio de Rionegro (Antioquia), se tienen operando desde 1988 unos canales sembrados con Eichhornia

Crassipes (Jacinto de agua); se ha comprobado una eficiencia de remoción de los diferentes contaminantes que alcanza más de 97% en los metales pesados y hasta el 98% en sólidos suspendidos (Roldán y Álvarez, 2002).

Eficiencia de remoción de contaminantes con plantas acuáticas

Los sistemas de tratamiento con plantas acuáticas son una alternativa eficiente y económica para los tratamientos de aguas residuales, debido a sus menores costos de construcción, operación y mantenimiento frente a los ecosistemas convencionales. Sin embargo, la remoción de patógenos no es del todo clara. Se han obtenido porcentajes entre 80 y 99% de la remoción de coliformes fecales y *E. Coli* en algunos estudios (Gersberg, 1989).

La remoción con micrófitas se atribuye a procesos de sedimentación, absorción y remoción de sólidos suspendidos y materia orgánica. Si bien no es clara la incidencia de las variables fisicoquímicas asociadas a la presencia de las plantas acuáticas (Williams *et al.* 1995).

Henry *et al.* (2005), evaluaron la eficiencia de remoción de contaminantes procedentes por medio de tres macrófitas acuáticas flotantes (*Eichhornia Crassipes*, *Pistia Stratiotes* y *Salvinia molesta*), encontrando que las especies *E. Crassipes* y *P. Stratiotes* son más eficientes en la eliminación de fosfato alcanzando porcentajes de remoción de 82% y 83.3% respectivamente, y de eliminación de nitrógeno total (46,1% y 43,9%, respectivamente), posibilitando el reusó de los efluentes en la piscicultura, así ellos mismos (Henry *et al.* 2008), evaluaron la eficiencia de dos especies de macrófitas flotantes Lirio Acuático (*Eichhornia Crassipes* y *Pistia Stratiotes*) en el tratamiento de efluentes en un vivero de reproducción de camarones canela (*Macrobrachium amazonicum*), efluente de característica similar al de vertimiento procedente del lago tilapia roja. No hubo diferencias significativas en la remoción de nutrientes por parte de las dos especies vegetales, obteniendo los siguientes resultados: 71,6% por *E. Crassipes*; 69,9% por *P. Stratiotes* en fósforo total; 54,3% por *E. Crassipes*; 54,5% por *P. Stratiotes* de N-nitritos; 40% por *E. Crassipes*, 38% por *P.*

Stratiotes de N total; 40% por E. Crassipes, 38,8% por P. Stratiotes de N-nitrato; 32,3% por E. Crassipes, 34,7% por P. Stratiotes de N amoniacal.

Walstad (2003), evaluó la capacidad de la Pistia Stratiotes para la absorción de nitrato y amonio, con el objetivo de determinar el tiempo requerido para la absorción de dichos nutrientes, a través de la colocación de las plantas en vasos con soluciones nutritivas con concentraciones crecientes de nitrógeno, logrando absorber en 4 horas el amonio y en 71 horas (casi 3 días) el nitrato, concluyendo que el amonio, eventualmente, inhibe la absorción y la asimilación del nitrato, debido a que las plantas acuáticas requieren de mayor energía (provista por la energía lumínica) para absorber el nitrato, en comparación del amonio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del sitio de estudio

El presente trabajo de observación se realizó en la (PTAR), de la UAAN que se localiza en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México cuya localización geográfica es:

25° 21' 22.31" Latitud Norte y 101° 2' 4.15" Longitud Oeste. (Figura.1).

