

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE ZOOTECNIA Y ECOLOGÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**REMOCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA POR MEDIO DE
HUMEDALES CONSTRUIDOS CON SUSTRATO DE ZEOLITA
CLINOPTILOLITA Y *ELEOCHARIS MACROSTACHYA***

Por

I.E. RAFAEL ESCOBEDO BAUTISTA

**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN ECOLOGÍA Y MEDIO
AMBIENTE**

Chihuahua, Chih. México

Diciembre 2021



Remoción de arsénico en agua por medio de humedales construidos con sustrato de zeolita clinoptilolita y eleocharis macrostachya. Tesis presentada por Rafael Escobedo Bautista como requisito parcial para obtener el grado de Maestría Profesional en Ecología y Medio Ambiente, ha sido aprobada y aceptada por:

Ph.D. Carlos Ortega Ochoa
Director de la Facultad de Zootecnia y Ecología

D.Ph. Agustín Corral Luna
Secretario de Investigación y Posgrado

Ph.D. Iván Adrián García Galicia
Coordinador Académico

Dra. Leonor Cortés Palacios
Presidente

13 de diciembre de 2021

Fecha

Comité:
Ph.D. Federico Villarreal Guerrero.
Dr. Gilberto Sandino Aquino de los Ríos.
Dr. Mario Alberto Olmos Márquez.

© Derechos Reservados
AUTOR: RAFAEL ESCOBEDO BAUTISTA
DIRECCIÓN: PERIFÉRICO FRANCISCO R. ALMADA KM.1, CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO C.P. 31453
DICIEMBRE 2021

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por su luz en mi vida, a mis padres por sus palabras de ánimo y consuelo, a la Dra. Leonor Cortés Palacios por su siempre presente e incondicional apoyo, al Dr. Martín Martínez Salvador por la motivación a través de su singular desempeño, a mis compañeros y colegas por la competencia propuesta, a la Facultad de Zootecnia y Ecología porque Aprendí Investigando y ahora Afirmo Sabiendo, pero sobre todo agradezco a la vida por presentarme la oportunidad cuando estaba preparado, por haberme enseñado que hay que callar cuando habla quien más sabe pero también el deber de expresar mi opinión cuando la ocasión lo amerita, por ver a las generaciones futuras y compartir la oportunidad de crear un mundo mejor, por no declinar, por siempre creer y porque mis sueños son de SER, no de TENER.

DEDICATORIA

Dedico ésta investigación a las futuras generaciones de remediadores, reductores, recicladores y reutilizadores. Que la fe en un mejor futuro y la meta de vivirlo sea fuente de inspiración. Que la determinación por entregar un mundo mejor a las generaciones futuras sea el punto donde fijemos la mirada y que la fuerza de la conciencia tranquila por el sacrificio realizado nos acompañe en el trayecto a la consecución de nuestro destino.

CURRICULUM VITAE

El autor nació el 19 de diciembre de 1963 en la ciudad de Chihuahua, Chih. México.

2007-2012	Analista de laboratorio de ingeniería sanitaria, Facultad de Ingeniería UACH
2011-2015	Estudios de licenciatura en la Facultad de Zootecnia y Ecología
2016	Estancia en el Centro de Posgrados de la UPAEP: Desarrollo de plan de negocios para los servicios de laboratorio de parámetros ambientales (mayo). Eficiencia en sistemas de tratamiento de aguas residuales de rastros municipales (agosto). Tratamiento de relaves mineros para la remoción de cianuro por ozonificación (septiembre).
2012-Actualmente	Técnico de laboratorio de Parámetros ambientales de la FZyE

RESUMEN

REMOCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA POR MEDIO DE HUMEDALES CONSTRUIDOS CON SUSTRATO DE ZEOLITA CLINOPTILOLITA Y

ELEOCHARIS MACROSTACHYA

POR

I.E. RAFAEL ESCOBEDO BAUTISTA

Maestría en Ecología y Medio Ambiente

Secretaría de Investigación y Posgrado

Facultad de Zootecnia y Ecología

Presidente: Dra. Leonor Cortés Palacios

En el estado de Chihuahua, México, la demanda de agua es cubierta principalmente por mantos acuíferos. En 47, de los 67 municipios del estado, al menos en uno de los pozos de la red de abastecimiento, la concentración de arsénico rebasa el límite máximo permitido (LMP), por la normativa correspondiente. En la zona centro-sur-este del estado más del 73% de los pozos monitoreados por la JCAS en 2009, excedieron los 0.025 mg/lit de concentración de arsénico. Los humedales construidos son un método de remoción de compuestos contaminantes en aguas superficiales, incluso de aguas provenientes de mantos freáticos. La fitorremediación, complementada con sustrato de material adsorbente, es una solución sustentable al problema de contaminación natural y de origen antropogénico. El objetivo de este estudio fue analizar la eficiencia de humedales construidos de flujo superficial (HCFS) modificados con reactor de tanque agitado para la remoción de arsénico en agua para uso y consumo humano. Se colocó como sustrato zeolita clinoptilolita, en la

parte de la fitorremediación se utilizó *Eleocharis Macrostachya*. Los resultados de eficiencia de los HCFS modificados con reactor de tanque agitado mostraron un 87% de remoción de arsénico en promedio durante las seis pruebas experimentales. La zeolita presento concentración de arsénico en estado natural de 4.36 mg/kg, durante este experimento acumulo hasta 27.09 mg/kg. La *Eleocharis Macrostachya* presento niveles de arsénico antes del experimento de 5.02 mg/kg, al término de las pruebas experimentales los niveles de arsénico alcanzaron los 22.24 mg/kg. La *Eleocharis Macrostachya* es una planta rizofiltradora de arsénico.

ABSTRACT

REMOVAL OF ARSENIC IN WATER THROUGH WETLANDS CONSTRUCTED WITH ZEOLITE CLINOPTILOLITE SUBSTRATE AND ELEOCHARIS MACROSTACHYA BY I.E. RAFAEL ESCOBEDO BAUTISTA

In the state of Chihuahua, Mexico, the water demand is mainly supplied by water from aquifers. In 47 of the 67 municipalities of the State, at least in one of the wells in the supply network, the concentration of arsenic exceeds the maximum limit (ML), allowed by the corresponding regulations. In the central-south-eastern part of the state, more than 73% of the wells monitored by JCAS in 2009 exceeded 0.025 mg/lit of arsenic concentration. Constructed wetlands are a method of removing pollutant compounds in surface waters, AND even groundwater. Phytoremediation, complemented with an adsorbent material substrate, is a sustainable solution to the problem of natural and anthropogenic pollution. The objective of this study was to analyze the efficiency of modified Constructed Surface Flow Wetlands (CSFW) in removing arsenic from water for human use and consumption. Clinoptilolite zeolite was placed as substrate, in the phytoremediation part *Eleocharis Macrostachya* was used. The efficiency results of the CSFW modified with stirred tank reactor showed 87% arsenic removal on average during the six experimental tests. The zeolite presented a natural arsenic concentration of 4.36 mg/kg, during this experiment it accumulated up to 27.09 mg/kg. The *Eleocharis Macrostachya* presented arsenic levels before the experiment of 5.09 mg/kg, at the end of the

experimental tests the arsenic levels reached 22.24 mg/kg. *Eleocharis Macrostachya* is an arsenic rhizofilter plant.

CONTENIDO

	Página
DEDICATORIA	iv
CURRICULUM VITAE	v
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT	viii
CONTENIDO.....	x
LISTA DE CUADROS	xii
LISTA DE FIGURAS	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1
REVISIÓN DE LITERATURA	4
Arsénico	4
Arsénico En Agua De Uso Y Consumo Humano.....	4
Problemática Nacional.....	5
Problemática Regional.....	6
Problemática Local.....	6
Límites Máximos Permisibles De Concentración De Arsénico En Agua	8
Humedales Construidos	8
Humedales construidos de flujo superficial (HCFS).....	12
Reactor De Tanque Agitado Continuo	12
Fitorremediación	12
Ecotecnologías.....	13
Eleocharis Macrostachya	13
Zeolita.....	15
Intercambio de cationes.....	15
Zeolita clinoptilolita	18
Zeolitas en México.....	19
MATERIALES Y MÉTODOS	21
Ubicación Del Prototipo	21
Metodología Para Diseñar Un Prototipo De HCFS Modificados Con Reactor.....	21
Reactor de tanque agitado.....	22
Cama de cultivo	22
Área superficial de tratamiento.....	23
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	24

Número de macrofitas.....	25
Construcción Del Prototipo De HCFS Modificados Con Reactor.....	25
Verificación de operación de los HCFS.	32
Mantenimiento de los HCFS modificado con reactor.....	32
Costos de construcción del prototipo de HCFS modificados con reactor.....	32
Diseño Del Experimento.....	32
Definición De La Solución De Arsénico	36
Preparación de solución de arsénico	37
Cálculo de concentración de la solución de arsénico	38
Muestreos	38
Metodología para preparación y análisis de muestras.	40
Material De Laboratorio	42
Equipo:	45
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	46
Análisis De Muestras	46
Balance de materia	55
Análisis Estadístico	55
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	58
LITERATURA CITADA	60
APÉNDICE A	65
Observaciones Experimentales Del Comportamiento De La Planta Eleocharis macrostachya.....	65
APÉNDICE B	66
Metodología Para Difusión Y Transferencia De La Tecnología A La Comunidad Y Su Aplicación	66

LISTA DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Límites Máximos Permisibles de arsénico en agua para Uso y Consumo Humano.....	9
2	Yacimientos importantes de zeolita en México.....	20
3	Costos de materiales para construcción y funcionamiento de los HCFS.....	34
4	Concentración inicial de arsénico (mg/kg) en zeolita.....	43
5	Concentración inicial (mg/kg) de arsénico en <i>Eleocharis macrostachya</i>	44
6	Concentración inicial, desviación estándar y porcentaje de remoción en reactor de tanque agitado.....	47
7	Promedio, desviación estándar y porcentajes de remoción de tratamiento a 1 hora en HCFS.....	48
8	Promedios, desviación estándar y porcentajes de remoción de solución problema en contacto con HCFS a 24 horas....	49
9	Porcentajes de remoción acumulada, promedios acumulados y desviación estándar acumulada.....	50
10	Porcentajes totales de remoción de arsénico.....	52
11	Concentración de arsénico (mg/kg) en Zeolita, antes y después de pruebas experimentales.....	53
12	Concentración de arsénico (mg/kg) en raíz y tallo de <i>Eleocharis Macrostachya</i> antes y después de pruebas	

	experimentales.....	54
13	Prueba t para medias de dos muestras emparejadas. Variables de remoción 1er contacto vs variables de remoción 2° contacto.....	56

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Caracterización de zeolita clinoptilolita.....	16
2	Unidades de construcción de las zeolitas, dos tetraedros SiO ₄ y AlO ₄ unidos por compactación de vértices.....	17
3	Diseño de los HCFS modificado con reactor.....	26
4	Estructura interna de los HCFS.....	28
5	Impermeabilizado de las estructuras de los HCFS.....	29
6	Sustrato de grava de zeolita clinoptilolita.....	30
7	Instalación de impermeabilizado, sustrato, plantas y desagües.....	31
8	Distribución de los HCFS modificados con reactor.....	33
9	Cronograma de etapas de los HCFS.....	39

INTRODUCCIÓN

En 2006 en la ciudad de México se llevó a cabo el congreso internacional “Arsénico Natural en Mantos Freáticos de América Latina” donde se informó que, en varios países de Latinoamérica incluyendo México, el agua de uso y consumo humano presenta altas concentraciones de arsénico, lo cual pone en riesgo la salud de más de 4 millones de personas.

Áreas relacionadas directamente con actividades hidrotermales en Argentina, Chile, Japón, Nueva Zelanda, Estados Unidos, Francia entre otros presentan el problema de agua con altas concentraciones de arsénico (As) de manera natural (Masuda, 2018).

En zonas áridas la concentración de arsénico en aguas superficiales se agrava debido a la evaporación, provocando un aumento en la salinidad y el pH. Este proceso puede provocar concentraciones de 0.19 hasta 21.80 mg/lit como sucede en el lago Loa al norte de Chile (Ormachea *et al.*, 2016).

En México no existe información actualizada sobre la población expuesta al uso y consumo de agua contaminada con arsénico. Sin embargo, se estima que alrededor de 2 millones de personas se exponen diariamente al consumo de arsénico orgánico vía ingesta de agua, dependiendo de la región, de 0.03 hasta 0.59 mg/lit, entre estas localidades destacan Chihuahua, Sonora, Coahuila, Durango, Nuevo León, Baja California Norte, Sinaloa y Zacatecas (Flores *et al.*, 2009).

