



Universidad Autónoma de Baja California

Instituto de Ingeniería

Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería

Construcción y evaluación de un humedal artificial horizontal a escala piloto para el tratamiento de aguas grises en Mexicali, B.C.

Tesis

Para obtener el grado de

Doctor en Ingeniería

Presenta

Lourdes Ojeda Ibarra

Directora de Tesis

Dra. M. Socorro Romero Hernández

Codirector

Dr. Jaime Alonso Reyes López

MEXICALI, B.C., 2017

Índice

Agradecimientos.....	vii
Dedicatoria.....	viii
Índice de Tablas.....	ix
Índice de Figuras.....	xi
Resumen.....	xiii

Capítulo 1

Introducción

1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Planteamiento del problema.....	5
1.3 Justificación.....	5
1.4 Hipótesis.....	5
1.4.1 Objetivo General.....	5
1.4.2 Objetivos específicos.....	5

Capítulo 2

Marco teórico

2.1 Generalidades.....	6
2.1.1 Problemática del agua a nivel mundial.....	6
2.1.2 Humedales naturales.....	9
2.1.3 Humedales artificiales.....	10
2.2 Plantas más comunes utilizadas en los humedales artificiales en el mundo	12
2.2.1 Plantas flotantes y sumergidas.....	12
2.2.2 Plantas Acuaticas más comunes en México.....	16

2.2.3	Plantas macrófitas de Mexicali Baja California seleccionadas para el estudio.....	18
2.3	Clasificación de humedales artificiales según las características de las plantas.....	19
2.3.1	Clasificación de humedales según la circulación del agua.....	20
2.3.2	Humedal artificial de flujo libre (HFS).....	21
2.3.3	Humedal artificial de flujo subsuperficial (HFSS).....	22
2.3.4	Humedal de flujo subsuperficial vertical (HFSS-V).....	24
2.3.5	Humedales de flujo subsuperficial horizontal (HFSS-H).....	25
2.4.	Parámetros teóricos para el diseño de los humedales tipo HAFSS-H.....	26
2.4.1	Recomendaciones para el tamaño del sustrato.....	27
2.5	Caracterización física del agua.....	27
2.6	Caracterización química del agua.....	29
2.7	Caracterización microbiológica del agua.....	30

Capítulo 3

Metodología

3.1	Revisión Bibliográfica.....	32
3.2	Ubicación del sitio para la recolección de plantas macrófitas.....	32
3.3	Análisis de parámetros físicos, químicos y bacteriológicos de agua gris de lavadora en el influente y efluente del humedal	32
3.4	Caracterización de agua gris de lavadora.....	33
3.5	Diseño experimental para obtener las variables significativas en la generación de agua de lavado de ropa utilizando el método Taguchi.....	33

3.6	Condiciones que se definieron de lavado de ropa para la obtención del Agua gris.....	33
3.7	Diseño y construcción del HAFSS-H.....	34
3.8	Evaluación en el HAFSS-H.....	34

Capítulo IV

Desarrollo experimental

4.1	Diseño del tamaño del HAFSS-H	35
4.1.1	Proporción de la constante de temperatura.....	35
4.1.2	DBO ₅ de agua gris de lavadora.....	36
4.1.3	Tiempo de retención.....	37
4.2.1	Area superficial.....	37
4.2.2	Volumen del HAFSS-H	38
4.2.3	Volumen de arena	38
4.2.4	Volumen de grava gruesa en los extremos	39
4.2.5	Volumen de grava fina.....	40
4.2.6	Volumen total del sustrato.....	40
4.2.7	Volumen libre de HAFSS-H	41
4.2.8	Cálculo del caudal para HAFSS-H	41
4.2.9	Tasa de carga orgánica.....	41
4.2.10	Cálculo de cantidad de plantas para el HAFSS-H	42
4.3	Selección de plantas.....	43
4.3.1	Procedimiento para la recolección, extracción y transportación de plantas macrofitas.....	45
4.4	Construcción del HAFSS-H.....	47
4.5	Tren de tratamiento de agua gris de lavadora al HAFSS-H	47
4.5.1	Toma de muestras para caracterización de agua gris de lavadora.....	48
4.6	Diseño experimental.....	49

4.6.1	Diseño experimental por el método de Taguchi.....	49
4.6.2	Diseños ortogonales por el método Taguchi.....	49
4.7	Alimentación de agua gris de lavadora al HAFSS-H.....	51
4.7.1	Toma de muestras.....	51

Capítulo 5

Resultados y discusión

5.1	Caracterización de agua gris de lavadora.....	54
5.2	Resultados de la DQO del primer y segundo experimento de la evaluación del HAFSS-H.....	55
5.2.1	Resultados de los análisis físicos, químicos y bacteriológicos del primer y Segundo experimento del HAFSS-H.....	57
5.3	Relación DQO/DBO ₅	62
5.3.1	Resultados de análisis de DQO/DBO ₅ y obtención de DBO ₅	63
5.3.2	Resultados promedio del efluente del segundo experimento	63
5.4	Resultados de remoción promedio en el primero y segundo experimento	64
5.5	Discusión.....	65
5.6	Conclusiones y recomendaciones.....	68
5.7	Referencias bibliográficas.....	69

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el otorgamiento de la beca económica para la realización de mi Doctorado en el Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería (MyDCI) del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California.

A la Universidad Estatal de Sonora UES por todo el apoyo brindado para realizar mis estudios de doctorado.

Al Instituto de Ingeniería de la UABC, por brindarme la oportunidad de cursar el Doctorado en Ingeniería. Mi agradecimiento y reconocimiento a mis maestros del Instituto de Ingeniería de la UABC, por el conocimiento brindado, por su paciencia, entrega y dedicación.

A la Dra. M. Socorro Romero Hernández por la dirección de este trabajo, por los conocimientos brindados y su continuo apoyo en el desarrollo de mi proyecto de investigación. Gracias por guiarme a lo largo de mis estudios de doctorado, por su gran sentido de responsabilidad y profesionalismo.

Al Dr. Jaime Alonso Reyes López por los conocimientos y el apoyo brindados, así como su acertada codirección para la realización de mi proyecto de investigación.

Al Dr. Héctor Enrique Campbell Ramírez y al Dr. Carlos Pérez Tello por el apoyo brindado en el proceso de mis estudios doctorales.

A la Ing. Luz E. Salazar Escalante por el apoyo brindado, en los trabajos de laboratorio.

Al M.I. Jesús Antonio Jiménez Angulo por su apoyo brindado en el proceso técnico de mi investigación.

A mis compañeros y amigos por creer en mí. Gracias por su amistad durante todo este tiempo. Así como, a todas aquellas personas que me apoyaron y me reanimaron con sus palabras de aliento.

Dedicatoria

Dedico este logro profesional con mucho amor a mis hijos: Eduardo Alan Ruíz Ojeda y Lourdes Anahis Ruíz Ojeda a quienes agradezco infinitamente su gran apoyo y comprensión y por ser el motor que me impulsa a seguir adelante.

A mis hermanas por ser parte importante en mi vida y representar la unidad familiar. Gracias por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado y por llenar mi vida de bellos momentos.

Finalmente, agradezco a Dios por haberme guiado a lo largo de todo este tiempo, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes.

Índice de Tablas

Tabla 1.	Incremento poblacional para la península de Baja California y otros estados de México.....	2
Tabla 2.	Humedales artificiales en México, utilizados para el tratamiento de las aguas residuales municipales (por estados).....	4
Tabla 3.	Plantas flotantes más comunes a nivel mundial.....	13
Tabla 4.	Plantas sumergidas más comunes a nivel mundial	14
Tabla 5.	Plantas más comunes en humedales en México.....	16
Tabla 6.	Plantas seleccionadas para el uso de agua gris de lavadora en Mexicali B.C.....	18
Tabla 7.	Ventajas y desventajas de HFS (EPA, 2000).....	23
Tabla 8.	Ventajas y desventajas de HFSS (EPA, 2000).....	23
Tabla 9.	Ventajas y desventajas del HFSS-V y HFSS-H.....	26
Tabla 10.	Valores típicos de sustratos de humedales construidos (Crites and Tchobanoglous 1998).....	27
Tabla 11.	Clasificación de pH en agua.....	29
Tabla 12.	Parametros físicos, químicos y bacteriológicos de agua gris de lavadora en HAFSS-H.....	33
Tabla 13.	Condiciones de lavado por etapas	34
Tabla 14.	Resultados obtenidos de DBO ₅ en agua gris de lavadora.....	37
Tabla 15.	Parámetros de diseño de construcción de humedal.....	44
Tabla 16.	Procedimiento para la extracción de plantas macrófitas.....	46
Tabla 17.	Condiciones operacionales para las corridas experimentales.....	49
Tabla 18.	Condiciones de lavado por el método de Taguchi.....	50
Tabla 19.	Arreglos ortogonales experimentales para el lavado de ropa.....	50

Tabla 20.	Arreglos experimentales por el método de Taguchi.....	51
Tabla 21.	Resultados de variables significativas por método Taguchi.....	51
Tabla 22.	Resultados de parámetros analizados a muestras compuestas de agua gris de lavadora.....	54
Tabla 23.	Resultados de CF en la caracterización de agua gris de lavadora.....	55
Tabla 24.	Comparación de resultados de la caracterización de agua gris con los obtenidos en otros estudios.....	55
Tabla 25.	Resultados de DQO primer experimento.....	56
Tabla 26.	Resultados de DQO segundo experimento.....	56
Tabla 27.	Resultados de parámetros físicos, químicos y bacteriológicos en influente y efluente del primer experimento.....	58
Tabla 28.	Resultados de parámetros físicos, químicos y bacteriológicos en influente y efluente del segundo experimento.....	59
Tabla 29.	Relación de análisis de DQO/DBO ₅	62
Tabla 30.	Resultados de DQO y DBO ₅	63
Tabla 31.	Comparativo de resultados del efluente con los límites de la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997.....	64
Tabla 32.	Resultados promedio de parámetros físicos, químicos y bacteriológicos (primero y segundo experimento).....	64