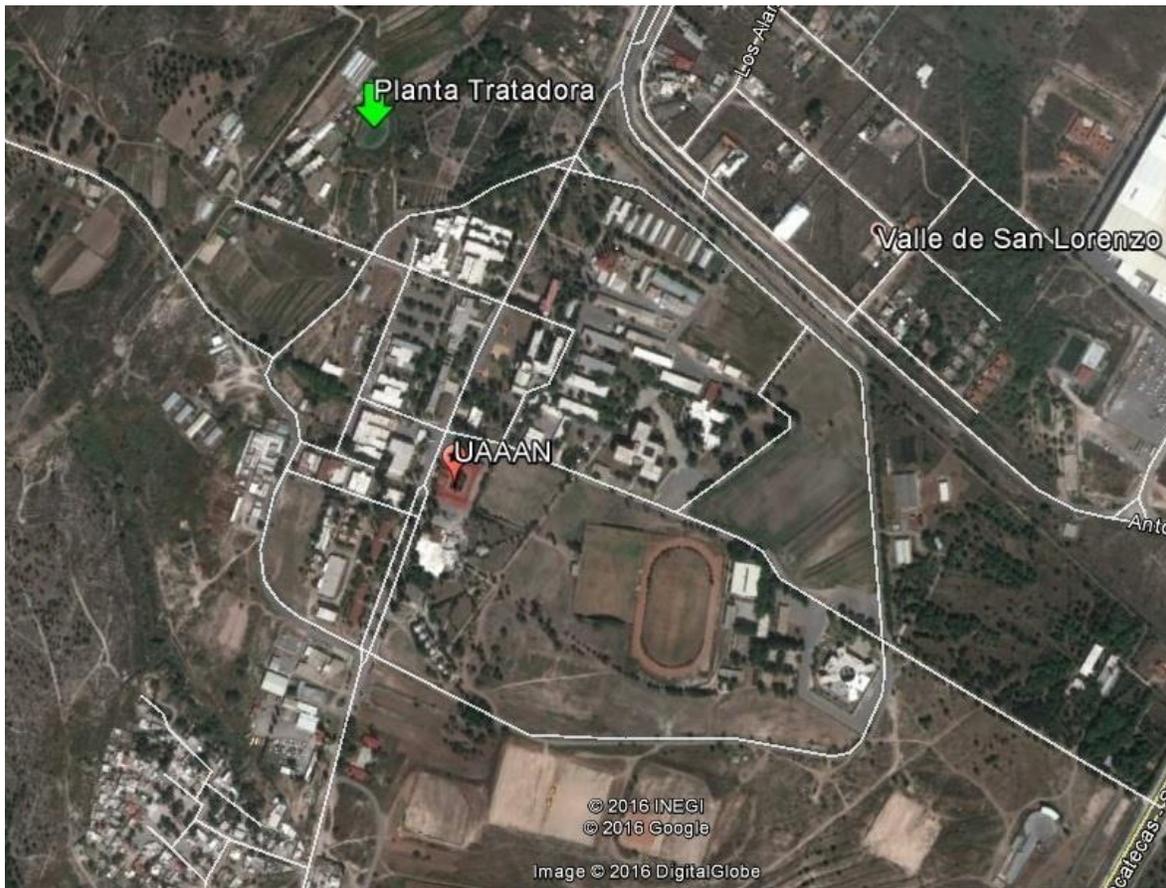


Figura 1. Localización del sitio experimental.

Metodología

En la PTAR se localizaron seis sitios de muestreo que corresponden a las diferentes etapas de tratamiento del agua residual (Figura 2). Donde había desarrollo de plantas que crecieron al azar y las sembradas específicamente para el tratamiento. Estas son Punto 1 Pasto, Punto 2 Caña de las indias, Punto 3 Lirio acuático, Punto 4 Carrizo, Punto 5 Junco 1, Punto 6 Junco 2.