La explotación inmoderada de los mantos acuíferos se presenta en muchas regiones productivas del mundo. Dicha sobreexplotación representa una disminución en el potencial del acuífero y un aumento en los niveles de

concentración de elementos contaminantes naturales que ponen en riesgo la salud humana. Asegurar la sustentabilidad, el nivel potencial de suministro y la calidad de los acuíferos, es vital para garantizar a las generaciones futuras el suministro de agua (Gorelick y Zheng, 2015). Tres aspectos importantes que acentúan la sobreexplotación de los mantos acuíferos son la localización geográfica (zonas áridas), el alto crecimiento demográfico con la consecuencia del aumento en la demanda de agua, y el riego intensivo de cultivos. La zona central de Chihuahua está influenciada por estos tres factores (Espino-Valdés *et al.*, 2009).

De acuerdo con la norma de salud ambiental que regula la calidad del agua potable (NOM-127-SSAI-2000), el límite máximo permisible para la concentración de arsénico en agua para uso y consumo humano es de 0.025 mg/lit y los tratamientos específicos para la remoción de arsénico de acuerdo a esta norma son: coagulación, floculación, precipitación, filtración, intercambio iónico y osmosis inversa, o cualquier combinación de ellas.

Esta investigación se llevó a cabo con el uso de humedales construidos de flujo superficial (HCFS), que es una técnica de fitorremediación altamente eficiente en la remoción de contaminantes de origen natural en aguas provenientes de mantos freáticos expuestos a concentraciones elevadas de arsénico. Los HCFS son sistemas depuradores de muy bajo costo energético, mínimo mantenimiento, baja generación de residuos y se integran bien al paisaje rural. El trabajo de remoción de los HCFS se basa en el cálculo de factores que optimicen esta función, el tiempo de retención hidráulica (TRH), área de tratamiento y número de macrofitas.

Se realizaron pruebas experimentales de soluciones con arsénico en los HCFS, los resultados mostraron remociones que fueron de un 70% hasta un 90%, promediando un 87%, porcentaje de remoción alto considerando que los insumos y residuos son muy bajos en comparación con otros sistemas de remoción. Se comprobó que los componentes de los HCFS, zeolita y la macrofita *Eleocharis Macrostachya*, llevan a cabo de manera eficiente la absorción y adsorción del arsénico.

Como objetivo general se pretendió destacar que los HCFS son un tratamiento sustentable de bajo costo y con requerimientos mínimos de mantenimiento además de baja generación de residuos. Específicamente se pretendió demostrar que la remoción de arsénico se mejora y se prolonga con la combinación de un reactor de tanque agitado, humedales de sustrato adsorbente y el efecto adsorbente de plantas macrofitas, en este caso *Eleocharis Macrostachya*.

REVISIÓN DE LITERATURA

Arsénico

Es un metaloide cuyo símbolo químico es As, su número atómico es 33, su masa atómica es 74.91 u y es miembro del grupo VA de la tabla periódica de los elementos y comparte características con el Nitrógeno (N), el Fósforo (P), el Antimonio (Sb) y el Bismuto (Bi). De manera natural el arsénico se encuentra en: suelos, rocas, aguas, sales, vegetales y tejidos animales (mariscos, carne de cerdo, hígado). En el suelo su forma más habitual es la pentavalente en compuestos como: Arsenolita (As_4O_6), Rejalgar (As_2S_2), Oropimento (As_2S_3). Disuelto en agua lo podemos encontrar como ácido Arsenioso (H_3AsO_3) y ácido Arsénico (H_2AsO_4) (Sánchez, 2000).

En los alimentos la principal fuente de arsénico es el pescado y los mariscos. El arsénico en su forma orgánica es menos toxico que en su forma inorgánica (Uneyama, 2007).

Los compuestos de arsénico también se han utilizado en la medicina en el tratamiento de la sífilis, pian, disentería, amebiana y tripanosomiasis. Los medicamentos a base de arsénico también se utilizan en la medicina veterinaria para tratar enfermedades parasitarias (Centeno, 2005).

El arsénico tiene una propiedad semimetálica, es prominentemente toxico y cancerígeno y está ampliamente disponible en forma de óxidos, sulfuros o como sales de hierro, sodios calcio, cobre, entre otros (Singh, 2007).

Arsénico En Agua De Uso Y Consumo Humano

El arsénico está presente con altos niveles de concentración de forma natural en aguas subterráneas en varios países. Es un elemento de alta

toxicidad en su forma inorgánica, la exposición prolongada por medio del consumo de agua o alimentos que contienen altos niveles de arsénico pueden ser motivo de cáncer, lesiones cutáneas, problemas de desarrollo, enfermedades cardiovasculares, neurotoxicidad y diabetes (Quansah, 2015).

En la problemática mundial, en algunos países de Latinoamérica, México incluido, las aguas superficiales y subterráneas presentan un alto contenido de arsénico de manera natural asociado al origen volcánico de los suelos. La disolución de minerales, la erosión y la desintegración de rocas son el origen de la presencia del arsénico que puede encontrarse en su forma trivalente (As^3) y pentavalente (As^5). Generalmente se presenta como arsenato (AsO_4^{3-}) y puede ser absorbido fácilmente por ingesta o por los tejidos, y se elimina paulatinamente por la orina, cuando los niveles son muy altos y la eliminación por la secreción no es suficiente el arsénico se acumula en el cabello y en las uñas (Frederick *et al.*, 1994).

En México y Argentina en 2011, con el apoyo de la Organización Panamericana de la Salud, se desarrolló un estudio socioeconómico del impacto del arsénico en la salud pública del cual surgió el documento “Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico (HACRE)” y se estableció el “Programa Nacional de Prevención y Control de las Intoxicaciones” estudiando la viabilidad de las alternativas de remoción del arsénico en las fuentes de agua con arsénico para consumo humano.

Problemática Nacional

El problema de arsénico en el agua se presenta en los estados de Coahuila, Durango, Zacatecas, Morelos, Aguas Calientes, Chihuahua, Puebla,

Nuevo León, Guanajuato, San Luis Potosí y Sonora, donde se han detectado concentraciones superiores a lo estipulado en la normatividad correspondiente, según Avilés y Padrón (2000), se estima que existen alrededor de 450,000 habitantes expuestos al consumo continuo y prolongado de agua con arsénico.

Problemática Regional

En la región lagunera, entre los estados de Durango y Coahuila, se detectó envenenamiento crónico con arsénico de carácter endémico y brotes extremos que afectan a la población y fauna. En 128 pozos en 11 distritos, un estudio reveló contaminación por arsénico en un rango de 0.008 a 0.624 mg/lit y más de 50% de las muestras tuvieron niveles mayores a 0.05 mg/lit, por lo tanto más de 400,000 individuos estuvieron expuestos al arsénico a través del agua de consumo con niveles de concentración por encima de 0.05 mg/lit, esto representa a mediano plazo un problema de salud pública con elevadas probabilidades de desarrollar arsenosis, cáncer o alguna enfermedad relacionada con el consumo de agua con arsénico por encima del límite máximo permisible (Vega-Gleason, 2001).

Aunque de acuerdo con López *et al.* (2012) en el campo geotérmico de la localidad de los Humeros en México, en los pozos se han reportado concentraciones altas de arsénico de hasta 73.6 mg/lit. Lo cual indica que existen, mantos freáticos con elevadas concentraciones de As de origen natural.

Problemática Local

En Chihuahua, al norte del estado, para el año 2000 CONAGUA y la Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Cd. Juárez, llevaron a cabo un proyecto de exploración hidrogeológica en la región de la Mesilla para abastecer

de agua a la ciudad fronteriza, analizando principalmente los niveles de arsénico. Los resultados mostraron rangos de 0.005 a 0.044 mg/lit y en profundidades de 250 m los niveles fueron de 0.005 a 0.65 mg/lit (CONAGUA, 2001).

La JCAS en 2009, mediante el monitoreo de los pozos de los 67 municipios del Estado, detectó que, en 47 municipios al menos un pozo sobrepasó el LMP de concentración de arsénico. En la zona centro-sur-este, el monitoreo indicó que más del 73% de los pozos excedieron el LMP de 0.025 mg/lit de concentración de arsénico.

Para 1997 se estudiaron las características del agua subterránea de las regiones de Delicias-Meoqui (Zona Centro) y Jiménez-Camargo (Zona Sur). Se determinó que entre las capas geológicas del subsuelo existen franjas o fallas con dirección Noroeste-Sureste donde se encuentra presente el arsénico. Dichas franjas son paralelas entre ellas. Se estimó que la falla de arsénico comprende una longitud de 200 km con 139 pozos expuestos al contacto con arsénico. Tanto en la región de Delicias-Meoqui como en la región Jiménez-Camargo la concentración de arsénico en el agua varía entre 0.05 y 0.5 mg/lit (CONAGUA, 1997).

CONAGUA en 2013 analizó los niveles de arsénico en tres sistemas de acuíferos contiguos con influencia aluvial importante, El Cuervo y La Gloria, Tabelaopa-Aldama (ATA), Aldama-Dolores (AAD) y Laguna de Hormigas (ALH), localizados al Centro-Este del estado. Se encontró que, de 34 pozos muestreados y analizados en 2004, nueve de ellos sobrepasaron los 0.025 mg/lit de arsénico, ocho tuvieron concentraciones entre 0.020 y 0.025 mg/lit y solo diez presentaron concentraciones por debajo del LMP internacional de 0.01 mg/lit de

arsénico. Los pozos continuaron siendo monitoreados y en 2007 y 2010 los niveles se mantuvieron, aunque hubo excepciones de unos pozos que bajaron sus niveles de arsénico en 2007 pero para 2010 ya habían recuperado o en algunos casos sobrepasando los niveles presentados en 2004.

Límites Máximos Permisibles De Concentración De Arsénico En Agua

El límite máximo permitido de concentración de arsénico en agua para uso y consumo humano recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) es de 0.01 mg/litro dato actualizado en 2013.

En México la norma reguladora del límite de concentración de arsénico para agua de uso y consumo humano es la NOM-127-SSA1-2000 que indica que la concentración máxima permitida de arsénico es de 0.025 mg/litro (Cuadro 1).

Humedales Construidos

El problema de la contaminación de los acuíferos con arsénico y otros metales, nos coloca en la imperiosa necesidad de aplicar técnicas de remediación modificadas de las existentes, que reduzcan la concentración de los elementos tóxicos tratándolos y estabilizándolos in situ, procesos naturales que tienen lugar en el suelo con objeto de recuperar su funcionalidad (Pardo, 2013).

Wenzel *et al.* (2002), determinaron que una de las técnicas sustentables, económicamente viable y respetuosa de los ecosistemas es la fito-estabilización, técnica basada en el uso de plantas tolerantes a elementos que pueden considerarse tóxicos para la salud humana, la fauna o la flora en general, sin embargo, para estas plantas funcionan como micro nutrientes indispensables para su desarrollo. Lo cual causa una disminución en la disponibilidad de los

Cuadro 1. Límites Máximos Permisibles de Arsénico en Agua para Uso y Consumo Humano

Organismo/Entidad	As (mg/l)
OMS	0.010 (WOH, 2004)
EUA	0.010 (USEPA, 2001)
Unión Europea	0.010 (UE, 1998)
México	0.025 (NOM-127-SSA1-1994)

OMS, 2013

contaminantes, mejora las condiciones físico-químicas y biológicas del suelo y agua, además de proporcionar protección física a la erosión y depurar la lixiviación.

Los metales se mantienen disueltos en condiciones de pH ácido lo que facilita la adsorción por el sustrato y la absorción por parte de las plantas. Además, determina la solubilidad y biodisponibilidad de los compuestos en el suelo, la disponibilidad de nutrientes para las plantas es máxima y la toxicidad de los metales mínima a pH de 6.5 (Wong, 2007).

En sitios donde los cuerpos de agua son escasos, los humedales cobran gran valor debido a que suministran agua, entre otros bienes y servicios a numerosas poblaciones humanas y vida silvestre. Los humedales son ecosistemas definidos por la Secretaría de la Convención de Ramsar 2006, como: extensiones de marismas, pantanos y turberas o superficies cubiertas de agua de manera natural o intencional, persistentes o de temporada, almacenadas o por escorrentía, dulces o saladas, incluidas las aguas marinas cuya profundidad en marea baja no sobrepase los 6 m.