Indice de Figuras

Figura 1. Clasificación de humedales por plantas macrófitas.....	20
Figura 2. Clasificación de humedales artificiales.....	21
Figura 3. Humedal artificial de flujo libre.....	21
Figura 4. Humedal de flujo superficial con macrófitas sumergidas.....	21
(CIEMA, 2005).....	22
Figura 5. Esquema de un HFSS-V.....	24
Figura 6. Esquema HFSS-H.....	25
Figura 7. Material utilizado en análisis de DBO ₅	36
Figura 8. Resultados de análisis de DBO ₅	36
Figura 9. Vista de la capa de arena.....	39
Figura 10. Vista de la capa de grava gruesa en mamparas.....	39
Figura 11. Parámetros de cálculo para el volumen de grava fina	40
Figura 12. Substrato arena, grava y composta.....	42
Figura 13. Cantidad de plantas en HAFSS-H	43
Figura 14. Tule (<i>Typha latifolia</i> L.).....	45
Figura 15. Junco (<i>Typha domingensis</i>).....	45
Figura 16. Materiales utilizados en campo.....	46
Figura 17. Procedimiento de construcción del HAFSS-H.....	47
Figura 18. Tren de tratamiento del HAFSS-H.....	48
Figura 19. Muestras de agua gris de lavadora.....	48
Figura 20. Medidor de DQO.....	52
Figura 21. Medidor de pH.....	52
Figura 22. Medidor de CE.....	53
Figura 23. Analisis de coliformes fecales.....	53
Figura 24. Medidor de oxígeno disuelto.....	57
Figura 25. Concentración de DQO de influente y efluente en el primer experimento.....	57

Figura 26.	Concetración de DQO de influente y efluente en el segundo experimento.....	57
Figura 27.	Comportamiento de pH en influente y efluente del HAFSS-H en el primer experimento.....	60
Figura 28.	Comportamiento de pH en influente y efluente del HAFSS-H durante el segundo experimento.....	60
Figura 29	CE en el influente y efluente del HAFSS-H en el primer experimento.....	61
Figura 30	CE en el influente y efluente del HAFSS-H en el segundo experimento...	61
Figura 31.	SST en el influente y efluente del HAFSS en el primer experimento.....	62
Figura 32.	SST en el influente y efluente del humedal en el segundo experimento.....	62
Figura 33.	Resultados de NTK en influente y efluente en el primer experimento.....	63
Figura 34.	Resultados de NTK en influente y efluente en el segundo experimento....	63

RESUMEN

En el presente estudio se diseñó, construyó y evaluó un humedal artificial subsuperficial-horizontal como un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas a nivel piloto, se diseñó en base a los cálculos de la (U.S.EPA,1993) y se construyó con una capacidad de 240 litros por semana, el proceso consistió de las siguientes etapas: pretratamiento basado en un tanque de sedimentación, un sistema de bombeo, un tanque de alimentación, reactor biológico y finalmente un tanque de almacenamiento de agua tratada. Se utilizaron plantas nativas de tule (*Typha domingensis*) y junco (*Typha Latifolia*) como substrato arena fina de 0.2 mm y grava de 3 cm de diámetro.

Las aguas residuales domésticas provenientes de lavadoras fueron canalizadas y llevadas al Instituto de Ingeniería a la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), ubicada en Mexicali, Baja California, México, lugar donde se construyó el humedal, las cuales fueron depositadas en un tanque sedimentador previamente filtrado con una malla de 0.5 mm y una malla de nailon de 0.125 mm, y después de una hora de reposo, el agua se bombeaba a un tanque de depósito de agua gris que alimentaba al humedal artificial subsuperficial-horizontal construido.

El humedal fue monitoreado, realizando análisis físicos, químicos y bacteriológicos a las aguas grises de lavadora, tomando muestras de entrada y salida. En dos experimentos con un flujo de 36 L/día en un tiempo de 25 días y el segundo experimento en un tiempo de 30 días.

Se evaluó la eficiencia de remoción de Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK), fosfatos (PO_4^{3-}) y coliformes fecales (CF). Los resultados mostraron una eficiencia de remoción promedio de los experimentos 1 y 2 para DQO 83 %, SST 78.7 %, CF 96 %, NTK 71 % y fosfatos 27.79 %; pH del influente en un intervalo 7.8 y 8, pH entre 7.6 y 7.0 en el efluente. La conductividad eléctrica (CE) varió entre 1685 y 1630.7 en el influente y de 2630 $\mu S/cm$ a 2445 $\mu S/cm$ en el efluente, siendo mayor siempre en el efluente.

De los resultados se puede concluir que esta tecnología de humedales artificiales presenta una buena remoción de contaminantes en el agua gris proveniente del lavado de ropa, por lo que es una tecnología viable para la depuración de esta agua, con posibilidades de utilizarse en el riego de jardines y lavado de banquetas.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La región noroeste de México está clasificada como una zona árida en donde el recurso hídrico es limitado por lo que es necesario hacer un aprovechamiento sustentable de este recurso. Para incrementar la oferta de agua, se considera que una buena alternativa es el tratamiento y reuso del agua gris.

El Estado de Baja California por su localización geográfica se considera con una ubicación estratégica: clima árido, límites costeros, frontera con otro país con quien por cuestiones geográficas y naturales comparten el recurso agua y zonas de preservación ecológica. Estas condiciones generan aún más el compromiso de cumplir con las líneas de acción a nivel nacional establecidas por el Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012: Aprovechamiento de los recursos naturales, protección al medio ambiente y conocimiento para la sustentabilidad (Hídrico, P.E, 2008).

Mexicali, Baja California se encuentra en la zona noroeste de México, hace frontera con Estados Unidos de América a 32° 39' 40" norte y 115° 28' 04" oeste y tiene una población de 1,012,099 habitantes (COPLADE, 2014) y su clima se caracteriza como árido-semiárido con bajas precipitaciones.

Estas características climáticas, aunadas a las limitadas fuentes de agua en la región, condicionan la disponibilidad de agua. El Río Colorado es la principal fuente de agua en Mexicali y su Valle, el cual nace en las montañas rocallosas en los E.U (García et., al 2012). Por lo anterior es necesario administrar de manera sustentable el recurso hídrico y en este sentido los programas de restauración ya están considerando la construcción de humedales artificiales para mejorar la calidad de agua (García et al., 2011).

El incremento poblacional de la región va de la mano con la contaminación de las aguas residuales, según los datos del (INEGI, 2011), se prevé que para el año 2030, la población de la península se incrementará en un 52.36 % (CONAGUA, 2010). La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) indica que para el 2030 todas las aguas residuales deberán ser

tratadas y reutilizadas. De ahí que es importante analizar y evaluar tecnologías nuevas de tratamientos de aguas residuales y los humedales artificiales son una buena opción de reuso. En la Tabla 1, se observa el crecimiento poblacional de la península de Baja California y otros estados de México.

Tabla 1. Incremento poblacional para la península de Baja California y otros estados de México

No.	Región hidrológico administrativa	Población 2010	Población 2030	Incremento de población esperado
I	Península de Baja California	3 882	5 915	2 033
II	Noroeste	2 635	2 910	275
III	Pacífico Norte	3 959	3 795	-164
IV	Balsas	10 666	11 127	461
V	Pacífico Sur	4 131	4 022	-110
VI	Río Bravo	11 117	13 252	2 135
VII	Cuencas Centrales del Norte	4 217	4 568	351
VIII	Lerma-Santiago- Pacífico	21 141	23 512	2 371
IX	Golfo Norte	4 981	5 099	118
X	Golfo Centro	9 677	9 925	248
XI	Frontera Sur	6 674	7 498	823
XII	Península de Yucatán	4 145	5 807	1 662
XIII	Aguas del Valle de México	21 582	23 673	2 091
	Total	112 718	121 103	8 385

Nota: La Proyección considera a la población interpolada al 31 de diciembre de cada año
Fuente: CONAPO. Proyecciones de población de México 2006-2030. México, 2010.

El uso de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales es cada vez más aceptado en diferentes partes del mundo. Son considerados una tecnología "apropiada" cuando: los costos anuales totales están dentro de los recursos del usuario, la operación del sistema puede ser realizada con el trabajo localmente disponible, y el tratamiento alcanza los estándares de efluentes deseados de calidad (Setty K, 2007)

Los humedales de flujo subsuperficial son comunes en muchos países desarrollados (ej. Alemania, Inglaterra, Francia, Dinamarca, Polonia, Italia, etc.), siendo también apropiados para los países en desarrollo, solo que aún faltan ser más conocidos (Hoffman, 2011)

Los humedales artificiales se han implementado en los estados de Colima, Chihuahua, Distrito Federal, Estado de México, Hidalgo, Nayarit, Oaxaca, Tamaulipas y Tlaxcala CONAGUA, (2007). Y se han incrementado desde el 2009 los estados de Aguascalientes, Chiapas, Chihuahua, Michoacán, Morelos, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora, Tabasco, Tlaxcala, Veracruz y Quintana Roo, como se muestra en la Tabla 2, que indica la cantidad de humedales artificiales construidos por cada estado. Entre las ventajas que tienen estos sistemas frente a los tratamientos convencionales, están sus reducidos costos de operación y la baja generación de subproductos no deseados. Su proceso operacional se basa en la interacción de sus constituyentes principales: 1) medio de soporte, 2) plantas vasculares y 3) microorganismos (Ramírez et al., 2009).

Un humedal construido para el tratamiento de las aguas grises por biofiltración elimina una cantidad significativa de contaminantes de las aguas grises antes de que desemboque al agua subterránea, río, o humedal natural. La adición de patógenos, de bacterias y de toxinas no-biodegradables al agua superficial puede ser evitada con este tratamiento biológico, y así promover un ecosistema más sano y condiciones más sanitarias. El sistema puede ser construido para una sola casa o un grupo de casas, típicamente con un costo bajo (Yocum, 2007)

Tabla 2. Humedales artificiales en México, utilizados para el tratamiento de aguas residuales municipales (por estados)

Estado	Humedal	Tanque séptico + humedal	Uasb + humedal	Tanque imhoff + humedal	Sedimentación + humedal
Aguascalientes	3				
Colima		1			
Chiapas	1		1		
Chihuahua	1				18
Distrito Federal					
Jalisco	2				
México	1	1			
Michoacán	4				
Nayarit	3				
Oaxaca	38				
Puebla		1			
Querétaro	1				
San Luis Potosí	2		1		
Sinaloa	1	64			
Sonora	1				
Tabasco	2			1	
Tamaulipas	1				
Tlaxcala	3	2			
Veracruz			6		
Totales:	64	68	9	1	16

Fuente: (CONAGUA, 2009)

2.4 Planteamiento del problema

Mexicali, Baja California tiene un clima desértico. Sus fuentes de suministro de agua blanca son limitadas y las diversas actividades que demandan este recurso van en aumento así como su población. En la agenda del agua se señala que para el año 2030 todas las aguas residuales deberán ser tratadas y reutilizadas (CONAGUA, 2011), de ahí que es importante la búsqueda de estrategias que contribuyan para un mejor aprovechamiento de este recurso. Por lo anterior, el presente estudio propuso evaluar la tecnología de humedales artificiales para el tratamiento de agua gris.