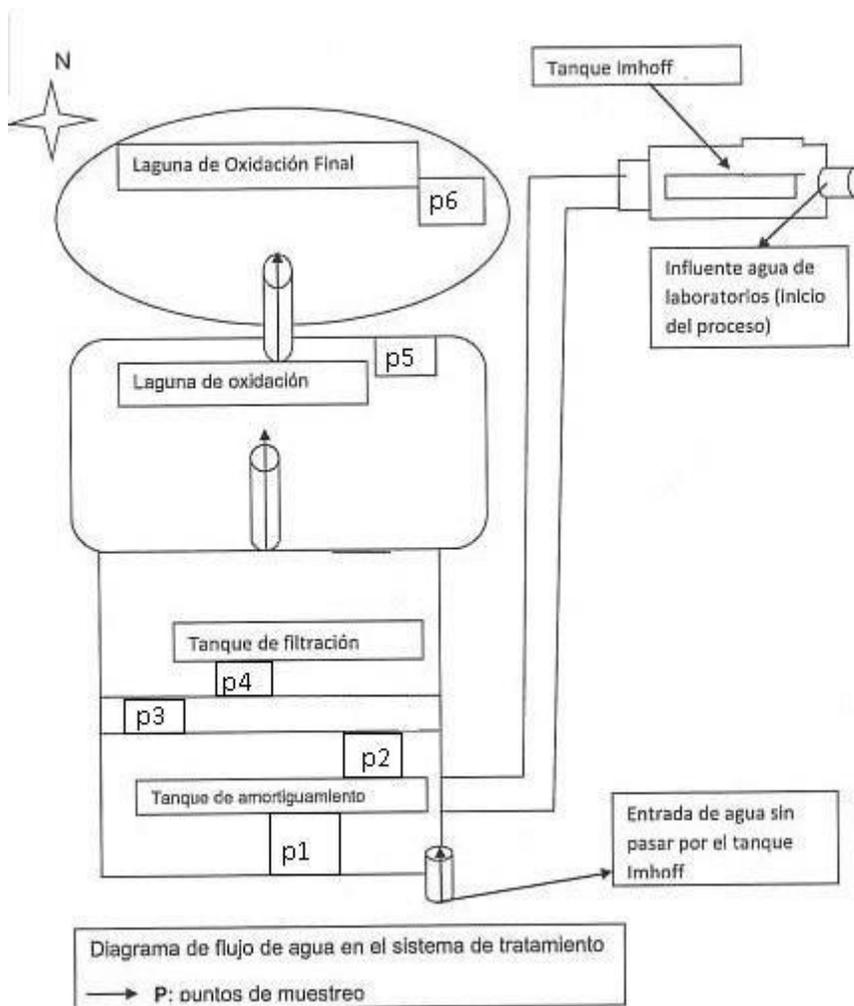


Figura 2. Planta de tratamientos de agua residual y puntos de muestreo

El flujo de la PTAR es intermitente, por lo cual para el trabajo se realizaron tres muestreos de planta durante el periodo enero-junio 2015, el primero en el mes de febrero, el segundo a finales de marzo, cuando el funcionamiento de la PTAR estaba prácticamente al 100 por ciento y el tercer muestreo durante el mes de mayo. También se realizó un muestreo de agua en cinco puntos y dos de lodos, donde estos estaban presentes.

Análisis de planta, agua y lodo

Una vez obtenidas las plantas, en los diferentes puntos de muestreo se llevaron al laboratorio de química, del Departamento de Ciencias del Suelo, donde se colocaron en una estufa a una temperatura de 70 °C, hasta que se secaron totalmente (aproximadamente 72 horas) posteriormente se molieron y se pesó un gramo de muestra la cual se colocó en un recipiente donde se le agregó 10 ml ácido nítrico concentrado. (González. 2011), llevándose a digestión, en un digestor a base de microondas tecnología MARS 6 ONE TOUCH. Una vez digeridos se recuperaron y aforaron a 50 ml cada una de las muestras. Los análisis realizados a los diferentes tipos de plantas recolectadas fueron Ca, Mg, K, Na, Fe, Zn, Cu, Mn, Pb y Cr.

En las muestras de agua se realizaron los análisis correspondientes para las siguientes variables: pH, conductividad eléctrica, Ca, Mg, K, Na, Fe, Zn, Cu, Mn, Pb y Cr (Pérez-Díaz, 2011).

Los lodos obtenidos en los dos puntos de muestreo también se digirieron por el método de vía húmeda, pero en este caso, para la digestión se utilizaron ácido nítrico y ácido clorhídrico concentrados y se llevaron a una placa, hasta eliminación de los ácidos y posteriormente se recuperaron y aforaron a 100 ml. Se realizaron los análisis respectivos de los siguientes elementos químicos Ca, Mg, K, Na, Fe, Zn, Cu, Mn, Pb y Cr. La cuantificación de los elementos en todas las muestras (planta, agua y lodo) se realizó mediante un equipo de absorción atómica Varían Spectr AA 5.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de las aguas residuales

De los análisis de agua y su cuantificación, presentados en el Cuadro 1. Se puede observar que el pH va de ligeramente alcalino a alcalino, dependiendo del punto de muestreo, siendo el más bajo al inicio del tratamiento de las aguas y donde mayor carga orgánica existe y el valor mayor al final (laguna de oxidación) donde prácticamente el agua ya está lista para su uso y solamente es un almacenamiento. Al respecto Pérez-Díaz *et al.* (2016), encontraron valores muy semejantes e indicaron que en estas condiciones el agua es ligeramente alcalina.

Cuadro 1. Resultados de los análisis de agua en los diferentes sitios de la planta tratadora de aguas residuales.

Sitios	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$										
			Ca	Mg	K	Na	Fe	Zn	Cu	Mn	Pb	Cr
1	6.9	2000	120	63	15	88	0.2	0.1	0.02	0	0.3	0
2	7.2	1800	107	59	16	65	0.1	0	0.02	0	0.2	0
3	7.3	1800	105	59	12	64	0.1	0	0.01	0	0.2	0
4	7.4	2000	108	60	10	64	0.1	0	0.01	0	0.2	0
5	7.7	2000	103	59	11	125	0.1	0	0.01	0	0.2	0

Con respecto a la conductividad eléctrica, esta se encontraron entre 1800 y 2000 $\mu\text{S cm}^{-1}$ lo que condicionaría el agua para su uso agrícola ya que, de acuerdo con (Richards, 1954), el agua con conductividades eléctricas como las encontradas en este estudio, se clasifican con peligro de salinidad alto.

En el Cuadro 1. Se reportan los resultados de los elementos alcalinotérreos y se puede observar que los valores más altos son los del Ca, Na, Mg y finalmente los valores más bajos de concentración son para el K; semejantes valores encontró (Pérez-Díaz *et al.* 2016), con respecto al Ca, Mg y K y valores más altos para Na.

En el mismo cuadro, se observa que no se detectó presencia Zn en cuatro de los sitios de muestreo y en el caso del Cr y Mn no se presentaron en ninguno de los sitios de muestreo. El Fe, Zn, Cu y Pb se encontraron en el primer sitio de muestreo, donde se encuentra la mayor contaminación y donde prácticamente inicia el tratamiento de las aguas. Posteriormente los elementos Fe, Cu y Pb se encontraron presentes en el resto de los puntos de muestreo, pero en concentraciones más bajas 0.1, 0.1 y 0.2 mg L⁻¹, respectivamente.