Los humedales artificiales aparte de ser métodos de depuración de aguas residuales, también son reconocidos como recuperadores de ecosistemas. Los humedales naturales son zonas de transición entre los medios acuáticos y terrestres, esto debido al dinamismo de sus enlaces. Los humedales proporcionan intercambio de nutrientes y zonas de absorción de contaminantes orgánicos e inorgánicos, este es el mecanismo detrás de los humedales artificiales, simular un humedal natural con el propósito de remover los residuos industriales y sanitarios (Frers, 2008).

De acuerdo con Lahera (2010), la limitante para la construcción, operación y mantenimiento de sistemas de tratamiento que utilizan energía eléctrica para su funcionamiento es la falta de recursos económicos, además los residuos generados por estos sistemas requieren de tratamiento, estabilización y disposición. El agua de los cuerpos receptores es susceptible al deterioro por el aumento de la población que conlleva una mayor generación de aguas residuales domésticas, industriales y agropecuarias.

Bernal *et al.* (2003), mencionan que tanto en los humedales artificiales como en los naturales se lleva a cabo una compleja interacción entre sus componentes (la flora, los medios de soporte, bacterias y agua) que realizan la remoción de contaminantes a través de los procesos físicos, químicos y biológicos.

Arias y Brix (2003), describen los procesos de remoción de la siguiente manera: físicos: (filtración, sedimentación y adsorción), químicos: (precipitación, absorción, hidrólisis, oxidación y reducción) y biológicos: (interacción de especies vegetales, microorganismos adheridos a las raíces de las plantas).

Los humedales construidos son considerados como tratamientos extensivos, o sistemas de tratamiento natural, ya que logran la remoción de contaminantes de las aguas residuales por medio de procesos naturales sin el requerimiento de aditivos químicos ni energía externa (Arias y Brix, 2003).

Jenssen *et al.* (2005), mencionaron que los humedales construidos pueden ser utilizados en climas fríos, coincidiendo con Agnieszka (2011), en que son una alternativa para la remoción de materia orgánica, N, P y K, combinados con otros procesos extensivos o intensivos.

Humedales construidos de flujo superficial (HCFS). De acuerdo a Fernández *et al.* (2004), los HCFS, son un estanque poco profundo, con una membrana impermeable al fondo para evitar las infiltraciones y en la superficie plantas macrofitas, ya sea flotantes o enraizadas.

El agua se mueve a través del humedal a baja velocidad. El humedal debe tener un efluente, por lo tanto, debe contar con una pendiente de 1% o lo necesario para hacer que el agua fluya a través del humedal (EPA, 2000).

Reactor De Tanque Agitado Continuo

El reactor de tanque agitado continuo, es un tanque donde se lleva a cabo una agitación casi perfecta, con un flujo continuo de material en reacción o reaccionante y del cual sale de manera continua el material que ha reaccionado. La agitación debe facilitarse proporcionando material de baja viscosidad. El propósito del reactor de tanque agitado continuo es producir una mezcla integra de los materiales o el contacto del material reactante con la solución vertida. Las condiciones para que el mezclado sea casi perfecto son que la presión, la temperatura y el volumen sean iguales y constantes en todas las partes del reactor (Dochain, 1992).

Fitorremediación

La fitorremediación es un método que utiliza plantas, por medio de las cuales se limpian, neutralizan y rehabilitan suelos, lodos y agua, representando ventajas económicas y ecológicas (Kuschik, 2004).

El contacto, el flujo del agua a través del humedal es un factor importante en la aplicación del método de fitorremediación, y este depende de diversos factores como, especie y número de plantas que se emplean, tipo y cantidad de

sustancias presentes en el agua a tratar, y dimensión o profundidad del área contaminada, textura del suelo y condiciones ambientales presentes (USEPA, 2003).

La fitorremediación también es conocida como tecnología verde o ecotecnología, es de bajo costo y mínimo impacto ambiental al compararse con otros métodos de remediación (Kochian, 2000).

Ecotecnologías. En el aprovechamiento, tratamiento y recuperación de agua residual las ecotécnicas tienen un papel fundamental con métodos de captación y almacenamiento de agua de lluvia, bocas de tormenta, siembra y cosecha de agua, tratamiento de aguas grises o contaminadas de manera natural o por la actividad antropogénica, métodos de purificación, humedales construidos, entre otros (Vargas *et al.*, 2009).

Los humedales artificiales son la respuesta a la necesidad de reparar ecosistemas de agua dulce contaminados o degradados por la actividad antropogénica cambiante de las condiciones físicas, químicas y biológicas de cuerpos de aguas tanto superficiales como subterráneas. Esta técnica se ha denominado Ecotecnología, fue originada en los países desarrollados en el afán de resolver problemas como la eliminación de nitrógeno y fosforo, además de tratamientos de fuentes difusas y problemas de descargas ácidas producto de actividades industriales (Rajadel, 2011).

Eleocharis Macrostachya

Eleocharis es un género de plantas fanerógamas perteneciente a la familia *Cyperaceae*, comprende 653 especies descritas, y de estas solo 267 son aceptadas. Son fanerógamas, plantas vasculares, cuyas células se diferencian

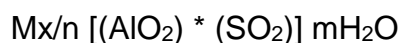
en tejidos, órganos, aparatos y sistemas de órganos. Su cuerpo vegetativo está diferenciado en raíz, tallo y hojas. Poseen flores visibles para la reproducción sexual. Poseen fecundación doble en las angiospermas (semillas dentro de un ovario) y fecundación simple en las gimnospermas (semillas al desnudo). Poseen semillas para la perpetuación de la especie a través del tiempo (CONABIO, 2006). *Cyperaceae* (monocotiledóneas) son plantas herbáceas, generalmente perennes que desarrollan rizomas o estolones. Tallos macizos, trígonos o cilíndricos, hojas estrechas, normalmente con la vaina cerrada y situadas en la base de los tallos. Hierba perenne de rizomas esbeltos de 10 cm hasta 1 metro de largo, hojas reducidas más bien vainas sin cuchilla, basales, dos por culmo, márgenes fusionados y culmo circundante, raramente divididos, ápice que en ocasiones tiene un diente pequeño. Flores diminutas dispuestas en espiral sobre el eje de la espiguilla, carentes de pétalos o sépalos, con cuatro cerdas (a veces nulas) sostenidas por una escala, cerdas marrones más cortas que el aquenio, de delgadas a gruesas, estambres tres exsertos. Anteras de color amarillo que se vuelve perdisco de 1 a 2 mm de largo y hasta 1.5 mm de ancho, elipsoide invertido en forma de pera, tubérculo pequeño, blanquecino o marrón piramidal. Semilla con una pared fina y no adherente. Culmo no ramificado de 10 cm hasta 1 metro de largo y de 0.5 a 2.5 mm de ancho, raíz circular en sección transversal o comprimido a tres veces más ancho que grueso, esponjoso por dentro encerrado basalmente por dos vainas fusionadas. Escamas dispuestas en espiral y superpuestas, marrones o a veces de color marrón rojizo, con una nervadura central de color entre verde y naranja (CONABIO, 2006).

Zeolita

De acuerdo con la investigación realizada por Vizcaíno en 1998, las zeolitas son aluminosilicatos cristalinos, esqueletos estructurales aniónicos rígidos con canales y cavidades definidas. En las cavidades se encuentran cationes intercambiables (Na^+ , K^+ , Mn^+ , Ca^+ , etc.) también pueden retener moléculas removibles y reemplazables (Figura 1).

El silicio (Si) es el segundo elemento de mayor abundancia en el planeta, arcillas, rocas y suelos se componen de silicatos de aluminio (Al), Hierro (Fe) o magnesio (Mg). Los silicatos en su mayoría están formados por una unidad tetraédrica denominada ion ortosilicato (SiO_4) con una amplia variedad de estructuras por lo que admiten diversos cationes que neutralizan los excesos de cargas negativas. Las zeolitas presentan propiedades de alto grado de hidratación, baja densidad y un gran volumen cuando se deshidratan, estabilidad, Intercambio catiónico, canales moleculares uniformes y absorbancia (Bosch, 1988).

La fórmula general de la composición de una Zeolita es:



Donde los cationes M de la valencia n neutralizan las cargas negativas de la estructura de los aluminosilicatos.

Las unidades de construcción primarias de las zeolitas son los tetraedros de silicato (SiO_4)⁴⁻ y de tetra oxido de aluminio (AlO_4)⁵⁻ unidos por compartición de vértices formando puentes de oxígeno no lineales (figura 2).

Intercambio de cationes. Mikhail Ostrooumov en 2014, describió las

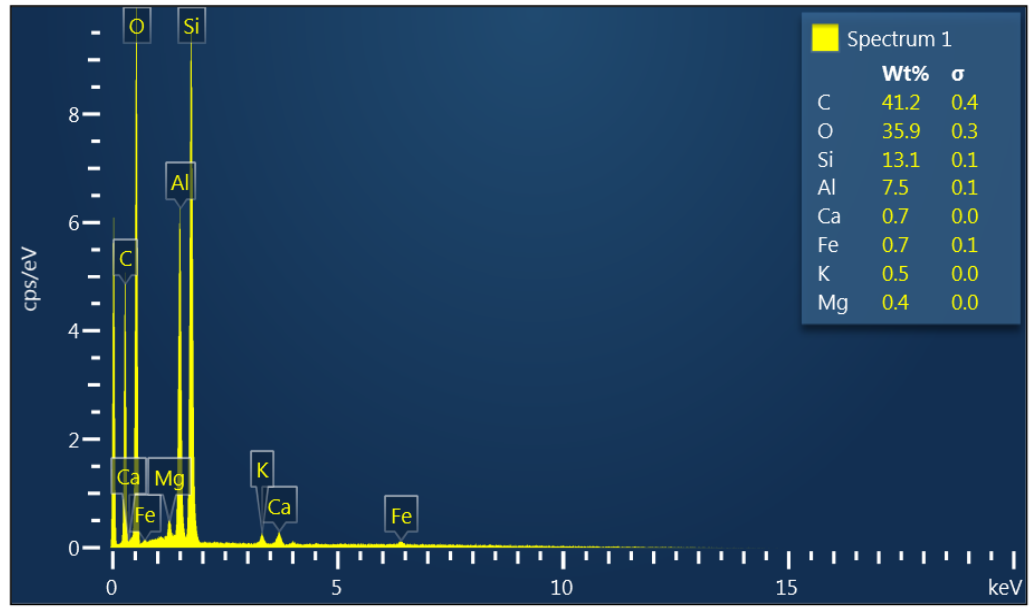


Figura 1. Caracterización de zeolita clinoptilolita (Vizcaíno, 1998)

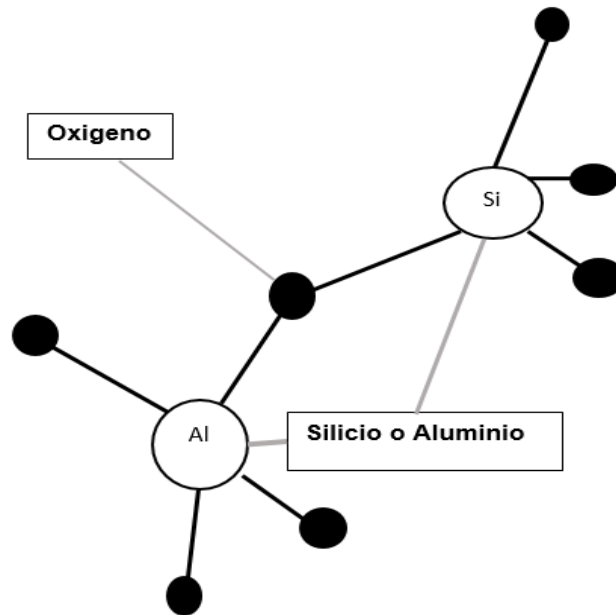


Figura 2. Unidades de construcción de las zeolitas, dos tetraedros SiO_4 y AlO_4 unidos por compartición de vértices. (Ostrooumov, 2014)

propiedades cristaloquímicas de las zeolitas destacando que son aluminosilicatos hidratados de sodio (Na), potasio (K) y calcio (Ca), tienen una estructura tridimensional de estructura con cavidades donde se almacenan cationes de Ca, Na, K, estroncio (Sr), bario (Ba) y moléculas de agua. Además, realizó un inventario que muestra que en 18 estados de la república mexicana se definieron 17 especies de zeolitas, 4 de ellas, clinoptilolita, mordenita, erionita y chabasita, son actualmente de gran importancia práctica. Propuso además el uso de la zeolita como intercambiador iónico, en el control y reducción de la contaminación del medio ambiente originada por aguas residuales industriales y sanitarias, en la suavización de agua y en la agricultura, como mejorador de suelos, como fertilizante y por su capacidad de remover agentes contaminantes. También como adsorbentes, desecadores y purificadores de gases, como catalizadores en la petroquímica y la reducción catalítica de óxidos de nitrógeno. La zeolita natural es un aluminosilicato hidratado que tiene una estructura cristalina, tridimensional microporosa. Es una de las zeolitas sedimentarias más abundantes en México.