2.5 Justificación

Con el desarrollo de esta investigación se obtuvieron los siguientes beneficios:

La evaluación de agua gris en un sistema de tecnología de humedales, contribuyó a generar información acerca de la capacidad de depuración de los contaminantes del agua gris que se produce del lavado de ropa. Se demostró que esta tecnología de tratamiento presentó una buena depuración de agua gris, por lo cual puede ser utilizada para el reuso de agua gris de proveniente del lavado de ropa.

1.4 Hipótesis

Es factible remover los contaminantes del agua gris que se genera del lavado de ropa, utilizando la tecnología de humedales artificiales utilizando plantas de tule y junco.

1.4.1 Objetivo General

Construir un humedal artificial utilizando plantas nativas y evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes del agua gris proveniente de lavado de ropa.

1.4.2 Objetivos específicos:

1. - Caracterización física y química del agua gris
3. - Diseñar y construir un humedal artificial subsuperficial-horizontal (HAFSS-H)
- 4.-Evaluar la eficiencia del HAFSS-H

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Generalidades

2.1.1 Problemática del agua a nivel mundial

El agua es uno de los compuestos más abundantes de la naturaleza y cubre aproximadamente las tres cuartas partes de la superficie de la tierra. Sin embargo, en contra de lo que pudiera parecer, diversos factores limitan la disponibilidad de agua para uso humano. Más del 97 % del agua total del planeta se encuentra en los océanos y otras masas salinas ya no están disponibles para casi ningún propósito. Del 3 % restante, por encima del 2 % se encuentra en estado sólido, hielo, resultando prácticamente inaccesible (Zambrano et al., 2009). El 3 % es agua dulce o de baja salinidad, el volumen total de agua dulce estimada asciende a 38 millones de kilómetros cúbicos, poco más de 75 % está concentrado en casquetes polares, nieves eternas y glaciares, el 21 % está almacenado en el subsuelo, y el 4 % restante corresponde a los cuerpos y cursos de aguas superficiales, lagos y ríos (CONAGUA, 2012)

Es importante que los países analicen sus recursos y el nivel de vida que alcanzan sus habitantes. Pues muy pronto será definitiva la cantidad de agua de que disponen. El crecimiento poblacional y los avances tecnológicos han traído consigo grandes ventajas pero a su vez han dado origen al problema de contaminación generada por las aguas residuales domésticas o industriales que son vertidas a las fuentes de agua de manera inapropiada y sin ningún tipo de tratamiento generando impactos negativos sobre la salud pública y el medio ambiente (Bernal, et al, 2008)

Debido al gran crecimiento demográfico, las proyecciones estiman el aumento en el consumo en un 40 %, según indicadores de la ONU. El Consejo Mundial del Agua estima que para el 2020 se necesitará cerca de 17 % más agua que la disponible si deseamos abastecer al planeta de agua y alimento para todos los habitantes. (Aguado, 2009)

Según la Organización de las Naciones Unidas (ONU), en la actualidad, de los 6 250 millones de habitantes, 1 100 millones no tienen acceso al agua potable y 2 400 millones carecen de un saneamiento adecuado. (Ponce et al., 2014)

Se necesita movilizar el compromiso político, la capacidad y la buena fe del ser humano para evitar que se hagan realidad los augurios acerca de una inminente crisis del agua. (Ramírez et al., 2009). Uno de los factores indispensables para tener una adecuada protección de las fuentes de suministro de agua es contar con tecnologías que provean un tratamiento efectivo y adecuado al agua residual. Para generalizar esta práctica es necesario contar con los recursos económicos y humanos necesarios que, para la realidad de nuestro país, se traduce en implantar sistemas eficientes, poco mecanizados y de bajo costo de inversión y operación. (CONAGUA, 2007)

En México, se tienen problemas de disponibilidad de agua por su distribución fisiográfica y climática, contaminación de las aguas superficiales y por el incremento acelerado de las demandas que requieren los diferentes usos (Escalante et al., 2003). El problema de escasez y abundancia de agua se da según el territorio ya que dos terceras partes son áridas o semiáridas, principalmente en el norte y el centro, donde sólo ocurre el 28 por ciento del escurrimiento, mientras que el 72 por ciento restante se origina en el sureste del país.

La región noroeste de México está clasificada como una zona árida en donde el recurso hídrico es limitado por lo que es necesario hacer un aprovechamiento sustentable de este recurso. Para incrementar la oferta de agua, se considera que una buena alternativa es el tratamiento y reusó del agua gris. Por lo anterior se propuso el desarrollo del presente estudio en la ciudad de Mexicali, Baja California, México.

Esta ciudad se encuentra en la zona noroeste de México, hace frontera con Estados Unidos de América a 32° 39' 40" norte y 115° 28' 04", su clima se caracteriza como árido-semiárido con bajas precipitaciones. Estas características climáticas, aunadas a las limitadas fuentes de agua en la región, condicionan la disponibilidad de agua.

El Río Colorado es la principal fuente de agua en Mexicali y su Valle, el cual nace en las montañas rocallosas en los Estados Unidos de América (García et. al., 2012). Por lo anterior es necesario administrar de manera sustentable el recurso hídrico y en este sentido los programas de restauración ya están considerando la construcción de humedales artificiales para mejorar la calidad de agua (García et. al., 2011)

La (CONAGUA, 2011), da a conocer las descargas de aguas residuales a nivel municipal, las cuales ascienden a 235.8 m³/s y las aguas industriales generadas 190.4 m³/s. La (CONAGUA, 2008) indicó que solamente se trata el 35 % de las aguas residuales municipales generadas y en cuanto al agua industrial, sólo se logra una cobertura de tratamiento de 18 %, respecto al agua residual. La cantidad de agua dulce disponible en todo el mundo está disminuyendo y existen métodos de conservación de agua como el reciclaje de aguas grises para el riego. Las aguas grises son aguas residuales domésticas en la cual sólo incluye el agua de lavado (es decir, baño, plato, y lavadero de agua (Gross et al, 2007)

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 et al., 2006). Las aguas residuales domiciliarias, tal como salen de la casa, contienen distintos contaminantes que, de no ser tratados, pueden afectar nuestra salud y la calidad del ambiente. Entre estos contaminantes encontramos: Microorganismos patógenos (bacterias, virus, parásitos) que producen enfermedades como la hepatitis, cólera, disentería, diarreas; Materia orgánica (materia fecal, papel higiénico, restos de alimentos, jabones y detergentes) que consume el oxígeno del agua y produce malos olores. Además los nutrientes del agua propician el desarrollo desmedido de algas y malezas acuáticas en arroyos, ríos y lagunas. (Mariñelarena, 2006)

Las aguas grises se denominan a las aguas residuales domésticas, que no han sido contaminadas por los desechos del inodoro. Incluye el agua de las bañeras, lavabos y lavadoras.

La calidad del agua gris varía entre los hogares, incluso varía diariamente en función de las actividades de los ocupantes del hogar, ocasionando contaminación química (Corbella, 2012). El proceso para el tratamiento de aguas grises para la eliminación de partículas disueltas, y materia orgánica, se realizan en base de procesos físicos como biológicos (Elmitwalli, 2007), Las aguas grises se pueden considerar un candidato adecuado para su reutilización, ya que el flujo producido está disponible en el sitio para su reutilización (Winward et al., 2008). Las tecnologías de tratamiento de aguas grises deben ser robustas para manejar variaciones en la concentración orgánica y patógenos en agua gris del influente y para producir consistentemente efluentes de una calidad adecuada y segura para cumplir con los estándares requeridos para reutilizar (Winward et al., 2008)

2.1.2 Humedales naturales

Según el convenio de Ramsar sobre la definición de humedales indica que son extensiones de marismas, pantanos y turberas o superficies cubiertas de agua, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces salubres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros (Ramsar Convention, 1971, citado por Cano, 2003)

Los humedales naturales son ecosistemas que surgen cuando la saturación del terreno por agua produce sustratos hídricos (dominados por procesos anaeróbicos) y permite el establecimiento de biota, principalmente plantas enraizadas, con adaptaciones para tolerar la anegación (Keddy, 2004, Citado por Berlanga et al., 2008). Pueden llegar a ser muy complejos, con una capa de agua que cubre el suelo, gran cantidad de vegetación a diferente nivel (sumergido, flotante y emergente) y aguas subterráneas más o menos próximas a la superficie (Melo, Sanchez, 2013). Constituyen un eslabón básico del ciclo del agua. Su conservación y manejo sustentable pueden asegurar la riqueza biológica y los servicios ambientales que éstos prestan, tales como el almacenamiento del agua, la conservación de los acuíferos, la purificación del agua mediante la retención de nutrientes, sedimentos y contaminantes, la protección contra tormentas y la mitigación de inundaciones, la estabilización de los litorales y el control de la erosión (CONAGUA, 2012)

Lo característico de un humedal es la presencia de agua durante períodos lo bastante prolongados como para alterar los suelos, sus microorganismos y las comunidades de flora y fauna hasta el punto de que el suelo no actúa como en los hábitat acuáticos o terrestres (Llagas, Gomez, 2006). Es esta la razón de la importancia de los humedales con la gran ventaja de filtrar el agua residual de manera natural. Es por eso que se han realizado muchísimas investigaciones de cómo se genera este proceso natural para tratar el agua de manera económica y efectiva.

2.1.3 Humedales artificiales

Los primeros experimentos realizados por medio de humedales artificiales de macrófitas enraizadas para el tratamiento de aguas residuales se llevaron a cabo por Käthe Seidel en Alemania a principios de los años de 1950. Los humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal fueron iniciados por Seidel en la década de 1960 y mejoraron por Reinhold Kickuth a finales de 1960 y principios de 1970 y se extendió por toda Europa en los años 1980 y 1990 (Vymazal, 2005). Los humedales artificiales presentan una forma amigable con el ambiente para tratar aguas artificiales. Es una técnica que puede adecuarse a las condiciones ambientales del sitio donde se quiera construir (Arias, Brix, 2016)

Los humedales artificiales utilizan los mismos procesos que tienen lugar en los humedales naturales (Navarro et.al., 2013). Son sistemas de tratamiento ecológicamente aceptables para el tratamiento de las aguas residuales, son económicos, efectivos y ayudan a la restauración de la tierra. Guido, (2008) comenta que los humedales construidos o humedales artificiales representan una opción alternativa para los problemas que encaran los países con economías emergentes como México desde el punto de vista económico y tecnológico, porque son sistemas de tratamiento en los que, a través de procesos físicos, químicos y biológicos se logra la remoción de contaminantes presentes en las aguas residuales, pudiéndose utilizar una vez tratada para uso agrícola o industrial. Se utilizan en Europa y Estados Unidos, desde 1967, sin embargo, el desarrollo de esta tecnología no se ha visto favorecida en países en vías de desarrollo.