Pérez-Díaz *et al.* (2016); encontraron valores semejantes de metales pesados en su investigación e indicaron que la concentración de estos elementos está influenciada por el pH de las aguas ya que cuando se tienen condiciones ligeramente alcalinas algunos metales precipitan como especies de bicarbonato-carbonato y se acumulan en los sedimentos; como se observó en este trabajo estos metales están menos disponibles en el agua, de manera que los elementos analizados en este estudio se encuentran dentro de los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-001SEMARNAT-1996. Para la descarga del agua residual en cuerpos receptores.

Análisis elemental de los lodos de la PTAR

Para el caso de los lodos estos se muestrearon exclusivamente donde había la presencia a simple vista de ellos y donde se tiene desarrollo de plantas, en el Cuadro 2, se presenta el contenido de elementos totales en los lodos muestreados, en general se puede observar que para el caso de los metales alcalinotérreos hubo algunas diferencias pero estas pueden ser consideradas como pequeñas en lo que respecta al

Mg, K y Na, para el calcio la diferencia es más importante variando de 16.92 % para el lodo uno a 11.52 % en el dos.

Cuadro 2. Análisis elemental obtenido de las diferentes muestras de lodos

Puntos de muestra	Ca	Mg	K	Na	Fe	Zn	Cu	Mn	Pb	Cr
	%				mg kg ⁻¹					
1 (inicio)	16.92	0.54	0.09	1.78	2560	600	8.0	120	90	30
2 (laguna)	11.52	0.60	0.20	1.58	3640	495	16.0	100	100	80

Los metales pesados y algunos micronutrientes que se presentan en el Cuadro 2 se observa que varían también dependiendo del tipo de lodo, el Fe es el que se presenta en cantidades elevadas en ambos lodos y después el Zn con un valor de 600 mg kg⁻¹ en el lodo uno, valores muy semejantes a los encontrados en este trabajo, reporto (González, 2011), en su trabajo de tesis sobre metales pesados en los lodos de la PTAR de la UAAAN, es importante comentar que tanto este autor, como en este estudio se encontró Cromo en los lodos, lo que indica que existe algún residuo con este elemento, que proviene del cromo usado en los laboratorios de la universidad para el análisis de materia orgánica, sin embargo este y todos los demás elementos reportados en la (NOM-004-SEMARNAT-2002), como de riesgo para lodos y biosólidos que serán aplicados al suelo, se encuentran muy por debajo de los límites máximos permisibles.

Análisis elemental en planta

La absorción de elementos por parte de las plantas está condicionada por el elemento, su concentración y disponibilidad, especie vegetal y su interacción con el suelo y agua.

Los resultados de la cuantificación de los elementos encontrados durante el primer muestreo, en los diferentes tipos de plantas que se desarrollan en la PTAR, se presentan en el Cuadro 3. En general se puede observar que las plantas muestreadas tienen diferente poder de absorción de elementos independientemente de estos, así se tiene que para calcio las que más absorbieron son junco 2, lirio, caña de las indias y pasto, con 2.7, 2.19, 2.02 y 2.02 % respectivamente, para magnesio los valores más altos, superiores a 0.3 % fueron caña de indias y junco 1; para potasio las mejores plantas en cuanto absorción con valores arriba de 2.0 % son lirio y junco 1, el carrizo también absorbe buena cantidad de potasio pues reporta en este primer muestreo 1.64 %; con respecto a sodio, que si bien no es esencial para el desarrollo de las plantas, en este caso de estudio está en cantidades abundantes por el tipo de agua que es de origen doméstico y se encuentra en forma soluble siendo absorbido preferentemente por lirio y caña de las indias.

Cuadro 3. Análisis elemental de las diferentes plantas acuáticas y humedales artificiales en la PTAR. Primer muestre

	Ca	Mg	K	Na	Fe	Zn	Cu	Mn	Pb	Cr
Plantas	%				mg kg ⁻¹					
Pasto	2.02	0.101	0.505	0.82	1400	490	40	25	25	20
Caña indica	2.02	0.307	0.355	1.52	480	20	ND	20	30	15
Lirio Acuático	2.19	0.167	2.065	1.725	2455	390	15	35	30	15
Carrizo	0.295	0.090	1.640	0.750	245	60	5	10	10	15
Junco 1	0.47	0.308	3.165	0.80	130	20	5	90	10	10
Junco 2	2.7	0.279	0.785	0.795	325	70	10	25	25	15

ND No detectable

Respecto a la absorción de los micronutrientes y metales pesados las superiores plantas son en general, el lirio y el pasto, seguidas por caña de las indias y junco 2.