Zeolita clinoptilolita. Especie abundante en el norte de México, su fórmula es $\text{Na}_2 (\text{Al}_2\text{Si}_7\text{O}_{18}) 6\text{H}_2\text{O}$, se caracteriza porque su sistema cristalino es monoclinico, tiene una densidad de 2.16 g/cm^3 , su relación Si/Al es de 5, presenta una porosidad de 39% y cuenta con 10 canales principales. Como zeolita natural es adecuada para uso industrial ya que sus estructuras abiertas le proporcionan un intercambio iónico de mayor poder y su alto contenido de sílice les proporciona mayor resistencia a ácidos y otras sustancias (Ostrooumov, 2014).

Zeolitas en México. Ostrooumov en su estudio realizado en 2014, señala que los primeros yacimientos de zeolita fueron descubiertos en el estado de Oaxaca. Posteriormente se localizaron importantes yacimientos en Sonora, Puebla y San Luis Potosí. A pesar de estas importantes reservas de zeolitas.

Inexplicablemente en el reciente anuario de la minería mexicana no se presenta un inventario de tan importante materia prima. En el cuadro 2, se muestran los yacimientos de zeolitas más importantes de acuerdo al potencial de la veta.

Aun y cuando la zeolita se encuentra prácticamente en todo México, 17 de 32 estados, y con una diversidad de hasta 18 especies de zeolita, clinoptilolita, mordenita, erionita como las de mayor cantidad y presencia, con yacimientos que su descubrimiento data desde 1897, el más antiguo, no existe un inventario tanto de su potencial, como de su aprovechamiento, tampoco de los ingresos que genera su extracción (Ostrooumov, 2014).

Cuadro 2. Yacimientos importantes de zeolita en México

Estado	Municipio	Potencial (toneladas)
Oaxaca	Laollaga	15'120,000
Sonora	El Cajón	10'000,000
Sonora	Agua Prieta	3'000,000
San Luis Potosí	El Chap Ben	2'708,000

Ostrooumov, 2014

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación Del Prototipo

El prototipo de HCFS modificado con reactor que se construyó para este estudio se localiza en la zona noroeste de la ciudad de Chihuahua, en la colonia Zootecnia, periférico Francisco R. Almada km 1. Dentro de la Facultad de Zootecnia y Ecología (FZyE-UACH), en el invernadero 1, ubicado a 28.586972 N y 106.108819 W. El clima predominante en la zona es Bsh según la clasificación Köppen-Geiger, clima seco, semiárido cálido, con temporada de lluvias moderadas, aunque pueden llegar a ser intensas, temperatura promedio anual de 18°C.

El invernadero cuenta con un área de 90 m², 12 m de largo por 7.5 m de ancho. Dentro del invernadero se localiza la cama de cultivo que se acondicionó para colocar dentro de ella la estructura del HCFS modificado con reactor.

Metodología Para Diseñar Un Prototipo De HCFS Modificados Con Reactor

El HCFS modificado con reactor se diseñó con base en las descripciones de Fernández *et al.* (2004) y la EPA (2000), ya que se buscaba que el diseño cubriera expectativas específicas de función y remoción de arsénico, así como poder reproducirlo a gran escala con resultados favorables como a continuación se describe, esto es factible debido a las características de ésta ecotecnología. El diseño fue elaborado para que en cada prueba experimental se pusieran en contacto con el HCFS modificado con reactor, 300 lt de solución de arsénico en agua (solución problema) repartidos en los tres humedales.

Reactor de tanque agitado. El reactor de tanque agitado para este proyecto fue modificado y su función fue integrar los componentes de la solución problema (Arsenito de Sodio y agua) y aplicar la agitación necesaria para generar las funciones de reactor especificadas anteriormente. Se encuentra en la parte inicial del HCFS modificado con reactor y su trabajo es la remoción de arsénico contenido en la solución problema a tratar al provocar el contacto constante y uniforme con la zeolita, medio o material adsorbente.

El reactor de tanque agitado es un tinaco de 750 lt de capacidad, el volumen de agua ocupado es de 300 lt, por lo tanto, para calcular el nivel (altura) al que debe llenarse el tinaco para obtener el volumen de 300 lt (0.3 m^3), se utilizó la siguiente ecuación:

Cálculo de volumen (ecuación 1):

Cilindro:

$$V = \pi * r^2 * h \quad (1)$$

Despejando:

$$h = \frac{V}{\pi * r^2}$$

$$h = \frac{0.3 \text{ m}^3}{(3.1416)(0.55 \text{ m})^2} = 0.3160 \text{ m (ó 31.60 cm)}$$

Cama de cultivo. El cálculo del volumen y las áreas de la cama de cultivo, los humedales, el área del dosificador y el efluente se calcularon con la siguiente formula:

Volumen de cama de cultivo (cubo rectangular, ecuación 2):

$$V = b * a * h \quad (2)$$

$$V = 2.80 \text{ m} * 1.55 \text{ m} * 0.80 \text{ m} = 3.472 \text{ m}^3$$

Cálculo de áreas con la fórmula (ecuación 3):

$$A = b * h \quad (3)$$

Área de la cama de cultivo:

$$A = 2.80\text{m} * 1.55\text{m} = 4.34 \text{ m}^2$$

Área de los humedales:

$$A = 2 \text{ m} * 0.5\text{m} = 1\text{m}^2$$

Área superficial de tratamiento. Para determinar el área superficial de tratamiento se realizaron los cálculos de (Lozano, 2012): el ajuste la temperatura media del mes más frío (18°C), y el ajuste de la temperatura media del mes más caluroso (35°C), el caudal de los vertedores (0.5 lt/s) y la porosidad del material del sustrato ($n = 0.52\text{mm}$), por lo tanto (ecuación 4):

Ajuste de temperatura:

$$Kvt = (Kv20)(constante)^{T-20} \quad (4)$$

Donde:

Kvt es el factor de ajuste de temperatura

Kv20 es la constante cinética = 1.104 d^{-1}

Constante: 1.06

T es la temperatura (promedio más frío 18°C; promedio más caluroso 35°C)

Por lo tanto:

Mes más frío:

$$Kvt = (1.104)(1.06)^{(18-20)} = 0.9824$$

Mes más caluroso:

$$Kvt = (1.104)(1.06)^{(35-20)} = 2.63$$

Área superficial:

$$As = \frac{Q}{Kvt * n * d} \quad (4.1)$$

Donde:

As: área superficial de tratamiento.

Q: 100 lt (0.1 m³), caudal (300 lt dividido en partes iguales para cada humedal).

Kvt es el factor de corrección de temperatura.

d: 25 cm, es el nivel máximo de inundación.

n: 0.43, es la porosidad del sustrato debido al tamaño de la partícula de zeolita.

$$As = \frac{0.100 \text{ m}^3}{(0.9824)(0.25 \text{ m})(0.43)} = 0.9523 \text{ m}^2$$

Tiempo de retención hidráulica (TRH). Es el cálculo de la duración adecuada del periodo de tratamiento, el tiempo que debe permanecer en contacto el volumen de agua estimado por humedal. Durante dicho tiempo de contacto, se espera que los elementos del humedal lleven a cabo acciones de adsorción y absorción de elementos contaminantes, depurando de esta forma el agua contaminada, disminuyendo la concentración de los elementos contaminantes. El tiempo de retención hidráulica se calculó con la siguiente ecuación (Lozano, 2012):

$$TRH = \frac{n \cdot d}{Q/As} \quad (5)$$

Donde:

TRH es el tiempo de retención hidráulica

n 0.43 es la porosidad del sustrato

d 25 cm, es el nivel máximo de inundación

Q es el caudal inicial

As es el área superficial de tratamiento (ecuación 4.1)

Sustituyendo los valores, el cálculo de TRH es:

$$TRH = \frac{(0.43)(0.25 \text{ m})}{\frac{0.1 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}}{0.9523 \text{ m}^2}} = 1.0237 \text{ día} \sim 1 \text{ día}$$

Número de macrofitas. Uno de los elementos depuradores de los HCFS son las plantas depuradoras denominadas macrofitas (Lozano, 2012), el número de plantas en el humedal debe calcularse para garantizar que éstas prevalezcan durante su periodo de aclimatación y después se reproduzcan exitosamente durante la vida útil del humedal. El número de plantas se determinó de acuerdo a la ecuación 6:

$$Nv = \left(\frac{L}{(dm-m)_L} - 1 \right) - 1 * \left(\frac{W}{dm-m} - 1 \right) \quad (6)$$

Donde:

Nv: número de macrofitas

L: 200 cm, longitud del área de tratamiento (longitud de humedal)

$(dm-m)_L$: 30 cm, distancia entre plantas propuesta a lo largo del humedal

W: 50 cm, es el ancho del área de tratamiento (ancho del humedal)

$(dm-m)_w$: 1.5 cm, distancia entre plantas propuesta a lo ancho del humedal

$$NV = \left(\frac{200}{30} - 1 \right) * \left(\frac{50}{1.5} - 1 \right) = 183.2222 \text{ plantas} \sim 183 \text{ plantas}$$

Construcción Del Prototipo De HCFS Modificados Con Reactor

El sistema de HCFS modificado con reactor de tanque agitado se construyó basado en los resultados de los cálculos anteriores (Figura 3).

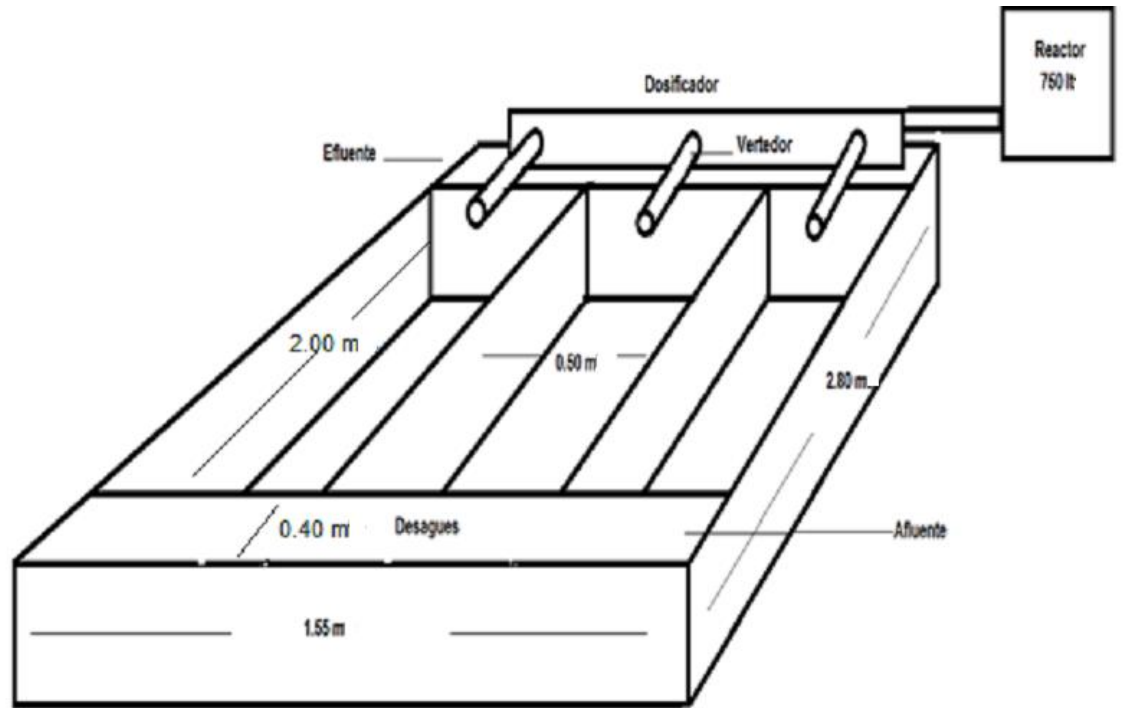


Figura 3. Diseño de los HCFS modificado con reactor

El prototipo inicia con un tanque de alimentación de 750 lt de capacidad con doble función uno utilizado como contenedor del agua y dos como tanque de agitación para preparar la dilución de arsénico.

El reactor de tanque agitado se conecta al sistema hidráulico dosificador, que consta de vertedores paralelos para que cada humedal sea alimentado con el mismo volumen. El dosificador es un tubo de policloruro de vinilo (PVC) de 25 cm de diámetro por 140 cm de largo con tres vertedores de PVC de 5 cm de diámetro y 60 cm de largo.