Los humedales artificiales, son construidos por el hombre tomando como base el funcionamiento de los humedales naturales y se les conoce como “sistemas naturales de tratamiento”. Los componentes de un humedal artificial son las plantas, el sustrato y la población microbiana. La depuración del agua ocurre por la interacción entre los elementos compuestos del humedal y de los fenómenos físicos, químicos y biológicos dentro del humedal, con la intervención del sol como fuente de energía (Arias, Brix, 2003)

Entre las especies más comúnmente utilizadas como sistema de macrófitas acuáticas en humedales artificiales se encuentran la *Typha ssp*, el *Phragmites comunes*, el *Juncos ssp*, el *Schoenoplectus* y el *Carex* (Reed, Crites y Middlebrooks, 1995; Becares, 2004 citado por Salazar, 2013)

La remoción de materia orgánica en agua residuales por medio de humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal, se dan por la demanda química de oxígeno la cual se pueden eliminar mediante cualquier proceso biológico viable, aerobio, anaerobio u otro. Sin embargo, los procesos aerobios son los que se suelen emplear como método principal para la reducción de DBO₅ en las aguas residuales domésticas, ya que las reacciones microbiológicas son rápidas, por lo regular 10 veces más que en los procesos anaerobios. Por lo tanto, los humedales, aunque sean relativamente pequeños, pueden permanecer abiertos a la atmósfera, dando lugar a la forma más económica de reducción de DBO₅ (Montoya et. al., 2013). La remoción de contaminantes, como carbono, nitrógeno y fósforo principalmente, se puede llevar a cabo con el uso de estos humedales construidos. Estos sistemas se conocen como tecnologías “pasivas”, donde el uso de energía se minimiza al permitir que la remoción de los contaminantes se lleve a cabo por mecanismos que ocurren de manera espontánea en la naturaleza (Reyes et al., 2006)

La ventaja de utilizar estos sistemas radica en que su tecnología es relativamente simple y presentan una buena eficiencia en la remoción de Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Nitrógeno total Kjeldahl (NTK), Fósforo (P) y patógenos. Además, tienen la capacidad de absorber metales pesados y no generan malos olores (Kadlec, 2009; Zurita et al., 2009)

Los humedales construidos consisten en el diseño correcto de un estanque que contiene agua, sustratos y plantas que en su mayoría son del tipo emergentes, aunque también pudieran ser flotantes o sumergidas (Piérart, Rojas, 2013)

Las plantas pueden ser de diferentes especies y entre sus principales funciones se encuentra la absorción de nutrientes, la relación simbiótica que se establece con los microorganismos, el suministro de oxígeno y la filtración de partículas (Brix et al., 2001). Las plantas comúnmente utilizadas en los humedales artificiales son; *Typha domingensis*, uña de gato, cola de gato y espadaña.

La principal función de los humedales, es que actúan como filtradores naturales de agua, además de que las plantas que los constituyen liberan oxígeno, dando vida a muchas especies acuáticas (Delgadillo, 2010). El uso de humedales para el tratamiento de agua residual, ayuda a proteger los cuerpos de agua, la flora, la fauna y la salud pública. Diversos estudios se han realizado hasta el día de hoy para evaluar la capacidad de reducción de compuestos orgánicos e inorgánicos en humedales artificiales (Suárez et al., 2014). Estos sistemas pueden incluir especies ornamentales, que además de embellecer el entorno, mantiene libre el aire de malos olores y atraen insectos polinizadores y aves (Hidalgo et al., 2005)

2.2 Plantas más comunes en los humedales artificiales en el mundo

2.2.1 Plantas flotantes y sumergidas

En la Tabla 3 se muestran las plantas flotantes más utilizadas en el mundo en el tratamiento de aguas residuales. Estas plantas tienen la capacidad de crecer y flotar libremente en el agua sin necesidad de arraigarse. Sus raíces están sueltas dentro del agua, pueden absorber grandes cantidades de nutrientes disueltos en el agua a una gran velocidad y hacer sombra disminuyendo la temperatura y los niveles de luz del agua. Algunas de estas especies se multiplican con gran rapidez.

Las plantas sumergidas (ver Tabla 4) son aquellas plantas que están completamente debajo de la superficie del agua. También producen y liberan oxígeno al agua durante el día como resultado de la fotosíntesis (Álvarez, 2007). Las plantas sumergidas, sirven para mantener el agua clara, sus hojas absorben los minerales y el dióxido de carbono

dificultando el desarrollo de algas, permanecen completamente sumergidas excepto las flores, que salen de la superficie, crecen muy rápidamente por lo que hay que controlar su desarrollo (Álvarez, 2007)

Tabla 3. Plantas flotantes más comunes a nivel mundial

















Nombre de la planta	Lugar de origen	Característica
<p>Mordisco de rana (<i>Hydrocharis morsus-ranae</i>).</p> 	<p>Europa y Norteamérica.</p>	<p>Plantas acuáticas, herbáceas, emergentes, alcanza una envergadura de 10 cm, crece bien en agua, frescas, profundas y tranquilas, en lugar soleado. Se multiplican fácilmente. (Infojardin, 2012)</p>
<p>Lechuga de agua (<i>Pistia stratiotes</i>).</p>  <p>http://oczkwodne.net</p>	<p>América tropical.</p>	<p>En la naturaleza puede constituir una verdadera plaga. Planta acuática flotante y semiacuática, de terreno fangoso se usa para acuarios, pequeños estanques Su temperatura mínima es de 15 °C y la óptima de crecimiento es de 22 a 30 °C. (Infojardin, 2012)</p>
<p>Sombrillita de agua (<i>Hydrocotyle ranunculoides</i>).</p>  <p>http://www.victoria-adventure.org</p>	<p>América del Sur. América del Norte. Nativo de toda el área del Caribe y de América tropical.</p>	<p>Planta acuática flotante. Inusual por su forma de acordeón. Crece en forma horizontal. En la naturaleza crece en aguas ricas, le gusta la luz difusa en grandes cantidades. Se propaga por división (Bernal, 2003)</p>
<p>Lenteja de agua (<i>Lemna gibba</i>) lentejillas.</p>  <p>http://jata.vampula.net/</p>	<p>Por todo el mundo.</p>	<p>No supera los 5 mm de largo, de rápida reproducción, absorbe todo tipo de nutrientes, no constituye un problema para el ecosistema, ya que sirve de alimento a peces y microbios, además de consumir agentes contaminantes. (Escobar, 2017)</p>
<p>Buchón Cucharita (<i>Limnobium</i></p>  <p>http://maomolina.tripod.com/plantas.htm</p>	<p>De México hasta el Perú.</p>	<p>Se presenta en estanques y canales de tierra fría. Se propaga por semillas y por estolones. Su utilidad radica en que vitaliza las aguas donde ella crece se desarrollan muy bien los pececillos nativos de los ríos y quebradas sirve de alimento a las aves acuáticas. (Bernal et al., 2011).</p>

Tabla 4. Plantas sumergidas más comunes a nivel mundial





Nombre de la planta	Lugar de origen	Característica
<p>Estrella de agua (<i>Callitriche palustres</i>).</p>  <p>http://www.nature.chita.ru/</p>	<p>En la mayor parte de Europa.</p>	<p>Hábitat natural: charcas de agua dulce poco profundas en montaña. Planta perenne, anfibia o terrestre. Pueden crecer total o parcialmente sumergidas en aguas profundas, ya que enraízan en el lodo del fondo. (Infojardin, 2012)</p>
<p>Milhojas acuáticas (<i>Myriophyllum aquaticum</i>).</p>  <p>http://www.lakenormansweb.com</p>	<p>Sudamérica.</p>	<p>Planta sumergida, de porte extendido muy buena oxigenadora para estanques y acuarios. Resiste el invierno mediante yemas en forma de copa. Se multiplica mediante esquejes en verano. (Infojardin, 2012)</p>
<p>Ceratófila, Celestina (<i>Ceratophyllum demersum</i>).</p>  <p>http://www.aquaonline.com.br/</p>	<p>Zonas templadas y tropicales.</p>	<p>Planta que vive completamente sumergida en los canales y lagunas. Uso: en estanques y acuarios como planta sumergida oxigenante. Tiene problemas para quedarse sujeta a la grava ya que no enraíza bien, por lo que es muy común que se utilice como flotante. (Infojardin, 2012)</p>
<p>Helecho acuático (<i>Salvinia natans</i>).</p>  <p>http://lifeform.coomaru.com/</p>	<p>América y España.</p>	<p>Puede encontrarse en charcas, lagos y estanques. Se utiliza en estanques y acuarios como planta de oxigenación (oxigenante). Útil para tanques de cría o "engorde de alevines" por su aptitud como "criadoras de infusorios". (Infojardin, 2012)</p>
<p>Luchecillo (<i>Elodea canadensis</i>).</p>  <p>http://www.aqualys.qc.ca/</p>	<p>Norteamérica.</p>	<p>Planta oxigenadora para estanques, de tallo largo (5 a 15 cm) ramificado. Las hojas están alargadas, ovaladas, miden 2.5 mm de ancho y de 5 a 10 de largo, translúcidas, verde oscuro, altura de hasta 100 cm. De las más fáciles de cultivar. (Infojardin, 2012)</p>
<p>Enea (<i>Typha latifolia</i>), Espadaña, Junco de la pasión.</p> 	<p>En todo el mundo.</p>	<p>Alcanza los 3 m de altura. Las hojas miden hasta 18 mm de ancho. Sus flores son espigas en formas de cigarro, de 30 cm de largo. Puede ser extremadamente invasiva (Bernal et al., 2011)</p>