La caña de las indias es la única que no reporta absorción de Cu en este estudio. Para los metales pesados los valores más altos encontrados en planta son para lirio, caña

de las indias, pasto y junco 2, ya que se encontró Pb y Cr, en sus tejidos, aunque estas cantidades son pequeñas, tienen gran significancia por la influencia que pudieran tener desde el punto de vista de la limpieza de las aguas de elementos pesados.

En el Cuadro 4 se presentan los resultados del análisis de los elementos encontrados en las plantas durante el segundo muestreo, es importante señalar que este muestreo se llevó a cabo cuando el funcionamiento de la PTAR estaba prácticamente al 100%, es decir, los cursos y prácticas de laboratorio estaban a mitad del semestre, y por lo tanto se tenía un flujo continuo de agua. Por lo cual, los resultados obtenidos difieren de los del primer muestreo, sobre todo para el caso de la absorción de Ca en el Pasto, Caña de las indias, Lirio acuático y Junco 2, donde este elemento disminuyó de valores cercanos al 2 % a valores menores de 1%. Para el Mg se observa que esta tendencia ocurre únicamente para pasto, Caña de las indias, Junco 1 y Junco 2.

Cuadro 4. Análisis elemental de las diferentes plantas acuáticas y humedales artificiales en la PTAR. Segundo muestreo.

Plantas	Ca	Mg	K	Na	Fe	Zn	Cu	Mn	Pb	Cr
	%				mg kg ⁻¹					
Pasto	0.11	0.054	0.75	0.895	65	40	1	10	5	10
Caña indica	0.32	0.226	1.16	1.57	95	55	3.5	10	10	10
Lirio Acuático	0.90	0.216	0.925	1.505	150	55	2.5	10	10	10
Carrizo	0.42	0.127	0.405	1.025	210	55	2	15	15	15
Junco 1	0.46	0.087	1.128	1.135	185	55	1	95	10	95
Junco 2	0.66	0.169	0.520	1.25	130	30	4.5	10	15	15

En general el contenido de K, sigue la misma tendencia que el Mg y el Na aumentaron en prácticamente todas las plantas analizadas, en este segundo muestreo.

En el caso del micronutrientos y metales pesados se puede observar que la cantidad de estos, disminuyó con respecto a lo encontrado en el primer muestreo, donde el agua tenía estancada aproximadamente tres meses y en este segundo muestreo ya tenía aproximadamente 60 días en movimiento. Esta tendencia indica que algo que se debe tomar en cuenta en la absorción de los elementos, es el tipo de elemento químico, las diferentes plantas que se desarrollan en la PTAR y el funcionamiento que tenga esta.

El tercer muestreo realizado se llevó a cabo en el mes de mayo y posterior a una inactividad prácticamente total de la PTAR, se observa en el Cuadro 5, nuevamente una tendencia de aumenten la concentración de los elementos alcalinotérreos en los tejidos de las plantas, siendo más notorio en Junco 1, Pasto y Caña de las indias para Ca y Mg. Para K las plantas que más absorbieron fueron Lirio acuático, Carrizo y Junco 2 y finalmente, para Na las plantas que mejor absorbieron fueron Lirio acuático, Caña de las indias Junco 1.

En cuanto a los micronutrientos y metales pesados nuevamente se observa la misma tendencia que con los macronutrientos, con cantidades más altas en comparación con el segundo muestreo. Únicamente el micronutriente que no sigue esta tendencia es el Zn el cual en general disminuyo en este tercer muestreo.

Cuadro 5. Análisis elemental de las diferentes plantas acuáticas y humedales artificiales en la PTAR. Tercer muestreo.

Plantas	Ca	Mg	K	Na	Fe	Zn	Cu	Mn	Pb	Cr
	%				mg kg ⁻¹					
Pasto	1.29	0.289	1.51	1.01	360	52.5	8.5	20	15	15
Caña indica	1.06	0.309	1.26	1.58	220	33	2.5	30	15	15
Lirio Acuático	0.17	0.296	5.42	1.63	235	40	3.5	25	20	15
Carrizo	0.60	0.288	5.25	0.95	210	25	4	25	15	15
Junco 1	2.09	0.302	1.01	1.435	1365	50	14	25	25	20
Junco 2	0.72	0.245	2.54	0.950	1800	15	4.5	45	45	15

CONCLUSIONES

De las seis especies evaluadas, el carrizo y el lirio acuático, son los que absorbieron la superior cantidad de nutrientes y metales pesados, lo que se refleja en el contenido de biomasa.

LITERATURA CITADA

Arauzo, M., A. Díez J., P. Hernáiz. 2003. Estimación de balances hídricos y lixiviación de nitratos en sistemas agrícolas. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo 6: 39-44.

Armstrong, W., Armstrong, J., Beckett, P. M. 2000. Measurement and Modeling of Oxygen Release from Roots of *Phragmites Australis*, pp: 41-52.