Los HCFS son tres estructuras de 2 m de largo, 0.50 m de ancho y 0.50 m de profundidad. Estas estructuras se construyeron con madera de pino de 1 pulgada de grosor dentro de la cama de cultivo. El fondo, arena de río finamente cernida, fue compactado para proporcionarle una pendiente del 2% (Figura 4).

La estructura de los HCFS se impermeabilizó con hule negro de ferretería para evitar pérdidas de la solución de arsénico. Para controlar los flujos, niveles y desaforos, se colocaron tubos de desagüe de PVC de 2.5 cm de diámetro por 30 cm de largo (Figura 5).

Como sustrato para las plantas macrofitas se colocaron rocas de entre 2 mm y 5 cm de diámetro de zeolita clinoptilolita, procedente de un yacimiento del municipio de Aldama, Chih., caracterizada previamente por López *et al.* (2016). El sustrato tiene un espesor de 25 cm (Figura 6).

Las plantas macrofitas utilizadas fueron *Eleocharis Macrostachya*, recolectadas en el municipio de Julimes, Chih., de manera similar que Valles *et al.* (2014). Acorde al cálculo anterior de N_v (ecuación 6), se colocaron entre 6 y 5 manojos que contenían de 30 a 40 plantas cada uno (Figura 7).



Figura 4. Estructura interna de los HCFS



Figura 5. Impermeabilizado de las estructuras de los HCFS



Figura 6. Sustrato de grava de zeolita clinoptilolita



Figura 7. Instalación de impermeabilizado, sustrato, plantas y desagües.

La distribución de los HCFS modificados con reactor quedo conformada por área de afluente (dosificador-vertedores) de 0.62 m², área superficial de tratamiento de 1 m² y área de efluente (desagües) de 0.62 m² (Figura 8).

Verificación de operación de los HCFS. La prueba inicial que se hizo en el HCFS fue verificar toda la operación, así como la eficiencia del sistema hidráulico, el funcionamiento del control de niveles de agua de los humedales y los desagües.

Se midió el nivel de agua introduciendo una regla en el sustrato de cada humedal, se marcó el nivel de agua y se verificó cada hora durante 5 horas. Ninguno de los tres humedales presento fuga u obstaculización en el flujo.

Mantenimiento de los HCFS modificado con reactor. Para mantener el buen funcionamiento de los HCFS se requirieron tiempos cortos de operación al inicio y al final de cada prueba. Las actividades de mantenimiento consistieron en retirar maleza ajena al experimento, mantener niveles de agua adecuados y mantener fluidez en los humedales.

Costos de construcción del prototipo de HCFS modificados con reactor. Los materiales utilizados en la construcción de los humedales de flujo superficial y sus costos se detallan en el Cuadro 3. Todos los materiales fueron adquiridos en la ciudad de Chihuahua en ferreterías y madererías, con excepción de la zeolita que fue proporcionada por el yacimiento previamente descrito y localizado en la ciudad de Aldama, Chih.

Diseño Del Experimento

Debido a que el objetivo principal, medir la capacidad de remoción de arsénico en solución problema de concentración conocida por HCFS modificado

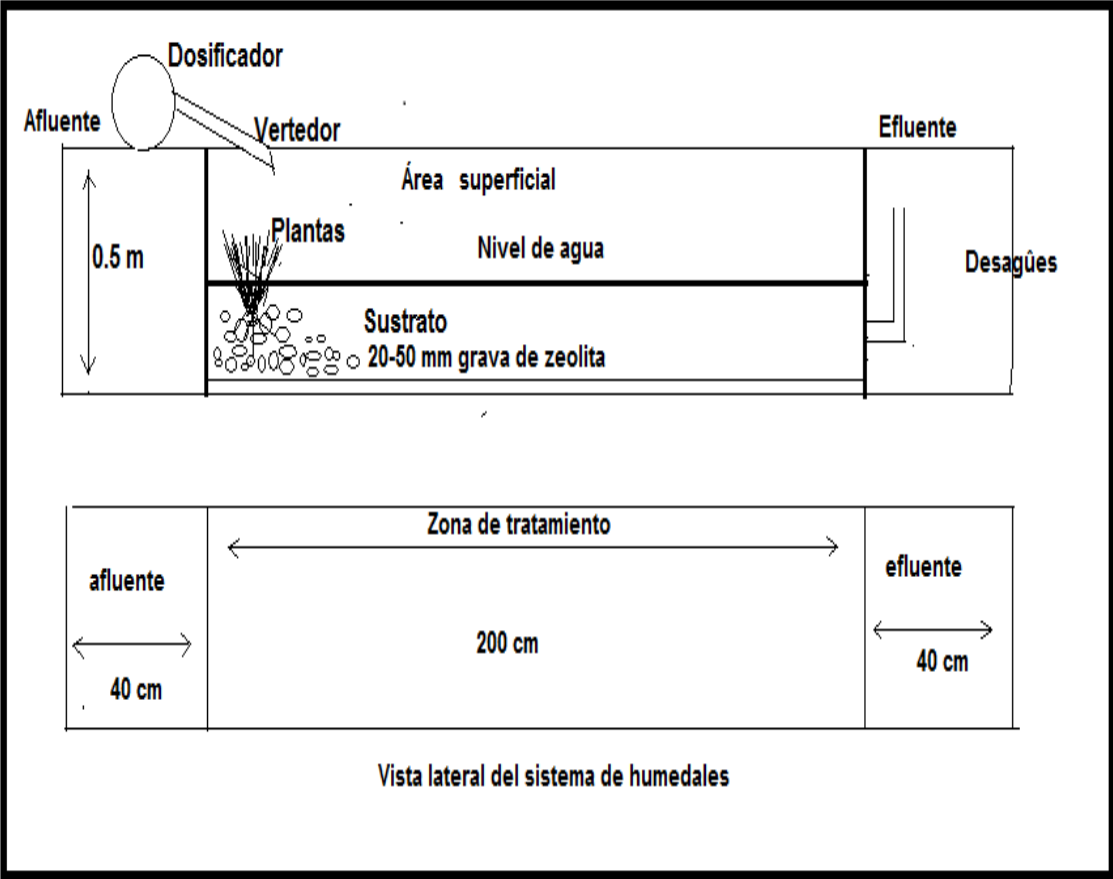


Figura 8. Distribución de los HCFS modificados con reactor.

Cuadro 3. Costo de materiales para la construcción y funcionamiento de los HCFS

Material	Cantidad	Costo (\$)
Zeolita	½ tonelada	500.00
Tablones	4	500.00
Tubería de desagüe	3	100.00
Hule para impermeabilización	10 m ²	100.00
Arena de río	½ m ³	50.00
Tubería hidráulica 2.5'	3 m	100.00
Válvula de esfera 2.5'	1	500.00
Tinaco de 750 litros	1	500.00
Traslado de macrofitas	1	100.00
Agua de la red	6 meses	100.00
Total		2,550.00 M.N.

con reactor de tanque agitado, se planeó la experimentación con la construcción de 3 humedales acoplados en una cama de cultivo, localizada en el invernadero número 1 de la FZyE, conectados a un reactor que alimenta homogéneamente a los humedales, por medio de un dosificador.

El experimento consistió en tres etapas, durante cada una de ellas, medir las concentraciones de arsénico en la zeolita (sustrato), *Eleocharis Macrostachya* (raíz y tallo) y agua (solución problema de concentración conocida de arsénico).

Las tres etapas de valoración fueron:

Etapa 1, esta etapa consistió en someter a un periodo de aclimatación a las *Eleocharis Macrostachya*, (estén proceso fue durante las dos primeras semanas del mes de Junio del 2018), además en esta etapa se recolectaron muestras de zeolita y *Eleocharis Macrostachya* sin que éstas hubiesen tenido contacto con la solución de arsénico de concentración conocida, es decir riego normal con agua potable y condiciones ambientales de invernadero. La presencia de arsénico detectada en estas muestras es producto del lugar de origen, del contacto con el medio natural de donde se sustrajeron tanto la zeolita como la *Eleocharis Macrostachya*. Las muestras recogidas fueron una de agua por cada HCFS, 3 muestras de zeolita de cada humedal y tres muestras de *Eleocharis macrostachya* de cada humedal. Estos muestreos se realizaron dos veces por semana, en los tiempos de contacto de hora 1 y hora 24.

Etapa 2, se realizaron las pruebas experimentales de remoción de arsénico por los HCFS modificados con reactor, en esta etapa se recolectaron muestras de la solución de arsénico como lo indica la sección de muestreos (en

las siguientes páginas). Esta prueba experimental comprendió desde que la solución de arsénico se puso en contacto con el reactor y luego se desplazó por los HCFS y cumplió ahí con el mínimo de TRH determinado en la metodología de diseño de los HCFS. Durante este experimento se llevaron a cabo 6 repeticiones de la prueba experimental, una cada 15 días, durante los meses de Junio, Julio y Agosto del 2018.

Etapa 3, consistió en la recolección de muestras de sustrato (zeolita) y *Eleocharis Macrostachya* (raíz y tallo), para determinar sus concentraciones de arsénico y compararlas con las concentraciones obtenidas en la primer etapa y así valorar la acumulación de arsénico generada por las repeticiones de la prueba experimental a las que se sometió el HCFS modificado con reactor, esta etapa se llevó a cabo durante el mes de septiembre del 2018.

Definición De La Solución De Arsénico

Olmos (2011) reportó el trabajo: “Remoción de arsénico en agua por fitorremediación con *Eleocharis Macrostachya* en humedales construidos”. El presente proyecto se inspiró en este estudio. Olmos (2011), aplica soluciones problema con concentraciones de 1, 2, 3, 4 y 5 mg/lit de As.

Para el presente estudio, se utilizó una solución problema de ~10 mg/lit de concentración de arsénico. Los motivos para utilizar dicha concentración como solución problema fueron comprobar si se podría ampliar la capacidad y utilidad del HCFS, distribuyendo la remoción del arsénico entre planta y sustrato, prolongando así el proceso de saturación de plantas y sustrato. Además, el utilizar una concentración alta puede ayudar a dirigir la aplicación a tratamientos

de aguas como la descrita en López (2012), donde se describen concentraciones altas de arsénico en mantos freáticos de manera natural como es el caso de los Humeros en México.

Preparación de solución de arsénico. Para tener un control del grado de remoción de arsénico del HCFS, se preparó una solución de concentración conocida denominada solución de arsénico o solución problema, es muy importante conocer la concentración inicial de As en la solución para que luego de terminada la prueba experimental volver a medir la concentración de arsénico y de esta manera poder calcular el porcentaje de remoción en el sistema depurador.

La solución de arsénico se preparó a partir de arsenito de sodio (AsNaO_2 , marca Aldrich 90% pureza), el cual contiene 74.92 g/mol que representan el 57.67% de arsénico, por lo tanto 1.69 gramos de Arsenito de Sodio contiene 1 gramo de arsénico, es decir 0.013 g/mol de arsénico, por lo tanto, con 1 g de AsNaO_2 en un litro de agua obtenemos una concentración de 1 000 mg/lit de arsénico (ecuación 7):

Cálculos:

Na 22.98 g/mol

As 74.92 g/mol

O 16 x (2) g/mol

P.M. 129.91 g/mol

Por lo tanto:

$$\%As = \frac{As \text{ g/mol}}{P.M. \text{ g/mol}} = \% As \quad (7)$$

De donde:

$$\%As = \frac{74.92 \text{ g/mol}}{\left(129.91 \frac{\text{g}}{\text{mol}}\right)} = 0.5767 * 100 = 57.67\%As$$

Cálculo de concentración de la solución de arsénico. La solución de arsénico se analizó para determinar su concentración inicial, de acuerdo a su preparación calculada para 300 litros de solución (ecuación 2):

10 gramos de NaAsO₂ diluidos en 1 litro de agua contienen una concentración de 3,826 mg/lit de NaAsO₂, entonces:

$$C1V1 = C2V2 \quad (2)$$

Donde:

C1 = Concentración buscada

C2 es la concentración de la solución de NaAsO₂

V2 es el volumen de la C2

V1 es el volumen de la dilución, caudal sometido a tratamiento

$$C1 = \frac{\left(3827 \frac{\text{mg}}{\text{lt}}\right) * (1\text{lt})}{300 \text{ lt}} = 12.75 \text{ mg/lt}$$

De acuerdo a estos resultados para cada prueba experimental se diluyeron 10 gramos de arsenito de sodio en 300 lt de agua, caudal en tratamiento, para que las soluciones tuvieran concentraciones promedio de 12.75 mg/lt.