Nombre de la planta	Lugar de origen	Característica
<p>Llantén de agua, (<i>Alisma plantago-aquatica</i>).</p>  <p>http://www.legambientearcipelagoscano.it/</p>	<p>Europa y Australia.</p>	<p>Bordes de lagos y ríos. Muy extendida. Altura: 50 - 75 cm. Planta vivaz, acuática o semiacuática, propia del borde del agua, y raíz con filamentos. Posición: Estanque borde.</p>
<p>Junco (<i>Scripus californicus</i>).</p> 	<p>Toda América y autóctono de Baja California.</p>	<p>el toche de laguna o monjita. Absorbe Se da en los ambientes saturados de agua. Sus granos sirven de alimento a varias especies de pájaros, entre ellos alto contenido de materia orgánica.</p>
<p>Pita acuática, (<i>Stratiotes Alcides</i>) o vulgar: Pita acuática, Pita de agua.</p>  <p>http://www.vyverexpert.nl</p>	<p>En todo el mundo.</p>	<p>Durante el otoño se hunden debajo del agua y permanecen ahí hasta la primavera. Las plantas, que necesitan aguas profundas, alcanzan una envergadura de 30 cm de diámetro. Se encuentra predominantemente en aguas alcalinas.</p>
<p>Victoria regia, (<i>Victoria amazonica</i>) Abatiyú, Agoapé, Aguapé, Hoja de sol, Iguapé, Irupé, Maíz de agua, Ninfa real, Plato de agua, Loto gigante. .</p> 	<p>América meridional, Amazonas. Brasil, Colombia, Perú y Guyana.</p>	<p>Sus grandes hojas redondas pueden llegar a medir hasta 2 m de ancho. La hoja está sostenida por un largo pecíolo que la une a un rizoma sumergido que se hunde en el lodo. Son flores grandes de entre 20 y 40 cm. Floración: verano. No soporta temperaturas inferiores a 15 °C. Es difícil de encontrar a la venta. (Infojardin, 2012)</p>
<p>Papiro, Papiro de Egipto (<i>Cyperus-papyrus</i>).</p> 	<p>Cuenca del Nilo, África tropical hasta Egipto.</p>	<p>Rápido crecimiento. Flores agrupadas en inflorescencias, con numerosas brácteas de hasta 30 cm de largo, Uso: para estanques, embalses, pequeños lagos, o bien como planta de interior en maceta.</p>



2.2.2 Plantas Acuáticas más comunes en México

En la Tabla 5, se observan las plantas más comunes en los humedales en México.

Tabla 5. Plantas más comunes en humedales en México

Nombre de la planta	Lugar de origen	Característica
<p>Espadaña, Totorá, Junco, Bayón, Bayunco (<i>Typha latifolia</i> L).</p> 	<p>América, Eurasia y África.</p> <p>En México: Michoacán, Zumpango, Cuautitlán, Tlalnepantla, Texcoco y Tláhuac.</p>	<p>Planta acuática, enraizada, emergente, perenne, hasta de 3 m de altura; hojas generalmente igualando la altura de las espigas, parte superior de las vainas auriculadas, por lo común simétrica, Espadaña”, “masa de agua”, “tule”. Vive en lugares tranquilos de agua dulce de lagos, lagunas, pantanos, zanjas y canales.</p>
<p><i>Nymphaea mexicana</i>.</p>  <p>Foto: Mirko Hartig, 2007</p>	<p>California, Estados Unidos.</p> <p>Es nativa de la Costa del Golfo, Michoacán Morelia.</p> <p>http://www.epalzeorhynchos.de/seerosen/mexicana.htm</p>	<p>La planta tiene espesos rizomas y largos y esponjosos estolones que soportan los pequeños racimos de color amarillo. La planta crece a partir de semillero o enviar a sus nuevos retoños desde los estolones. Flotan en la superficie del agua. Fuente: (Escutia et al., 2009).</p>
<p>Potamogeton (<i>L. Potamogeton illinoensis</i> Morong).</p>  <p>Foto: Frank Vincentz</p>	<p>América.</p> <p>Municipio de Zumpango Xochimilco.</p>	<p>Planta acuática, enraizada, sumergida, perenne; tallo simple o ramificado, cilíndrico, de 1 a 2 mm de diámetro; Vive en aguas dulces tranquilas de lagos y lagunas con cierta profundidad.</p>
<p><i>Sagittaria macrophylla</i> Zucc. (<i>S. Mexicana</i> Steud).</p> 	<p>Municipios de Huehuetoca, Zumpango, Tepotzotlán, Cuautitlán, Tultitlán, Ciudad de México, Texcoco y Tláhuac.</p>	<p>Planta acuática, enraizada, hojas emergentes de 12 a 24 cm de largo y a 10 cm de ancho. Vive en zanjas, charcas, canales y lagunas de agua dulce. Los tubérculos son comestibles. Especie endémica de México.</p>



Nombre de la planta	Lugar de origen	Característica
<p>Willd (<i>Hydromystria laevigata</i>).</p> 	<p>Delegaciones de Zumpango, Tlalnepantla, Ciudad de México, Chimalhuacán, Xochimilco y Tláhuac. México, Sudamérica y las Antillas.</p>	<p>Planta acuática, libremente flotadora o a veces enraizada en el lodo, perenne, estolonífera; rizoma corto, erecto; hojas dispuestas en rosetas, emergentes o flotantes, Vive en aguas dulces tranquilas y someras de canales, zanjas, pantanos y lagunas con altos contenidos de nutrientes.</p>
<p>Lirio cuático (<i>Eichhornia cripes</i>).</p> 	<p>Autóctona de México, Baja California Sur, Chihuahua, Zacatecas, Tlaxcala y Yucatán.</p>	<p>Es una planta libre flotadora Los lóbulos de la flor presentan tonalidades que van del color morado al lila y al azul claro, destacando en el lóbulo superior central una mancha de color amarillo. (Miranda, 1999)</p>
<p>Boraxweed (<i>Nitrophila occidentalis</i>).</p>  <p>Foto: Stan Shebs 29 Mayo 2006</p>	<p>Estados Unidos y Norte de México, Delta del Río Colorado</p>	<p>Produce tallos erectos de hasta unos 30 centímetros de altura. Los tallos tienen un par de ramas llenas de sentido opuesto arreglado, verde carnoso, lineales o rectangulares hojas de hasta 1.6 centímetros de longitud. (Ezcurra, Rodríguez, 1986)</p>
<p>Tule (<i>Typha domingensis</i>).</p>  <p>Foto: Javier Martin, 2009</p>	<p>Ciénaga de Santa Clara, Ciénegas el Doctor y en la laguna el Indio.</p>	<p>Emergente, hasta 2.5 m de altura, láminas hasta de 1.5 m de largo. http://www.conabio.gob.mx/malezas</p>
<p>Lirio amarillo (<i>Nymphaea mexicana</i>).</p>  <p>Foto: Mirko Hartig, 2007</p>	<p>Sur de los Estados Unidos, California. Costa del Golfo.</p>	<p>Las flores de loto flotantes tienen pétalos de color amarillo, sépalos de color amarillo verdoso. Las semillas están contenidas en las bayas verdes que crecen bajo el agua. Fuente: http://www.epalzeorhynchos.de/seerosen/mexicana.htm.</p>
<p>Pluchea Sericea, Arrowweed (Cachanilla) (<i>P. Sericea</i>).</p> 	<p>Río Colorado de California, Nevada y Arizona, Texas y en el norte de México.</p>	<p>Es un arbusto de hoja perenne rizomatosa, de áreas ribereñas en la parte baja del desierto de Sonora y sus alrededores, donde a menudo se forma densos matorrales impenetrables.</p>

Nombre de la planta	Lugar de origen	Característica
Carrizo (<i>Phragmites australis</i>). 	Ciénaga de Santa Clara, en la Ciénaga el Doctor y en la Laguna El Indio. Foto: Javier Martin, 2009	Es una planta perenne, con capacidad para crecer en la superficie buscando agua. Puede alcanzar los 4 m de altura y 2 cm de diámetro, presentando una gran inflorescencia al final del tallo. (Martin, 2010)
Junco (<i>Juncus acutus</i>).  Foto: Esculapio, 2006		Es una planta perenne de color verde oscuro que forma matas de 1.5 a 2 m las láminas y los culmos son cilíndricos. flores pardas o rosáceas, diminutas. http://www.ars-grin.gov/

2.2.3 Plantas macrófitas de Mexicali Baja California seleccionadas para el estudio

Las plantas más comunes en el uso de las aguas residuales por su capacidad de depuración son: las plantas macrófitas emergentes como el tule (*Typha domingensis*), carrizo (*Phragmites australis*) y los juncos (*Scrpus spp.*). Estas plantas son originarias de la región de la ciénaga del golfo de Santa Clara, del río Hardy y del río Nuevo. Así como en los alrededores de la ciudad de Mexicali, Baja California. En la Tabla 6 se describen las características más importantes de estas plantas macrófitas.

Tabla 6. Plantas seleccionadas para el uso de agua gris de lavadora en Mexicali, Baja California

Nombre de la planta	Características	Tipo de contaminación
Tule (<i>Typha Latifolia</i>) 	Son fuertes, fácil de propagar, y capaz de producir una biomasa anual grande.	Típicamente quitan cantidades grandes del nitrato y de fosfato.
Juncos (<i>Typha domingensis</i>) 	Crecen en grupos y crecen bien en agua que tiene una profundidad de 5 cm a 3 m.	Estas plantas logran una eliminación alta de contaminantes.

Los humedales artificiales tienen un mejor rendimiento de depuración cuando se siembran plantas de la región, la Ciénaga del alto Golfo de California y Delta del Río Colorado cuenta con algunas de estas plantas, para este trabajo se seleccionaron las plantas de vegetación acuática emergente Tule (*Typha domingensis*), y Junco (*Juncus acutus*). Los bordes de estos sitios están dominados por vegetación halófila. Esta vegetación se considera como un remanente de lo que fueron los humedales salobres y dulceacuícolas del antiguo delta del Río Colorado. (Hoeflich, 2007)

2.3 Clasificación de humedales artificiales según las características de las plantas

Los humedales artificiales se clasifican según las características de las plantas que se vayan a utilizar (Arias, Brix, 2003).