Ashton, P. S y Mitchell, D. S. 1989. Aquatic plants: Patterns and modes of invasion, attributes of invading species and assessment of control programs, In: J. A. Drake, H. A. Mooney, F. di Castri, R. H. Groves, F. J. Kruger, M. Rejmanek y M. Williamson (eds.), Biological invasions: a global perspective. Scope 37. John Wiley, Nueva York, pp. 11-154.

Atlas, R. M., Bartha, R. 2002. Ecología Microbiana y Microbiología Ambiental Prentice Hall, 4th Ed.

Bell, G. 1997. Ecology and management of *Arundo donax*, and approaches to riparian habitat restoration in southern California, In: J.H. Brock, M. Wade, P. Pysek y D. Green (eds.), and Plant invasions: Studies from North America and Europe.

Blackhuys Publishers, Leiden, Países Bajos, pp. 103-113.

Bendezu, S., Oyague, J., Romero, A., Garcia, R., Munoz, Y., Escalona, N. 2005.

Journal of the Chilean Chemical Society, 4; 677-684.

Brix, H. 1994. Functions of macrophytes in constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 29 (4), pp: 71-78.

Brix, H., 1999. How “green” are aquaculture, constructed wetlands and conventional Wastewater treatment system. *Water Sci.Techno.*40 (3), 45-50.

Brix, H., Schierup, H. 1990. Soil Oxigenation in Constructed Reed Beds: The Role of Macrophyte and Soil-Atmosphere Interface Oxygen Transport. In: Cooper, P.F. y Findlater, B.C. (Eds.), “Proceedings of the Internacional Conference on the Use of Constructed Wetlands in Water Pollution Control”. Pergamon Press. Oxford, Inglaterra. Pp: 53 a 66.

CEPIS. 2001. Manual de evaluación y manejo de sustancias tóxicas en aguas superficiales. Washington, DC: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Organización Panamericana de la Salud, División de Salud y Ambiente, Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud, pp. 24.

Champion, P. 2004. Managing tomorrow’s weeds today a risk assessment approach to aquatic weed management. *Water y Atmos.* 12: pp: 14-15.

Cheng, S., Grosse, W., Karrenbrock, F., Thoennesen, M. 2002. Efficiency of Constructed Wetlands in Decontamination of Water Polluted by Heavy Metals. *Ecological Engineering*, 18, pp: 317-325.

Comisión Nacional del agua (CNA). 2007. Situación del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento. Comisión Nacional del Agua. SEMARNAT. México D.F.

Comisión Nacional del Agua (CNA). 2009. Ley de aguas nacionales y su reglamento, 2da reimpresión. SEMARNAT. México.

Córdova, R. 2009. Humedal artificial para tratamiento de aguas residuales en la Universidad Tecnológica del Norte de Guanajuato. Ponencia fu050909.pp:5

CONANP. 2012. Comisión Nacional De Áreas Naturales Protegidas. Listado de Áreas Certificadas. Última modificación: 01 Agosto del 2012. Disponible en: http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/listado_areas.php.

Cooper, P. F. 1999. A review of the design and performance of vertical-flow and hybrid reed bed treatment systems. *Water Science and Technology*, 40(3), pp: 1–9.

Dallas, S. 2005. Reedbeds for the Treatment of “Las Aguas Grises” as an Application of Ecological Sanitation in Rural Costa Rica, Central America." Murdoch University, Western Australia.

Delgadillo, O. 2010. Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Nelson Antequera. CEDIB/Plural Editores, La Paz, Bolivia.

Demirak, T.A., Yilmaz, F., Tuna, A. L, Ozdemir, M. 2005. Heavy metals in water, sediment and tissues of *Leuciscus cephalus* from a stream in southwestern. *Chemosphere* pp: 1 – 8.

Dierberg, F.E., Brezonik, P. L. 1984. Nitrogen and Phosphorus Mass Balances in a Cypress Dome Receiving Wastewater. En Ewel, K.C. y Odum, H.T. (Eds.) “Cypress Swamps”. University of Florida Press, Gainesville, USA. pp: 112-118.

Dudley, T. L. 2000. *Arundo donax* L. En C.C. Bossard, J. M. Randall y M.C.

Hoshovsky (eds.), *Invasive plants of California's wild lands*. University of California Press, Berkeley, pp. 53-58.

Dugo, G. L., La Pera, A., Bruzzese, T. M., Pellicano, V., Turco, L. 2006. Concentration of Cd (II), Cu (II), Pb (II), Se (IV) and Zn (II) in cultured sea bass (*Dicentrarchus labrax*) tissues from Tyrrhenian Sea and Sicilian Sea by derivative stripping potentiometry. *Food Control* 17: 146 - 152.

Fernández, J. I. 2004. Manual de Fito depuración, Ayuntamiento de Lorca, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid.

Frers, C. 2012. El uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales. [19 de mayo del 2012]. Disponible en <http://elmercuriodigital.es/content/view/5520/174/>.