Muestreos

Los muestreos se llevaron a cabo en cada una de las etapas del experimento como se muestra en el cronograma de muestreo (figura 9), del cronograma de muestreo, en la primera se recolectaron muestras de agua,

Actividad	Junio 2018				Julio 2018				Agosto 2018				Septiembre 2018				
	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9	Semana 10	Semana 11	Semana 12	Semana 13	Semana 14	Semana 15	Semana 16	Semana 17
Etapa 1 Acondicionamiento to HCFS																	
ETAPA 2 Funcionamiento de HCFS																	
ETAPA 3 Muestreo final																	
Descripción:																	
<p>Etapa de blancos (Etapa 1)</p> <p>Día 1, hora 0: se vertieron 300 litros de agua potable a los HCFS por medio del dosificador.</p> <p>Día 1, hora 1: se recolectaron las muestras iniciales de agua en los desagües de los HCFS (1x3), zeolita inicial (3x3) y Eleocharis Macrostachya inicial (3x3).</p> <p>Día 1, hora 2 hasta la última hora del día 5: se deja en reposo el agua en los HCFS.</p> <p>Día 6, hora 0: se recolectaron las muestras finales de agua en los desagües de los HCFS (1x3), zeolita final (3x3) y Eleocharis Macrostachya final (3x3).</p>																	
<p>Pruebas experimentales de remoción de As por los HCFS (Etapa 2)</p> <p>Día 1, hora 0: agitación de solución problema en el Reactor (30 minutos) y recolección de muestras del reactor de solución problema.</p> <p>Día 1, minuto 30: vertido de solución problema en los HCFS por medio del dosificador.</p> <p>Día 1, minuto 90: se desbloquearon los desagües y se tomaron muestras de agua.</p> <p>Día 1, hora 23: se desbloquearon los desagües y se tomaron muestras de agua.</p>																	
<p>Depuración del sistema</p> <p>Día 1, hora 0: se llena con 300 litros de agua potable el reactor y se libera a los HCFS por medio del vertedero dosificador. Ahí permanece durante los siete días de la semana.</p>																	
<p>Muestreo final (Etapa 3)</p> <p>Día 1, hora 0: se recolectaron muestras de Zeolita a diferentes niveles de profundidad y diferentes zonas de cada HCFS; recolección de muestras de Eleocharis Macrostachya en diferentes zonas de cada HCFS.</p>																	

Figura 9. Cronograma de etapas de los HCFS

zeolita (sustrato), y *Eleocharis Macrostachya* (raíz y tallo), para determinar el nivel de arsénico que de manera natural contenía cada una de las matrices.

En la segunda etapa se tomaron muestras solo de agua, después de cada repetición de la prueba experimental, salida del reactor, flujo a través del HCFS y después del plazo de contacto (tiempo de retención hidráulica). Es decir, cada vez que se sometió a la prueba experimental la solución de arsénico. En esta etapa, cada muestreo consistió en recolectar muestras de agua, 100 ml del dosificador, 100 ml de los desagües o efluentes de cada humedal durante la prueba experimental y otro muestreo 24 horas después de que la solución de arsénico permaneció en el HCFS. Se recolectaron 7 muestras en cada tratamiento, 42 muestras en total por los 6 tratamientos del experimento.

Y el tercer muestreo, una vez concluidas las 6 repeticiones de la prueba experimental durante los tres meses. Las muestras de zeolita y planta se recolectaron de manera aleatoria de las partes inicial, media y final de cada humedal. Se tomaron muestras de los tres humedales en diferentes zonas y profundidades (1: parte inicial, 2: media, 3: final y 4: profundidad, por duplicado). En este tercer muestreo se recolectaron 9 muestras de zeolita (3 de cada humedal), 9 muestras de plantas (3 de cada humedal), para analizar raíz y tallo.

Metodología para preparación y análisis de muestras. Las muestras recogidas fueron preparadas para su análisis por medio de digestión ácida, la cual fue realizada en el sistema de digestión por microondas Anton Parr modelo Microwave GO, de cada muestra se tomaron 2 ml, se colocaron dentro de los recipientes y dentro de la campana de extracción de humos ácidos se agregó

agua regia inversa y peróxido de hidrogeno a cada uno. Después, se colocaron dentro del sistema de digestión donde se sometieron a una velocidad de calentamiento de 8 °C/min aproximadamente, donde durante 20 minutos se elevó la temperatura de la muestra de temperatura ambiente hasta alcanzar los 180°C, una vez que la muestra alcanzó los 180°C y transcurridos los 20 minutos comienza la segunda etapa denominada isoterma donde se mantiene la temperatura de 180°C durante 10 minutos, es en esta etapa donde se realiza la digestión, transcurridos los 10 minutos a 180°C da inicio la tercer y última etapa de la digestión que consiste en enfriar la muestra, disminuyendo la temperatura de 180°C a 50°C aproximadamente en un lapso de 10 minutos, el método de digestión para agua, planta y zeolita se describe en los métodos estándar EPA (USEPA, 1998; USEPA, 1982). Terminada la digestión de las muestras se diluyó la solución resultante de la digestión con agua destilada, aforando a 50 ml en un matraz aforado marca Pyrex.

Después, la muestra acondicionada se almacenó con su debida identificación. El análisis elemental y determinación de la concentración de arsénico se realizó en el espectrómetro ICP-OES marca Perkin Elmer, modelo Optima 8300, donde se deja pasar la muestra mediante nebulización que realiza el mismo equipo y tras el análisis (45 segundos aproximadamente) arroja los resultados, promedio de análisis por triplicado, de la muestra en proceso. Este análisis y el de absorción atómica, son los que usualmente se utilizan para este tipo de muestras (Marconi *et al.*, 2009).

Los primeros análisis que se realizaron fueron para determinar las condiciones iniciales (concentración natural) tanto de la zeolita como de las *Eleocharis Macrostachya* utilizadas en la construcción de los HCFS.

La zeolita utilizada para el sustrato fue analizada y se determinó la concentración de arsénico en el estado natural de la zeolita. Los resultados se muestran en el Cuadro 4.

La concentración natural (inicial) de arsénico en la *Eleocharis Macrostachya* fue analizada por partes: raíz y tallo. Las muestras fueron recolectadas de los tres humedales, en diferentes sitios del humedal (1: parte inicial, 2: media, 3: final, por triplicado), en el tallo no se detectó la presencia de arsénico, solo la raíz presentó rastros de arsénico. Los resultados de los análisis de raíz se presentan en el Cuadro 5.

El agua de riego empleada en los HCFS durante la aclimatación de las plantas no contiene arsénico, esto fue verificado mediante análisis.

Material De Laboratorio

Las instalaciones y el material de laboratorio para efectuar los análisis requeridos para este estudio fueron proporcionados por el Laboratorio de Parámetros Ambientales (LPA) de la Facultad de Zootecnia y Ecología (FZyE) de la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH).

Material: matraces aforados marca Pyrex de 50 ml, pipetas serológicas de 10 ml marca Pyrex, pipetas volumétricas marca Pyrex de 2, 4, 5 y 10 ml, vasos de precipitado de 0.25, 0.5 y 1 litro marca Pyrex.

El reactivo utilizado para la preparación de la solución problema fue arsenito de Sodio grado reactivo NaAsO_2 marca ALDRICH, 90% de pureza,

Cuadro 4. Concentración inicial de arsénico (mg/kg) en zeolita

HCFS	Muestras recolectadas	Promedio	Desviación Estándar
H1	9	3.64	2.87
H2	9	23.48	19.36
H3	9	0	0

Cuadro 5. Concentración inicial (mg/kg) de arsénico en *Eleocharis Macrostachya*

Raíz	Humedal 1	Humedal 2	Humedal 3
Muestra 1	1.74	8.41	4.92
Muestra 2	2.01	1.40	1.28
Muestra 3	1.15	2.72	2.61
Muestra 4	1.09	1.79	1.97
Muestra 5	0.97	1.45	1.18
Muestra 6	1.10	1.32	0.21
Muestra 7	0.87	1.20	1.32
Muestra 8	1.25	1.51	2.08
Muestra 9	1.19	2.45	1.03
Promedio	1.26	2.47	1.84
Desv. Est	0.37	2.28	1.03

masa molecular 129.91 g/mol y densidad de 1.87 g/cm³, soluble en agua. Los ácidos, el peróxido y agua empleados en la presente investigación fueron ácido nítrico y clorhídrico. El primero, HNO₃, grado reactivo 69-70% de concentración, densidad 1.4 g/cm³, líquido cristalino, marca J.T. Baker. Ácido clorhídrico (HCl) grado reactivo, 36.5-38% de concentración, densidad 1.18 g/cm³, líquido cristalino, marca J.T. Baker. Peróxido de hidrogeno (H₂O₂) al 30%, densidad 1.11 g/cm³, líquido cristalino, marca FAGALAB, agua destilada producida con el equipo de destilación del LPA además agua de la red pública para el riego de los humedales y botes de muestreo de 1 lt de capacidad, envases de agua embotellada de consumo cotidiano que fueron lavados en solución de ácido nítrico al 10%.

Equipo: para el peso de muestras se utilizó una báscula analítica marca Ohaus modelo Pioneer, en la digestión de muestras y manejo de soluciones ácidas se llevó a cabo en campana de extracción de humos ácidos sin marca, las digestiones ácidas se realizaron en el equipo Sistema de digestión ácida por microondas marca Anton Parr, modelo Microwave GO, el análisis elemental de las muestras fue realizado en un espectrómetro ICP-OES marca Perkin Elmer, modelo Optima 8300. Y el agua destilada para la digestión y dilución de muestras se obtuvo del destilador marca Felisa modelo FE 390 con capacidad de destilación de 3.5 lt/h.

El límite de detección para arsénico del espectrómetro ICP-OES fue en una escala de 0.001 a 10 mg/lt.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis De Muestras

Los resultados de los análisis de las muestras tomadas en el reactor de tanque agitado se presentan en el cuadro 6.

El Cuadro 7 muestra la remoción de arsénico de la solución problema obtenida a 1 hora de contacto con el HCFS.

Y el cuadro 8 muestra la remoción de arsénico a las 24 hrs de permanecer la solución problema en contacto con el HCFS.

Por último el cuadro 9 muestra los porcentajes de remoción acumulados, promedios y desviación estándar de todo el experimento.

Los porcentajes de remoción en cada etapa de tratamiento fueron calculados de acuerdo a la ecuación 7:

$$\%R = (C_{iAs\ agua} - \%C_{fAs\ agua}) / \%C_{iAs\ agua}$$

Donde:

%R es el porcentaje de remoción

C_i e Concentración inicial de As

C_f es concentración final de As

Los resultados obtenidos reflejan la eficiencia del sistema de HCFS con reactor de tanque agitado modificado en la remoción de arsénico en agua, al arrojar un promedio de remoción de 73.61% con una desviación estándar de 5.03.