- 1.- Humedales contruidos, basados en macrófitas flotantes
- 2.- Humedales contruidos, basados en macrófitas de hojas flotantes
- 3.- Humedales contruidos, con macrófitas sumergidas
- 4.- Humedales contruidos, con macrófitas emergentes

En la figura 1 se puede observar una clasifcan de los humedales

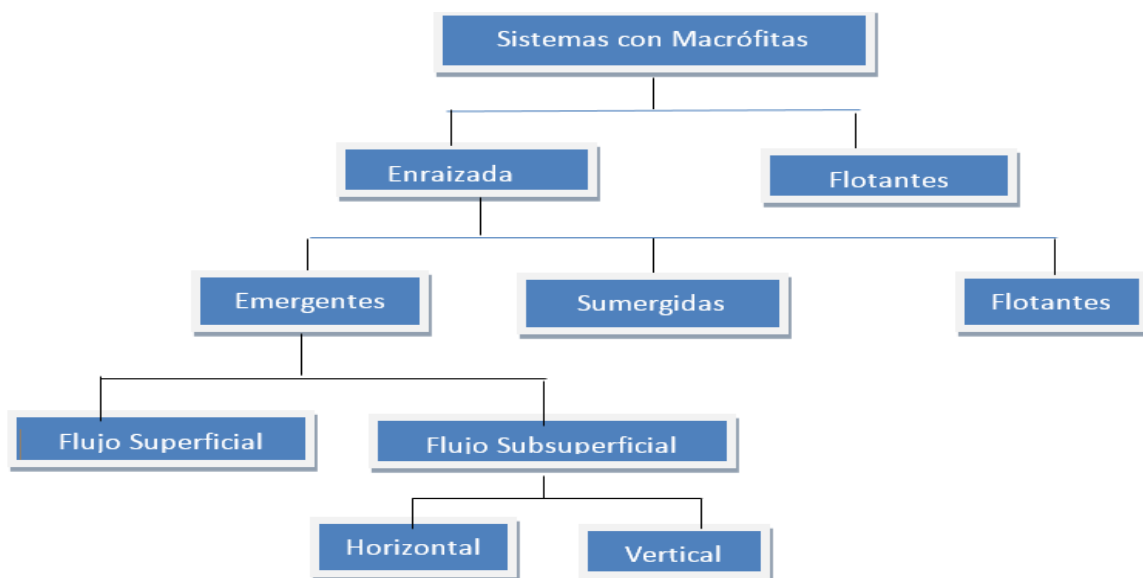


Figura 1. Clasificación de humedales por plantas macrófitas
Fuente: Delgadillo et., al, 2010

2.3.1 Clasificación de humedales según la circulación del agua

De acuerdo con la circulación del agua los humedales se clasifican según se indica en la Figura 2.

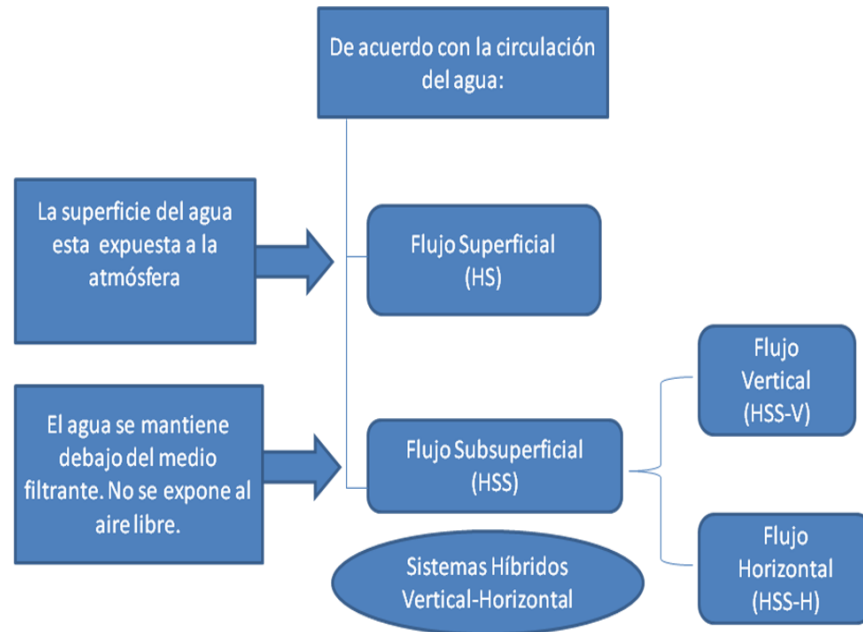


Figura 2. Clasificación de humedales artificiales
Fuente: IWA, 2000; Vymazal, 2005

2.3.2 Humedal artificial de flujo libre (HFS)

Son sistemas en los cuales el agua está expuesta a la atmósfera. Están compuestos de canales de poca profundidad que pueden o no tener recubrimiento de fondo. (Vinueza, 2014). La vegetación en este sistema está parcialmente sumergida en el agua, cuya profundidad varía entre 4 a 18 pulgadas (0.1 a 0.45 m). La vegetación común para los humedales de flujo libre incluyen las éneas, carrizos, juncias y juncos (Zambrano et al., 2009). El agua residual se alimenta en forma continua y el tratamiento se produce durante la circulación del agua a través de los tallos raíces de la vegetación emergente (Ruiz, 2012). En la Figura 3 se observa este tipo de humedal artificial.

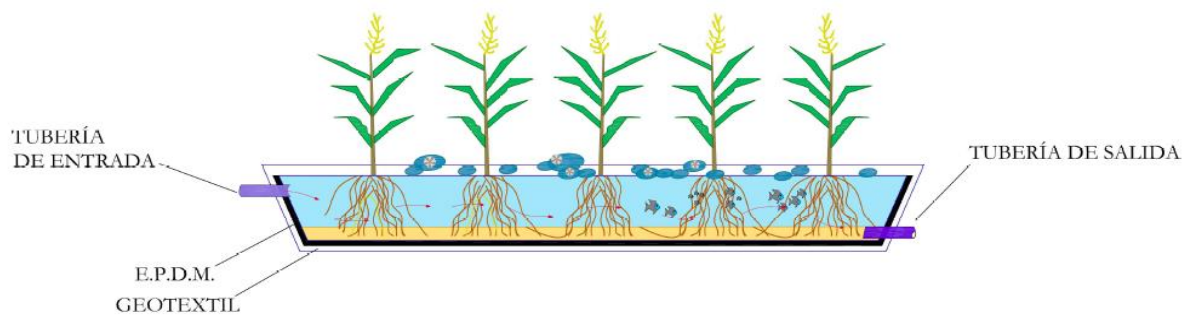


Figura 3. Humedal artificial de flujo libre

2.3.3 Humedal artificial de flujo subsuperficial (HFSS)

Están contruidos en forma de canal, contenido de un sustrato de grava, arena u otro material que soporta el crecimiento de las plantas: la vegetación emergente es la misma que se puede utilizar en el humedal de flujo libre.

El nivel de agua está por debajo de la superficie del soporte como muestra en la Figura 4 y el agua fluye a través del medio que sirve para el crecimiento de la película microbiana, que es la responsable en gran parte del tratamiento que ocurre, las raíces penetran hasta el fondo del lecho (Oznaya, 2012)

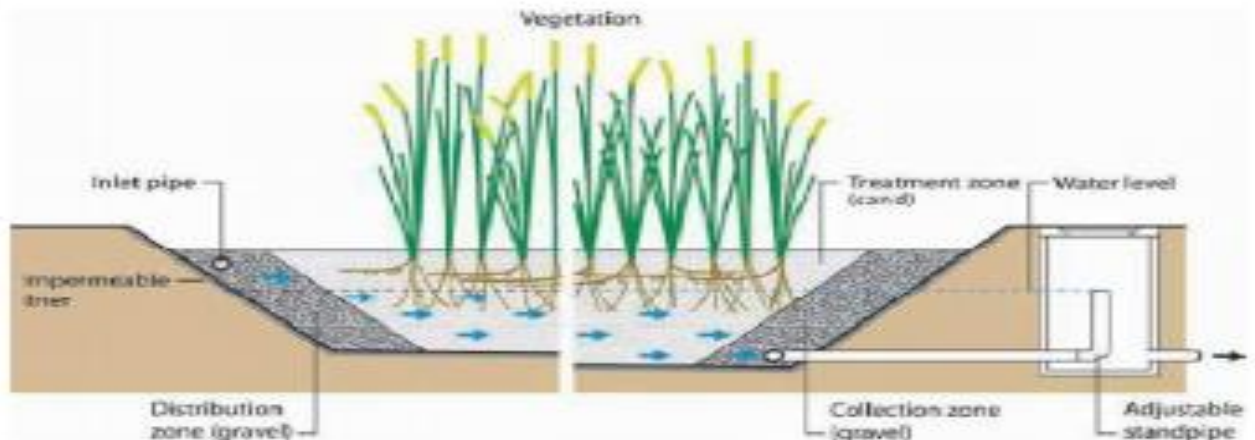


Figura 4. Humedal de flujo superficial con macrófitas sumergidas (CIEMA, 2005)

En la Tabla 7 se observan las ventajas y desventajas de los humedales de flujo libre superficial (HFS) y en la Tabla 8 los humedales de flujo subsuperficial (HFSS).

Tabla 7. Ventajas y desventajas de un sistema de HFS (EPA, 2000)

Ventajas	Desventajas
Minimizan la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo por parte de operadores adiestrados.	Las necesidades de terreno de estos humedales pueden ser grandes, especialmente si se requiere la remoción de nitrógeno o fósforo.
Pueden ser costoso de construir, operar y mantener, que los procesos mecánicos de tratamiento.	El fosforo, los metales y algunos compuestos orgánicos persistentes que son removidos permanecen en el sistema ligados al sedimento y por ello se acumulan con el tiempo.
La operación a nivel de tratamiento secundario es posible durante todo el año con excepción de los climas más fríos, la operación a nivel de tratamiento terciario avanzado es posible durante todo el año en climas cálidos o semiáridos.	En climas fríos las bajas temperaturas durante el invierno reducen la tasa de remoción de DBO y de las reacciones biológicas responsables por la nitrificación y desinfección.
No producen biosólidos ni lodos residuales que requerían tratamiento subsiguiente y disposición.	Los mosquitos y otros insectos vectores de enfermedades pueden ser un problema.
La remoción de DBO, SST, DQO, metales y compuestos orgánicos refractarios de las aguas residuales domésticos puede ser muy efectiva con un tiempo razonable de retención.	