Fu, F., Wang, Q. 2011. Removal of Heavy Metal Ions from Wastewaters: A Review. *Journal of Environmental Management*, 92, 407-418.

Gersberg, K. M. 1989. Pathogen removal in constructed wetlands. In: constructed wetlands for wastewater treatment, Municipal, industrial and agricultural. Hammer, D. (Ed). Lewis Publishers, Chelsea, Michigan, pp. 541-547.

González, G. A. 2011. Metales pesados en lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de la UAAAN. Tesis de licenciatura. UAAAN. Saltillo, Coahuila. pp: 49.

Gopal, B. 1999. Natural and constructed wetlands for wastewater treatment: potentials and problems. *Water Sci. Technol.* p: 40.

Henry, D. J., Guidotti, C. V. and Thomson, J. A. 2005 .The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelitic biotite: Implications for Geothermometry and Tisubstitution Mechanisms. *American Mineralogist*, 90, pp: 316-328.

Holm, L. G., Plucknett, D. L., Pancho, J. V. and Herberger, J. P. 1977. The world's worst weeds. Distribution and biology. The University Press of Hawaii, Honolulu.

INE. 2004. Instituto Nacional de Ecología. La contaminación por mercurio en México. *Gaceta Ecológica*. 72, 21-34.

Kadlec, R. and Knight, R. 1996. Treatment Wetlands. CRC Press. Lewis Publishers, Boca Raton, F1. USA.

Kriesch, P. 2007. Training and implementation guide for pathway definition, risk analysis, and risk prioritization. National Invasive Species Council. Aquatic Nuisance Species Task Force (ANSTF) and National Invasive Species Council (NISC) Prevention Committee. Estados Unidos de América (USA).

Lara, J. A. 1999. Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Tesis de maestría. Universidad Politécnica de Cataluña, España.

Loredo, J., Álvarez, R., Ordóñez, A. 2003. Release of Toxic Métales and Metalloids from the Ruedos Mercury Mine (Asturias, Spain). *Science of the Total Environment*, 340, 247-260.

March, I. J., Martínez, M. 2007. Especies invasoras de alto impacto a la biodiversidad. Prioridades en México. IMTA, Conabio, geci, Ari américa, The Nature Conservancy, México.

Martínez, C. M., García, L. Sánchez, P. Aizpurua, A., Ruiz, L. Antigüedad, I. 2003. Lixiviación de nitratos bajo cultivo de remolacha en la zona vulnerable del acuífero cuaternario de Victoria C-Gasteiz (País Vasco). *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo* 4: 25-32.

Miranda, R. M. 2000. Desarrollo, situación actual y aplicaciones potenciales de los humedales artificiales de flujo horizontal de México. Tesis de Licenciatura, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Mitsch, W., Gosselink, J. 1993. *Wetlands*. New York. Van Nostrand Reinhold, segunda edición: pp: 722.

Mitsch, W. and Wu, J. 1995. Wetlands and global change. In: Lal, R., Kimble, J., Levine, E., Stewart, B.A. (Eds.), *Advances in Soil Science, Soil Management and Greenhouse Effect*. CRC Lewis Publishers, Boca Raton, FL, pp.230.

[Minambiente, Ministerio del Medio Ambiente. 2002. Guía de Gestión de Manejo, Tratamiento y Disposición Final de Aguas Residuales Municipales, Bogotá, Colombia. Ministerio de salud. Bogotá, Colombia.

Mora-Olivo, A., D. F. Thomas., M. Martínez. 2008. *Hygrophila polysperma* (Acanthaceae), una maleza acuática registrada por primera vez para la flora mexicana. *Rev. Mex. Biodivers.* 79(1): pp: 265-269.

Mujeriego, R. 1990. Manual Práctico de Riego con Agua Residual Municipal Regenerada. Calidad de un Agua de Riego. [Noviembre, 1990]. Disponible en: www.mie.esab.upc.es/arr/T21E.htm.

Nodal, E. 2001. Procesos biológicos aplicados al tratamiento del agua residual. "Ingeniería hidráulica y ambiental", Vol. 22, No. 4, 52 – 56.

NOM-001-SEMARNAT. 1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminación en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Publicado en el Diario Oficial de la Federación Mexicana el 6 de enero 1997.

NOM-002-SEMARNAT. 1996. Que Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de las aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano municipal. Publicado en el Diario Oficial de la Federación Mexicana el 3 de junio de 1998.

NOM-003-SEMARNAT. 1997. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Publicado en el Diario Oficial de la Federación Mexicana el 14 de enero de 1998.

NOM-004-SEMARNAT. 2002. Protección ambiental.-lodos y biosólidos, especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para aprovechamiento y disposición final. Publicado en el Diario Oficial de la Federación Mexicana el día 18 de junio de 2003.