Al comparar los porcentajes de remoción con otros trabajos similares como Olvera (2017), el uso de HCFS para la remoción de demanda bioquímica

Cuadro 6. Concentración inicial, desviación estándar y porcentaje de remoción en reactor de tanque agitado

Tratamiento por Reactor						
Muestra	Prueba	Prueba	Prueba	Prueba	Prueba	Prueba
	1	2	3	4	5	6
Entrada(mg/lit)	10.17	10.35	10.44	10.28	10.22	10.72
Promedio(mg/lit)	10.36					
Desv. Est	0.20					
Salida(mg/lit)	9.47	9.25	9.05	9.77	8.15	8.6
Promedio(mg/lit)	9.05					
Desv. Est	0.59					
% Rem	6.88	10.63	13.31	4.96	20.25	19.78

Cuadro 7. Promedio, desviación estándar y porcentajes de remoción de tratamiento a 1 hora en HCFS

Tratamiento HCFS (t = 1 h)						
Entrada(mg/lit)	9.47	9.25	9.05	9.77	8.15	8.6
HCFS1(mg/lit)	4.3	5.15	5.2	5.25	3.25	3.5
Promedio(mg/lit)			4.44			
Desv. Est			0.90			
% Rem	57.71	50.24	50.19	48.92	68.20	67.35
Promedio%			57.06			
Desv. Est			8.83			
HCFS 2(mg/lit)	4.5	4.9	5.32	4.75	3.25	3.65
Promedio(mg/lit)			4.39			
Desv. Est			0.79			
% Rem	55.75	52.65	49.04	53.79	68.19	65.95
Promedio%			57.56			
Desv. Est			7.71			
HCFS 3(mg/lit)	4.9	5.12	5.25	6.25	5.75	3.52
Promedio(mg/lit)			5.13			
Desv. Est			0.93			
% Rem	51.81	50.53	49.71	39.20	43.73	67.16
Promedio%			50.35			
Desv Est			9.52			

Cuadro 8. Promedios, desviación estándar y porcentajes de remoción de solución problema en contacto con HCFS a 24 h

Tratamiento HCFS (t = 24 h)						
HCFS 1						
Inicial(mg/lit)	4.3	5.15	5.2	5.25	3.25	3.5
Final (mg/lit)	1.3	2.05	1.05	0.75	1.92	1.22
Promedio(mg/lit)	1.38					
Desv. Est	0.51					
% Rem	69.77	60.19	79.81	85.71	40.92	65.14
Promedio%	66.92					
Desv. Est	15.82					
HCFS 2						
Final (mg/lit)	1.3	1.7	1.47	0.67	2.85	1.3
Promedio(mg/lit)	1.55					
Desv. Est	0.72					
% Rem	69.77	66.99	71.73	87.23	12.31	62.85
Promedio%	61.81					
Desv. Est	25.63					
HCFS 3						
Final(mg/lit)	1.25	1.27	1.9	2.47	2.9	1.34
Promedio(mg/lit)	1.85					
Desv. Est	0.64					
% Rem	70.93	75.33	63.46	52.95	10.76	61.71
Promedio%	55.86					
Desv. Est	23.41					

Cuadro 9. Porcentajes de remoción acumulada, promedios acumulados y desviación estándar acumulada

% Remoción acumulada, reactor y Tratamiento HCFS (t = 1 h)						
HCFS 1	64.59	60.87	63.50	53.88	88.45	87.13
Promedio	69.74					
Desv. Est	14.48					
HCFS 2	62.63	63.28	62.71	58.75	88.44	85.73
Promedio	70.25					
Desv Est	13.16					
HCFS 3	58.69	61.16	63.02	44.16	63.98	86.94
Promedio	62.63					
Desv. Est	13.79					
% Remoción acumulada, reactor y Tratamiento HCFS (t = 24 h)						
HCFS 1	76.65	70.82	93.12	90.68	61.18	84.92
Promedio	78.56					
Desv. Est	12.83					
HCFS 2	76.65	77.62	85.04	88.19	32.56	82.63
Promedio	73.78					
Desv. Est	20.66					
HCFS 3	77.81	85.96	76.77	57.91	31.01	81.49
Promedio	68.49					
Desv. Est	20.71					

de oxígeno total (DBO_T), sólidos suspendidos totales (SST) y fósforo total (PT) arroja resultados promedio de porcentaje de remoción de 12% de DQO_T , 70% de SST y 54% de PT. En la modalidad de humedales construidos con flujo subsuperficial con *Eleocharis macrostachya*, se obtuvo 41 % de remoción de arsénico (Valles y Alarcón, 2014), se observa que, en promedio la remoción de arsénico por parte de la planta es similar. Sin embargo, al comparar el efecto total con el humedal modificado del presente proyecto, se registra una mayor remoción, debido al efecto del reactor de tanque agitado más la remoción de arsénico de la zeolita (sustrato).

El experimento muestra que el flujo de la solución problema a través del HCFS con reactor de tanque agitado permite una reducción de la concentración de arsénico desde un 31.01% hasta en un 93.12%, aunque con una desviación estándar de 18.06 que nos indica una dispersión considerable en los resultados de remoción.

Finalmente, se analizaron muestras de Zeolita y de la *Eleocharis macrostachya*, los resultados se muestran en el cuadro del 10 donde se muestran las concentraciones iniciales de cada prueba experimental, las concentraciones finales y el porcentaje de remoción en cada prueba experimental por cada HCFS en todo su proceso, con un promedio de remoción de 84.56% y una desviación estándar de 6.33.

El cuadro 11 refleja las concentraciones de manera natural de arsénico en la zeolita, antes y después de las pruebas experimentales.

La concentración de manera natural en la *Eleocharis Macrostachya*, antes de las pruebas experimentales, se muestran en el cuadro 12.

Cuadro 10. Porcentajes totales de remoción de arsénico

Experimento 1	Solución (mg/lt)	Efluente (mg/lt)	Total (%)
Humedal 1	10.17	1.3	87.21
Humedal 2	10.17	1.3	87.21
Humedal 3	10.17	1.25	87.70
Experimento 2	Solución (mg/lt)	Efluente (mg/lt)	Total (%)
Humedal 1	10.35	2.05	80.19
Humedal 2	10.35	1.7	83.57
Humedal 3	10.35	1.27	87.72
Experimento 3	Solución (mg/lt)	Efluente (mg/lt)	Total (%)
Humedal 1	10.44	1.05	89.94
Humedal 2	10.44	1.47	85.92
Humedal 3	10.44	1.9	81.80
Experimento 4	Solución (mg/lt)	Efluente (mg/lt)	Total (%)
Humedal 1	10.28	0.75	92.66
Humedal 2	10.28	0.67	93.45
Humedal 3	10.28	2.47	75.85
Experimento 5	Solución (mg/lt)	Efluente (mg/lt)	Total (%)
Humedal 1	10.22	1.92	81.21
Humedal 2	10.22	2.85	72.11
Humedal 3	10.22	2.9	71.62
Experimento 6	Solución (mg/lt)	Efluente (mg/lt)	Total (%)
Humedal 1	10.72	1.22	88.61
Humedal 2	10.72	1.3	87.87
Humedal 3	10.72	1.34	87.50

Cuadro 11. Concentración de arsénico (mg/kg) en Zeolita, antes y después de pruebas experimentales

Zeolita	Humedal 1	Humedal 2	Humedal 3
Antes	4.56 mg/kg	4.35 mg/kg	4.19 mg/kg
Después	30.67 mg/kg	28.03 mg/kg	35.68 mg/kg
Captación	26.11	23.68	31.49

Cuadro 12. Concentración de arsénico (mg/kg) en raíz y tallo de *Eleocharis Macrostachya* antes y después de pruebas experimentales

Raíz de E. M.	Humedal 1	Humedal 2	Humedal 3
Antes	1.74	8.41	4.92
Después	25.78	24.56	31.45
Captación	24.04	16.15	26.53
Tallo de E.M.	Humedal 1	Humedal 2	Humedal 3
Antes	N.D	N.D	N.D
Después	N.D	N.D	N.D

N.D. Nivel de concentración no detectable por el equipo analizador.

Balance de materia. El proceso de remoción de arsénico de una solución problema de concentración conocida por medio de HCFS con reactor de tanque agitado lleva a cabo un consumo de materia (arsénico en este caso), de acuerdo con Rahman *et al* , 2011 el balance de materia es la masa total de entrada, masa total de salida y la masa total en sustrato y plantas estimados al final del experimento, por lo tanto para el cálculo del balance de materia, ecuación 8:

$$MTe=MTs+MTsto+MTpta+Mnc \text{ (ecuación 8)}$$

Donde:

MTe es Masa total de entrada

MTs es masa total de salida

MTsto es Masa total en sustrato

MTpta es Masa total en planta

Mnc es Material no cuantificado

62.18 mg/lit arsénico = 50.15 mg/lit arsénico -8.29 remoción de arsénico durante el proceso + 3.74 de arsénico.

Análisis Estadístico

Por medio de la prueba t para muestras emparejadas, los resultados confirman que efectivamente hubo remoción tanto en la parte inicial del experimento (primer contacto) como en la parte final (después de 24 horas), como se muestran en el cuadro 13.

Los resultados de remoción de la solución problema en la fase inicial del tratamiento, denominada primer contacto, presentaron índices de remoción del 31.01% al 68.20%. Los resultados de los tratamientos de la solución problema en su fase completa (reactor, primer contacto y contacto 24 horas) indican que el

Cuadro 13. Prueba t para medias de dos muestras emparejadas. Variables de remoción 1er contacto vs variables de remoción 2° contacto

Concepto	Variable 1	Variable 2
Media	4.6561	1.5950
Varianza	0.7948	0.4138
Observaciones	18.0000	18.0000
Coeficiente de correlación de Pearson	0.1026	
Diferencia hipotética de las medias	0.0000	
Grados de libertad	17.0000	
Estadístico t	12.4345	
P(T<=t) una cola	2.9142E-10	
Valor crítico de t (una cola)	1.7396	
P(T<=t) dos colas	5.82841E-10	
Valor crítico de t (dos colas)	2.1098	

HCFS tuvo remociones de arsénico que oscilan desde un 31.01 % hasta un 93.12%, promediando un 84.56% con una desviación estándar de 6.33.

Se presenta remoción en cada fase del humedal, reactor con tanque agitado, contacto de 1h y 24h.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El uso de plantas rizofiltradoras para la remoción de arsénico por medio de HCFS como la *Eleocharis Macrostachya*, planta con fenotipo de acumulación de arsénico, es garantía para obtener porcentajes elevados de remoción.

En este trabajo se comprobó que los HCFS modificados con reactor de tanque agitado, con sustrato de zeolita y *Eleocharis Macrostachya* alcanzan porcentajes de remoción altos y de constancia considerable.

Se sugiere la aplicación de un proceso de potabilización para eliminar los rastros de arsénico, después del tratamiento por HCFS.

Se recomienda el seguimiento de este proyecto con un enfoque en la medición del rendimiento de la Zeolita, para determinar los volúmenes adecuados, es decir el máximo de remoción con la mínima cantidad de zeolita para la optimización del recurso.

La combinación de zeolita, como sustrato, y *Eleocharis macrostachya*, como macrofitas, en un HCFS provee sustentabilidad y eficiencia prolongadas en comparación con tratamientos que utilizan un solo actor removiente en el tratamiento de aguas contaminadas con arsénico ya sea de origen natural o por actividad antropogénica. La naturaleza nos ha demostrado que, si le permite el tiempo y el espacio, está por sí misma genera auto su recuperación.

En la región se cuenta con plantas purificadoras de agua por ósmosis inversa colocadas por parte de la junta central de agua y saneamiento de Meoqui y la junta rural de agua y saneamiento de Julimes. Estas plantas producen agua de rechazo con concentraciones altas de arsénico que de acuerdo a la normatividad correspondiente dicho desecho debe considerarse

residuo peligroso (toxicidad aguda). La disposición de este residuo debe manejarse para minimizarse su dispersión y contacto con el medio ambiente, así como su lixiviación hacia los mantos freáticos de la región.

La aplicación de un sistema de HCFS como el que corresponde a este proyecto, puede ser una alternativa para remover altas concentraciones de arsénico del agua de rechazo de los sistemas de ósmosis inversa, que se utilizan en los poblados de la región para proporcionar agua con calidad de uso y consumo humano. De esta forma, el agua de rechazo de las plantas de filtración por osmosis inversa podría reintegrarse en el uso para cultivos, balnearios y otras actividades de la región.

La difusión, tanto de la metodología como de los resultados presentados en este trabajo, es importante para el sector público encargado de la depuración de aguas contaminadas, para el sector científico que busca crear métodos y sistemas sustentables aplicables al mejoramiento de la calidad del agua, para el sector educativo en la formación de investigadores y profesionales en la sustentabilidad del medio ambiente y el agua como recurso vital. Por eso este material debe difundirse en publicaciones pro-ambiente, congresos y manuales.

Los HCFS son un método no convencional de remoción de elementos contaminantes de bajos costos de construcción, mínimo requerimiento de mantenimiento y con una muy baja generación de residuos. Comparados con cualquier otro método convencional de remoción de contaminantes, son más económicos, duraderos y sustentables.