Tabla 8. Ventajas y desventajas de un sistema de HFSS (EPA, 2000)

Ventajas	Desventajas
Proporcionan tratamiento efectivo o en forma pasiva y minimizan la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo por parte de operadores adiestrados.	El fósforo, los metales y algunos compuestos orgánicos persistentes que son removidos permanecen en el sistema ligados al sedimento y por ello se acumulan con el tiempo.
Su construcción, mantenimiento y operación puede ser más económica, que los procesos mecánicos de tratamiento.	Un humedal de flujo subsuperficial es esencialmente anóxica, limitando el potencial de nitrificación rápida del amoníaco.
La configuración de los humedales de flujo subsuperficial proporciona una mayor protección térmica que los humedales de flujo libre.	La mayoría del agua contenida en los humedales de flujo subsuperficial es esencialmente anóxica, limitando el potencial de nitrificación rápida del amoníaco.
No producen biosólidos ni lodos residuales que requerirían tratamiento subsiguiente y disposición.	En climas fríos las bajas temperaturas durante el invierno reducen la tasa de remoción de DBO, NH ₃ y NO ₃ .
La remoción de DBO, SST, DQO, metales y compuestos orgánicos refractarios de las aguas residuales domésticas puede ser muy efectiva con un tiempo razonable de retención. La remoción de nitrógeno y fósforo a bajos niveles puede ser efectiva también con un tiempo de retención mayor.	Los humedales de flujo subsuperficial no pueden ser diseñados para lograr una remoción completa de compuestos orgánicos, SST, nitrógeno o bacterias coliformes. Los ciclos ecológicos en estos humedales producen concentraciones naturales de esos compuestos en el efluente.
Proporcionan tratamiento efectivo o en forma pasiva y minimizan la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo por parte de operadores adiestrados.	El fósforo, los metales y algunos compuestos orgánicos persistentes que son removidos permanecen en el sistema ligados al sedimento y por ello se acumulan con el tiempo.

2.3.4 Humedal de flujo subsuperficial vertical (HFSS-V)

El lecho filtrante está casi totalmente lleno de agua. El efluente se reparte sobre todo el ancho y alto del lecho por la acción de un sistema distribuidor situado a un extremo del humedal y fluye principalmente en sentido horizontal a través del estrato. La evacuación se realiza mediante un drenaje colocado en el extremo opuesto al sistema de llenado, que permite ajustar la altura del agua en el lecho, de tal modo que la película de agua se mantenga aproximadamente a 5 cm por debajo de la superficie del material granular para evitar el flujo superficial que provocaría un cortocircuito en la cadena de tratamiento y puede promover la proliferación de insectos y la generación de malos olores (Sorto et al., 2013). En la Figura 5 se observa el contenido de grava y arena de un humedal de flujo subsuperficial vertical.

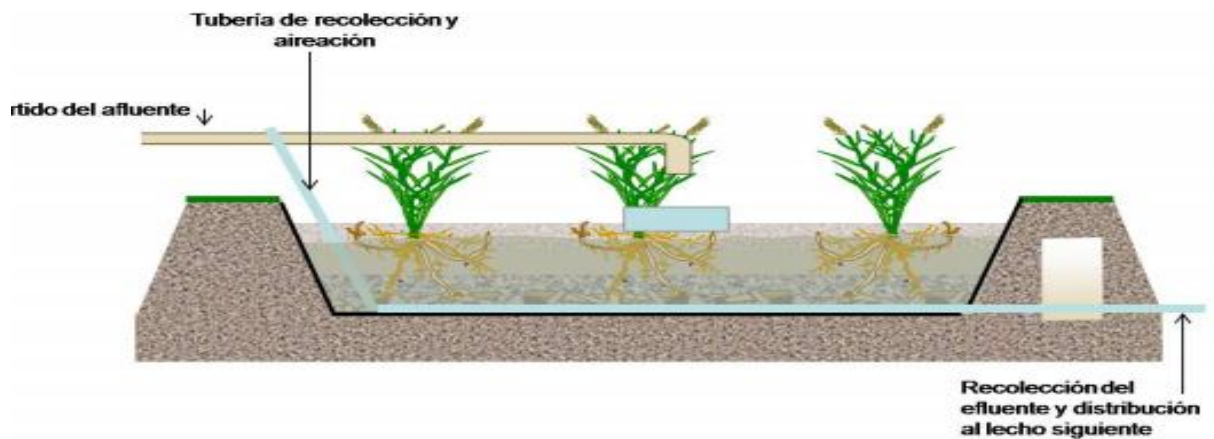


Figura 5. Esquema de un HFSS-V
Fuente: García, 2008

2.3.5 Humedales de flujo subsuperficial horizontal (HFSS-H)

En este sistema el agua circula horizontalmente a través del medio granular y los rizomas y raíces de las plantas. El agua ingresa al sistema por la parte superior de un extremo y es recogida por un tubo de drenaje en la parte inferior opuesta, la profundidad del agua es de entre 0.3 m y 0.9 m. Se caracterizan por funcionar permanentemente inundados (el agua se encuentra entre 0.05 m y 0.1 m por debajo de la superficie) (García y Corzo, 2008). En la Figura 6 se observa este tipo de humedal.



Figura 6. Esquema HFSS-H
Fuente: <http://depuranatura.blogspot.com.es>

Se dieron a conocer las características de los diseños de los humedales para analizar las diferencias entre ellos para la toma de decisiones, éstas, se pueden observar en la Tabla 9 donde se especifica las ventajas y las desventajas de los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal y vertical.

Tabla 9. Ventajas y desventajas de HFSS-V y HFSS-H

HFSS-V	
Ventajas	<p>1.- Mayor capacidad de tratamiento que los horizontales. (entre 20 y 40 g de DBO/m²/d)</p> <p>2.- Las aguas se distribuyen de manera uniforme e intermitente sobre la superficie del lecho filtrante y luego percolan hacia la zona de recolección (Martínez et al., 2010)</p> <p>3.- Las aguas residuales son dosificadas por 2 días y luego las celdas se mantienen secas de 4 a 8 días</p> <p>4.- Restauran las condiciones aerobias durante el período seco. Esto permite que la remoción de la DBO₅ y del nitrógeno amoniacal se realice a mayor velocidad que la que se presenta en los sistemas HFSS-H, pues al estar estos últimos constantemente inundados las condiciones son más bien anaerobias</p> <p>5.- El lecho de grava ofrece al humedal una mayor tasa de reacción que permite conseguir los mismos rendimientos con un área menor</p> <p>6.- No existen olores ni mosquitos</p> <p>7.- Esta capa presta mayor protección térmica evitando así problemas de congelación en climas fríos</p> <p>8.- Requieren de menor superficie para tratar una determinada carga orgánica</p>
Desventajas	<p>1.- Son más susceptibles a la colmatación. (García y Corzo, 2008)</p> <p>2.- Producen efluentes más oxigenados y sin malos olores (Osnaya, 2012)</p>
HFSS-H	
Ventajas	<p>1.- Las aguas residuales fluyen lentamente en una trayectoria horizontal a través del lecho filtrante, hasta la superficie de recolección del efluente.</p> <p>2.- Son sistemas eficientes en la remoción de DBO y SST</p>
Desventajas	<p>1.- Menor capacidad de tratamiento que los verticales.</p> <p>2.- No son eficientes en la remoción de nutrientes.</p> <p>3.- Baja conductividad hidráulica, tiempos de retención reducidos (Pérez, 2003)</p>

2.4 Parámetros teóricos para el diseño de los humedales tipo HAFSS-H

Para diseñar teóricamente un humedal artificial de flujo subsuperficial-horizontal (HAFSS-H), es necesario considerar el flujo de agua de alimentación, la temperatura promedio de invierno, la DBO de alimentación y la deseada (EPA, 1993).

La porosidad del sustrato se selecciona de la Tabla 10, esta variable es definida como la proporción del volumen no sólido al volumen total de la materia, sin dimensión. En esta tabla se presentan los valores típicos de sustratos de humedales construidos.

Tabla 10. Valores típicos de sustratos de humedales construidos (Crites and Tchobanoglous 1998)

Sustrato	Tamaño efectivo d10*, mm	Porosidad
Arena (media)	1	0.30
Arena gruesa)	2	0.32
Arena con grava	8	0.35
Grava (media)	32	0.40
Grava (gruesa)	28	0.45

*d10: Diámetro de una partícula en una distribución del peso de las partículas que es más pequeña que todo salvo 10 % de las partículas

2.4.1 Recomendaciones para el tamaño del sustrato

El sustrato es el medio donde crecen las plantas. Para el diseño se recomienda grava con menos de 30 mm (3/4") de diámetro que parece ser la que funciona mejor. Si se utiliza grava con diámetros muy grandes como sustrato, origina que se incremente la velocidad del agua, provocando un flujo turbulento y que en consecuencia; no se cumpla la ley de Darcy para el diseño. Si se utiliza grava con diámetro muy pequeño, puede reducirse la velocidad del agua, originando zonas con presencia de agua en la superficie y flujos preferenciales, pero tienen la ventaja de proporcionar una mayor área superficial para la actividad microbiana y la adsorción. (Delgadillo, 2010)

2.5 Caracterización física del agua

Los parámetros físicos dan una idea aproximada de la calidad del agua, entre los parámetros físicos medibles, los principales son: la temperatura, los olores, la conductividad eléctrica (CE) y la turbidez.

Temperatura

La temperatura es el grado de calor o frío presente en un cuerpo, este parámetro es importante en el tratamiento de aguas ya que muchos procesos biológicos dependen de la temperatura. Asimismo, es determinante para el desarrollo de la actividad bacteriana, cuyo rango óptimo se encuentra entre 25 °C a 35 °C. Cuando la temperatura se acerca a los 50 °C los procesos de digestión aerobia y nitrificación bacteriana se detienen; por otro lado, cuando la temperatura es menor a 5 °C la actividad microbiana se inhibe, la temperatura se determina en el lugar de muestreo mediante termómetros.

Turbidez

Se define, como una medida de la pérdida de su transparencia, ocasionada por el material articulado o en suspensión que arrastra la corriente de agua (Delgadillo et al., 2010). Este material puede consistir en arcillas, limos, algas, etcétera, que se mantienen en suspensión debido a la fuerza de arrastre de la corriente o a su naturaleza coloidal (Delgadillo et al., 2010), indica que el material coloidal impide la transmisión de la luz, ya que la absorbe o dispersa.

Conductividad eléctrica (CE)

Se define a la CE como la medida de la capacidad del agua para conducir la electricidad. La corriente eléctrica es transportada por iones en solución, por lo tanto el aumento de la concentración de iones provoca un aumento en la conductividad. (Delgadillo et al., 2010) El valor de la CE es usado como un parámetro sustituto de la concentración de SDT. La CE se expresa en micromhos por centímetro ($\mu\text{mho/cm}$) o como decisiemens por metro (dS/m). La determinación *in situ* se realiza mediante un instrumento llamado conductímetro, el cual consta de un electrodo y un medidor digital. El electrodo se introduce en el agua a analizar y por lectura directa se determina la conductividad.

Sólidos totales

Los sólidos totales (ST) son los residuos que permanecen después de someter al agua a una temperatura entre 103 °C y 105 °C hasta que se evapore (Cámara *et al.*, 2003). (Delgadillo, et al., 2010) clasifica a los ST en sólidos suspendidos y sólidos filtrables. La fracción de sólidos que quedaría retenida por un filtro de membrana con un tamaño de poro de 1.2 micras, constituye los denominados “sólidos suspendidos”, y el resto los “sólidos disueltos o filtrables”.