Novelo, A. y Martínez, M. 1989. *Hydrilla verticillata* (Hydrocharitaceae), problemática maleza acuática de reciente introducción en México. An. Inst. Biol. Univ. Nac. Rutón. Mex. Serie Botánica 58:97-102

Novotny, V. and Olem, H. 1994. Water quality: prevention, identification and management of diffuse pollution. Van Nostrand Reinhold, New York. pp:1054.

Olgúin, E. and Hernández, E. 1998. Use of aquatic plants for recovery of nutrients and heavy metals from Wastewater. Institute of Ecology, Environmental Biotechnology. Vancouver. Disponible en: [www.idrc.ca/ industry/Canada](http://www.idrc.ca/industry/Canada).

ONG (Organización No Gubernamental).1997. Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos. Estudio FAO Riego y Drenaje No. 55. Roma. p 41-58.

Oswald, U. 2011. Retos de la investigación del agua en México. UNAM.CRIM. México.

Otálora, A. 2011. Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales de alta tasa en la locación petrolera de Caño Gandúl. Trabajo final de maestría. Universidad Nacional De Colombia, Bogotá, Colombia.

Pérez –Díaz, J. P. 2011. Metales pesados y calidad agronómica del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de la UAAAN. Tesis de Licenciatura Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista Saltillo, Coahuila, México.

Pérez, D. J. P., Peña, C. E., López, C. R., Hernández, T. I. M. 2016. Metales pesados y calidad agronómica del agua residual tratada. IDESIA. Volumen (34): pp.19-25.

Petkova, S. V., L. Rivera, H., M. Pina S., M. Avilés, F., S. Pérez, C. 1997. Evaluación de diversos materiales para la remoción de arsénico de agua para consumo humano. Memorias del XI Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales. FEMISCA, México.

Pettecrew, E. L., Kalff, J. 1992. Water Flow and Clay Retention In: Submerged Macrophyte Bed. Can. J. Fish. Aquat. Sci, 49, pp: 2483-2489.

Pisano, E. 1976. Cormófitos acuáticos de Magallanes. Anales Instituto de la Patagonia 7: pp: 135.

Prager, J. C. 2002. Environmental contaminant referente data book, volume I, Wiley-Interscience, USA. pp. 376-379, 800-807, 870-874,

Ramírez, C., Romero, M., Riveros, M. 1979. Habit, habitat, origin and geographical distribution of Chilean vascular hydrophytes. Aquatic Botany 7: p: 241-253.

Richards, L. A. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA Handbook 60: 87- 115.

Rodríguez-Monroy, J., Durán de Bazúa., C. 2006. Remoción de nitrógeno en un sistema de tratamiento de aguas residuales usando humedales artificiales de flujo vertical a escala de banco. Tecnol. Ciencia. Recalcó. Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal. Ed. 21. Pp: 25-33.

Roldán, G., L. F. Álvarez. 2002. Aplicación del jacinto de agua (*Eichhornia Crassipes*) para el tratamiento de aguas residuales y opciones de reuso de la biomasa producida. Revista Universidad Católica de Oriente. 15: 56-71.

Romero, M. 2009. Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. Revista Internacional de Contaminación Ambiental 25 (3): pp. 157-167.

Shon, H. K., Vigneswaran, S. 2006. Effluent Organic Matter (EFOM) in wastewater: constituents, effects, and treatment. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 36, 327-374.

Spacie, A. and Hamelink, J. L. 1995. Bioaccumulation En: Rand GM (Ed) *Fundamentals of Aquatic Toxicology*. Taylor and Francis Washington. pp. 1052-1082.

SSA. 2006. *Programa de Acción: Salud Ambiental*. México, D. F. Secretaría de Salud. Programa Secretarial. 210 pp.

Tabacchioni, S., Bevivino, A., Dalmastrri, C., Chiarini, L. 2002. Burkholderia cepacia complex in the rhizosphere: a minireview. *Ann. Microbiol.* 52, 103-117.

USEPA (United States Environmental Protection Agency). 2000. *Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*. USEPA Office of Research and Development. Cincinnati. OH.

Villaseñor, J. L., F. J. Espinosa. 1998. *Catálogo de malezas de México*. UNAM– Fondo de Cultura Económica, México.

Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P. F., Green, M. B., Haberl, R. 1998. *Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe*. Backhuys Publishers, Leiden, Holanda.

Walstad, D. 2003. *Plantas acuáticas y Filtración Biológica*. Ashland en Ohio. Pp: 1-4.

Williams, J., Bahgal, M. E., Ford, M. and Buller, J. 1995. Mineralisation and pathogen removal in gravel bed hydroponic. *Constructed. Wetlands for wastewater treatment*. *Wat. Sci.Tech*, 32 (3), 49-58.

Zambrano, J. 1974. *Las malezas acuáticas*. *Revista de la Facultad de Agronomía (Luz)*. Universidad de Zulia. Maracaibo-Venezuela. 2 (4): 87-94.