LITERATURA CITADA

- Agniezka, E. 2011. Nitrogen, phosphorus and potassium resorption efficiency and proficiency of four emergent macrophytes from nutriente-rich wetlands. *Pol j environ stud*, 20 (5), 1227-1234.
- Arias, C y H. Brix. 2003. Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. 13: 17-24.
- Avilés, M y M. Padrón. 2000. Remoción de arsénico de agua mediante coagulación-floculación a nivel domiciliario. *Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, FEMISCA 200*: 1-10.
- Bernal, F., D. Mosquera, H. Maury, D. González, R. Guerra y A. Pomare. 2003. Humedales artificiales para el tratamiento de las aguas residuales en la corporación universitaria de la costa. *Seminario Internacional sobre métodos naturales para el tratamiento de Aguas Residuales*. Colombia: Universidad del Valle, Instituto Cinara.
- Bosch, P y I. Schifer. 1988. La zeolita una piedra que hierve. *La ciencia desde México*. Fondo de Cultura Económica México, D.F. 25-48
- Centeno, J., P. Tchounwou, A. Patlolla, F. Mullick, L. Murakat, E. Meza, H. Gibb, D. Longfellow y C. Yedjou. 2005. *Environmental pathology and health effects of arsenic poisoning: a critical review*. Adelaide, Australia: CSRIO publishing Corp.
- Conabio (Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad), Aridamérica A. C., GECl (Grupo de ecología y conservación de islas A.C.) y TNC (The Nature Conservancy). 2006. *Especies invasoras de alto impacto a la biodiversidad: prioridades en México*. México D.F.: Conabio
- CONAGUA, 1997. Estudio hidrogeológico, hidrogeoquímico y de la incidencia de arsénico, flúor y hierro en las zonas acuíferas de Delicias-Meoqui y Jiménez-Camargo en el Estado de Chihuahua. (Hydrogeological and hydrogen chemical study on the presence of arsenic, fluoride and iron in the Delicias-Meoqui y Jiménez-Camargo aquifers, Chihuahua State). Comisión Nacional del Agua
- Dochain, D., J.P. Babary. y N. Tali-Maamar. 1992. Modelling and adaptive control of nonlinear distributed parameter bioreactors via orthogonal collocation. *Automatica*, 55, 873-883.
- Espino, M.S y E. Herrera. 2009. Presencia del arsénico en la sección norte del acuífero Meoqui-Delicias, del estado de Chihuahua, México. *Tecnociencia Chihuahua* 3:8–18.

- Fernández, J., E. de Miguel, J. de Miguel y M. Curt. 2004. Manual de Fitodepuración, filtros de macrófitas en flotación. Editado dentro del Programa Life por el Ayuntamiento de Lorca, la Obra Social de Caja Madrid, la ETSIA de la UPM y la Fundación Global Nature.
- Flores, E., A. Armienta, S. Micete y M. Valladares. 2009. Tratamiento de agua para consume humano con alto contenido de arsénico: Estudio de un caso en Zimapán Hidalgo-México.
- Frederick, P., B. Kenneth y C. Chien-Jen. 1994. Health implications of arsenic in drinking water. *Journal AWWA*, 86, 9:52-63.
- Frers, C. 2008. El uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales. 1-5.
- Gorelick, S y C. Zheng. 2015. Global change and the groundwater management challenge. *Water Resources Research*, 51:3031-3051.
- Grinspan, D y R. Biagini. 1985, Hidroarsenicismo crónico regional endémico (HACRE). Las manifestaciones de la intoxicación arsenical por el agua de consumo. *Med Cut ILA*. 13: 85-109
- Jenssen, P., T. Maehlum, T. Krogstad y L. Vråle. 2005. High performance constructed wetlands for cold climates. *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 40 1343-1353.
- Kadlec, R y R. Knight. 1996. *Treatment Wetlands*. Boca Ratón, FL, USA: Lewis Publishers. Arias, C., & Brix, H. Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*.13: 17-24
- Kochian, L. V. 2000. Phytoremediation, using plants to clean up soil agricultural research. Disponible en: <http://www.ars.usda.gov/is/AR/archive/Jun00/soil0600.pdf>. Consultado: 15 de diciembre, 2003.
- Kusch, P. 2004. UFZ. Centre for Environmental Research. Phytoremediation. Disponible en: <http://www.ufz.de/index.php?en=3566>. Consultado: 28 de abril, 2004
- Lahera, V. 2010. Infraestructura sustentable: Las plantas de tratamiento de aguas residuales. Quivera, Universidad Autónoma del Estado de México. 2: 58-69.
- López, D., J. Bundschuh, P. Brikle, M. Armienta, L. Cumbal y O. Sracek. 2012. Arsenic in volcanic geothermal fluids of Latin America. *Sci total Environ*. 429: 57-75.

- López, H. A., E. A. Huerta, J. A. Gómez, J. M. Olivarez, A. Duarte y A. Pérez. 2016. Life cycle assessment of regional brick manufactur. *Materiales de Construcción*, 66(322), 1–9. <https://doi.org/10.3989/mc.2016.02315>
- Lozano-Rivas, W.A. 2012. Fundamentos de diseño de plantas depuradoras de aguas residuales. Bogota, Col.
- Maltby, E. 1991. Wetland management goals, wise use and conservation. *Landscape and Urban Planning*, 20: 9–18.
- Marconi, S., C. Beni, A. Ciampa, G. Diana, U. Neri, R. Aromolo, P. Sequi, y M. Valentini. 2010. Arsenic contamination in radish tuber investigated by means of mri and icp oes. *Journal of Food Quality*, 33: 529–543.
- Masuda, H. 2018. Arsenic cycling in the Earth's crust and hydrosphere: interaction between naturally occurring arsenic and human activities. *Progress in Earth and Planetary Science*. 5: 1-68.
- NOM-127-SSA1-2000 Salud Ambiental, Agua para Uso y Consumo Humano, Límites Permisibles de Calidad y Tratamientos a que debe someterse el agua para su Potabilización.
- Olmos, M.A. 2011. Remoción de Arsénico del Agua por Fitorremediación con *Eleocharis Macrostachya* en Humedales Construidos. Doctorado. CIMAV. Chihuahua. Chihuahua. México.
- Ormachea, M., M. García, J. L. Bhattacharya, P. Sracek, O. García, M. E. Kohfahl, C. Quintanilla, J. Hornero y J. Bundschuh. 2016. Geochemistry of naturally occurring arsenic in groundwater and surface-water in the southern part of the Poopó Lake basin, Bolivian Altiplano. *Groundwater for Sustainable Development*, 2–3, 104–116: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2016.04.002>
- Ostrooumov M. 2014, Zeolitas de México: Diversidad Mineralógica y Aplicaciones, Universidad Autónoma de Michoacán.
- Pardo, T. 2013. Recuperación de suelos contaminados por elementos traza mediante fitotecnologías de estabilización. Tesis doctoral.
- Quansah, R. F., A. Armah, D. K. Essumang, I. Luginaah, E. Clarke y K. Marfoh. 2015, Association of arsenic with adverse pregnancy outcomes/infant mortality: a systematic review and meta-analysis. *Environ Health Perspect*. 123: 412-421
- Sánchez A.F y M Rodríguez. 2000, Arsenicismo. *Rev Cent Dermatol Pascua*, 9:25-32.

- Singh, N., D. Kumar., y A. Sahu. 2007. Arsenic in the environment: effects on human health and possible prevention. *J Environ Biol.* 28, 359-365.
- Rajadel, N. 2011. Análisis de los rendimientos durante la puesta en marcha de un sistema de tratamiento basado en humedales artificiales destinado a la recuperación del lago de L'Albufera de Valencia. 1-132.
- Ramsar. Secretaría de la convención. 2006. Manual de la convención Ramsar: guía a la convención sobre los humedales (Ramsar, Irán, 1971). Cuarta edición. Gland, Suiza: Secretaría de la convención Ramsar.
- Tello, E.E. 1981. Las manifestaciones del hidroarsenicismo crónico regional endémico argentino (HACREA), 1981. *Arch Argent Dermatol* XXXI, 27-40.
- Uneyama, C., Toda, M., Yamamoto, M. y Morikawa, K. 2007. Arsenic in various foods: Cumulative data, *Food Additives' & Contaminants.* 24, 447-534.
- USEPA, 1982. Inductively coupled plasma-atomic emission spectrometric method for trace element analysis of water and wastes – Method 200.7. Cincinnati, OH: U.S. Environmental Protection Agency, Environmental Monitoring and Support Laboratory. *Environ. Contam. Toxicol.* 124, 79–110.
- USEPA, 1993 Subsurface Flow Constructed Wetlands for Wastewater Treatment A Technology Assessment, EPA 832-R-93-008, US EPA OWM, Washington, DC.
- USEPA, 1998. Analytical Methods for Groundwater and Drinking Water. Method 3125 B. Standard Methods, 20th Ed., American Water Works Association, Denver, CO.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency). 2003. A citizen's guide to phytoremediation. United States Environmental Protection Agency. Disponible en: <http://clu.in.org/download/citizens/citphyto.pdf>. Consultado: 28 de Julio, 2003.
- Vargas, S., D. Soares., O. Pérez. y A. Ramírez. (2009). La gestión de los recursos hídricos: realidades y perspectivas. Tomo 2. (IMTA) Universidad de Guadalajara. México.
- Vega-Gleason, S. 2001. Riesgo sanitario ambiental por la presencia de arsénico y fluoruros en los acuíferos de México. Comisión Nacional del Agua, Gerencia del Saneamiento y Calidad del Agua, México D.F.
- Valles, C. y Alarcón, M. T. (2014). Retención de arsénico en humedales construidos con *Eleocharis macrostachya* y *Schoenoplectus americanus*. *Rev. Intnal. Cont. Amb.* 30:143–148.

- Vizcaíno, B. 1998. Identificación y caracterización de la Zeolita tipo Clinoptilolita, 1998, Tesis de maestría en Ciencias con Especialidad en Metrología de la Radiación, Universidad Autónoma de Nuevo León., Nuevo León, México
- Wenzel, W y W. Fitz. 2002. Arsenic transformations in the soil-rhizosphere-plant system: fundamentals and potential application to phytoremediation. *Biotechnology* 99: 259-278.
- Wong, L.W y K. L. Yeung. 2007. Biological applications of zeolite microspheres. *Studies in Surface Science and Catalysis*. 170:1508-1513.

APÉNDICE A

Observaciones Experimentales Del Comportamiento De La Planta *Eleocharis macrostachya*.

Durante la realización de este trabajo de investigación, se observó el desarrollo de la planta *Eleocharis macrostachya* a lo largo de dos años, dentro de un invernadero.

A inicios del mes de septiembre y conforme las horas de luz natural fueron disminuyendo la planta inicio su periodo de hibernación. Se registró un cambio en el color de sus tallos, del verde intenso se tornaron amarillos, luego color marrón hasta que comenzaron a desprenderse dejando solamente un pequeño brote de aproximadamente 10 cm. Para el inicio y durante todo el invierno, las plantas prevalecieron como pequeñas matas de color verde. Al iniciar la primavera, la planta comenzó su rebrote. Luego de alcanzar una altura de 35 cm aproximadamente, en la punta de cada tallo emergió una espiga compacta de color negro. Conforme continuó su desarrollo, las espigas se tornaron blancas y tomaron una forma esponjosa. Esto ocurrió durante la primavera. Conforme las horas de luz se prolongaron, las plantas fueron perdiendo las espigas, dejando solo una especie de punta de lanza de color naranja. Para mediados del verano, la punta de lanza se dividió en dos, y al cabo de unos días comenzaron a brotar raíces de dicha división. Las raíces brotaron de forma aérea, una vez desarrollada y completamente emergida de aquella bifurcación, el peso las llevo al suelo, donde se internaron para dar vida a una nueva planta.

APÉNDICE B

Metodología Para Difusión Y Transferencia De La Tecnología A La Comunidad Y Su Aplicación

Para la difusión tanto de resultados como de las metodologías generadas por este proyecto se propone la publicación de esta tesis, además de la publicación de los resultados en revistas de difusión e institucionales, relacionadas con la conservación y cuidado del agua, además su difusión entre la comunidad estudiantil y las autoridades responsables del área de medio ambiente y ecología. De igual manera, se sugiere que se le dé continuidad al presente proyecto y con los datos obtenidos en la presente investigación, se diseñe un nuevo proyecto en el que se determine la capacidad total de adsorción de la zeolita antes de llegar a su saturación, una vez alcanzada la saturación, determinar una metodología para la recuperación del arsénico acumulado y permitir la reutilización de la zeolita.

Como estudio complementario, se sugiere el estudio del proceso de absorción de arsénico en las macrofitas y en el sustrato (zeolita). Esta información podría ayudar a prolongar el funcionamiento adecuado del HCFS. Para este proyecto se propone la publicación de los resultados obtenidos en revistas de difusión e institucionales, relacionadas con la conservación y cuidado del agua, además su difusión entre la comunidad estudiantil y las autoridades responsables del área de medio ambiente y ecología. De igual manera, se sugiere que se le dé continuidad al presente proyecto y con los datos obtenidos en la presente investigación, se diseñe un nuevo proyecto en el que se determine la capacidad total de adsorción de la zeolita antes de llegar a su

saturación, una vez alcanzada la saturación, determinar una metodología para la recuperación del arsénico acumulado y permitir la reutilización de la zeolita.

Como estudio complementario, se sugiere el estudio del proceso de absorción de arsénico en las macrofitas y en el sustrato (zeolita). Esta información podría ayudar a prolongar el funcionamiento adecuado del HCFS.