2.6 Caracterización química del agua

Las propiedades químicas del agua tienen gran importancia debido a que interactúan con las del suelo, variando el valor de cada uno de los parámetros de los componentes del agua. (Delgadillo et al., 2010)

pH

El pH indica la concentración de iones hidrógeno en una disolución. Se utiliza como medida de la naturaleza ácida o alcalina de una solución acuosa.

Muchas propiedades de las sustancias químicas dependen de la concentración del ion hidrógeno en solución (pH). En las aguas residuales urbanas, el pH se encuentra entre 6.5 y 8.5. Valores elevados (mayores a 9.2) tienen efectos inhibidores del crecimiento de *E. coli*. Cuando los valores están comprendidos entre 5 y 9 (situándose los más favorables entre 6.5 y 8.5) la vida de especies acuáticas es favorecida.

En un vertido con pH ácido, se disuelven los metales pesados; a su vez, el pH alcalino ocasiona que los metales precipiten (Delgadillo et al., 2010). Los valores aproximados para clasificar esta propiedad en el agua residual, se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Clasificación de pH en agua

Ácido	pH	Alcalino	pH
Fuerte	0 a 4.3	Fuerte	8.2 a 14
Medio	4.3 a 7	Medio	7.0 a 8.2
Neutro	7.0	Neutro	7.0

Fuente: (Delgadillo et al., 2010)

Compuestos inorgánicos

Los compuestos inorgánicos incluyen nutrientes, metales pesados y gases. Los gases normalmente no son considerados en los análisis de aguas residuales debido a que la toma de muestras y la posterior determinación son procesos complicados y de alto costo. Los nutrientes son elementos químicos necesarios para el normal desarrollo de la vida. Son requeridos por los organismos como precursores o constituyentes del material celular, por ello son imprescindibles en las estaciones depuradoras de aguas residuales que van a ser sometidas a tratamiento biológico. (Delgadillo et al., 2010)

Demanda Biologica de Oxígeno a los 5 días (DBO₅)

Este parámetro se aplica a las aguas residuales y en menor medida a las aguas superficiales (Queralt, 2003). Es la cantidad de oxígeno consumido (durante 5 días en oscuridad y a una temperatura de 20 °C), para oxidar la materia orgánica presente en el agua por medio de procesos aerobios (biodegradación)

Demanda química de oxígeno (DQO)

La DQO es la cantidad de materia orgánica e inorgánica que hay en el agua y es susceptible de ser oxidada por un oxidante fuerte. En realidad no es más que las necesidades de oxígeno al margen de todo proceso biológico.

La medida de la DQO nos indica la cantidad de materias oxidables presentes en el agua residual, de origen orgánico y mineral para descomponer químicamente, la materia orgánica degradable y biodegradable en un periodo de tres horas.

El análisis de este parámetro se aplica tanto a aguas superficiales como residuales este proceso oxida todos los compuestos orgánicos en gas carbónico (CO₂) y agua (H₂O). La ventaja de las mediciones de DQO es que los resultados se obtienen rápidamente (cerca de dos horas), pero no ofrecen información de la proporción del agua residual que puede ser oxidada por las bacterias ni de la velocidad del proceso de la oxidación de la materia orgánica. Este parámetro siempre es mayor que la DBO₅ y se expresa en mg/L.

2.7 Caracterización microbiológica del agua

El agua puede transmitir enfermedades entéricas (intestinales) debido al contacto con desechos humanos o animales. La fuente principal de patógenos entéricos son los excrementos y otros desechos eliminados por humanos enfermos y/o animales huéspedes. Los coliformes son bacterias que se clasifican en dos grupos:

Coliformes totales (CT). Son bacterias aerobias y anaerobias facultativas no esporulados. La capacidad de reproducción de estos bacilos, fuera de los intestinos de los animales homeotérmicos (de sangre caliente), es favorecida por las condiciones adecuadas de temperatura, materia orgánica, pH, y humedad. También se pueden reproducir en las biopelículas que se forman en las tuberías de distribución de agua potable.

Coliformes fecales (CF). Constituyen un subgrupo de los CT, son de tipo bastoncitos de 0.0002 - 0.0003 mm por 0.002 a 0.003 mm, son aerobios/anaerobios facultativos no esporulados. Se diferencian de los coliformes totales por ser tolerantes a temperaturas elevadas (creciendo a 44.5 °C), lo que les permite estar mejor adaptados a la vida al interior del animal. Del total de coliformes fecales presentes en las heces humanas, entre el 90 % y el 100 % corresponden a *Escherichia Coli* (E. coli)

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

3.1 Revisión bibliográfica

Se realizó una revisión bibliográfica acerca de las diferentes plantas macrófitas y de los diferentes tipos de humedales más utilizados en el mundo, para este estudio se decidió trabajar con plantas macrófitas Tule (*Typha Domingensis*) y Junco (*Typha latifolia*). El tipo de humedal seleccionado fue el humedal artificial de flujo subsuperficial-horizontal (HAFSS-H)

3.2 Ubicación del sitio para la recolección de plantas macrófitas

Se realizó un reconocimiento del área en las diferentes zonas riparias, en donde se localizaron las plantas macrófitas ante mencionadas, en la ciudad de Mexicali, Baja California, fijando las coordenadas de los sitios geográficos.

3.3 Análisis de parámetros físicos, químicos y bacteriológicos de agua gris de lavadora y del influente y efluente del humedal

Se realizaron análisis físicos, químicos y bacteriológicos para caracterizar el agua gris de lavadora y evaluar la eficiencia de depuración en el HAFSS-H, siguiendo las técnicas establecidas en las Normas Mexicanas. En la Tabla 12, se muestran los parámetros analizados.

Tabla 12. Parámetros físicos, químicos y bacteriológicos de agua gris de lavadora en HAFSS-H

Parámetros	Método	Normas Mexicanas
CE	Electrométrico	NMX-AA-093-SCFI-2000
pH	Electrométrico	NMX-AA-008-SCFI-2011
NTK	Kjeldahl	NMX-AA-026-SCFI-2010
DBO ₅	Método de prueba	NMX-AA-028-SCFI-2001
DQO	Reflujo cerrado/Espectrofotométrico	NMX-AA-030-SCFI/2-2011
SST	Gravimétrico	NMX-AA-034-SCFI-2001
Coliformes fecales	Tubos múltiples, número más probable [NMP/100mL]	NMX-AA-42-1987

3.4 Caracterización de agua gris de lavadora

Para caracterizar el agua gris de lavadora se tomaron 30 muestras compuestas de 8 hogares, a las cuales se les realizaron pruebas físicas, químicas y bacteriológicas.

3.5 Diseño experimental para obtener las variables significativas en la generación de agua de lavado de ropa utilizando el método Taguchi

Esta metodología busca reducir la variación de un proceso a través de la robustez de un diseño de experimentos, que considera todas las variables involucradas que puedan producir variación en un proceso y que permiten reducir el número de experimentos en campo (Taguchi et al., 1989).

El método es funcional cuando se maneja un número no muy grande de factores, cuando las interacciones entre ellos no representan un número alto. Esta metodología ayuda a realizar relativamente menos corridas de prueba que los arreglos convencionales ahorrando tiempo y recursos materiales y humanos, especialmente en los primeros experimentos.

3.6 Condiciones que se definieron de lavado de ropa para la obtención del agua gris

Las condiciones de lavado establecidas, se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Condiciones de lavado por etapas

Condiciones	Experimento 1, 2, 3, 4, 5
Capacidad de lavadora	Carga completa
Cantidad de jabón líquido	100 mL
Cantidad de suavizante de telas	100 mL
Peso de ropa	10 kg
Color de ropa	Negra

3.7 Diseño y construcción del HAFSS-H

Se diseñó y construyó un humedal artificial de flujo subsuperficial-horizontal (HAFSS-H), siguiendo los criterios del manual de la (EPA, 1993). Estableciendo los parámetros de diseño para el HAFSS-H, este tipo de humedales son los más utilizados en el mundo porque cuenta con las mejores ventajas de construcción y mantenimiento.

3.8 Evaluación en el HAFSS-H

Para evaluar el HAFSS-H, se realizó un plan de muestreo para los 2 experimentos de evaluación del HAFSS-H, realizando análisis físicos, químicos y bacteriológicos, se tomaban muestras de influente y efluente de agua gris de lavadora en el HAFSS-H para analizar la DBO₅, pH, CE, SST, NTK, DQO y con un flujo de agua gris de lavadora de 36 L/día.

CAPÍTULO 4

DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1 Diseño del HAFSS-H

Se seleccionó el HAFSS-H, por contar con las características y ventajas necesarias para la construcción y diseño de este proyecto.

Se diseñó el tamaño del HAFSS-H, con base en los criterios recomendados en el manual de la (EPA, 1993) tomando en cuenta:

1. - La temperatura mínima en invierno, en Mexicali, Baja California, con una temperatura promedio de 12 °C.
2. - La cantidad de DBO de alimentación de agua gris de lavadora y el nivel de DBO deseado para el efluente del sistema.
3. - Flujo de agua de 240 L/semana.
4. - Profundidad del humedal de 50 cm.

4.1.1 Proporción de la constante de temperatura

Se calculó la proporción de la constante de temperatura k_T (día⁻¹) utilizando la:

$$K_T = K_{20} [1.06^{(T-20)}] \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

K_T = Constante de velocidad de reacción de degradación de la DBO [d⁻¹]

K_{20} = Constante de velocidad de reacción a 20 °C

Para calcular la proporción de la constante de temperatura se tomó como base una $K_{20} = 1.104$ recomendado en el manual de la (EPA, 1993) y una temperatura media (T) en invierno de Mexicali Baja California de 12 °C. Sustituyendo datos en la ecuación 1 queda la siguiente expresión:

$$K_T = 1.104 * (1.06^{(12-20)})$$

De donde se obtuvo un valor de $K_T = 0.6926$

4.1.2 DBO de agua gris de lavadora

Para determinar el tiempo de retención fue necesario conocer la DBO del agua gris de alimentación del humedal. Este dato sirvió como base para determinar los parámetros teóricos del contenedor. Se realizaron análisis preliminares de DBO por 9 días conforme a los criterios de decisión mencionados en el Capítulo 3.

En la Figura 7 se muestra el material utilizado para en la prueba de DBO₅ y en la Figura 8 se observan los resultados obtenidos.



Figura 7. Material utilizado en análisis de DBO₅

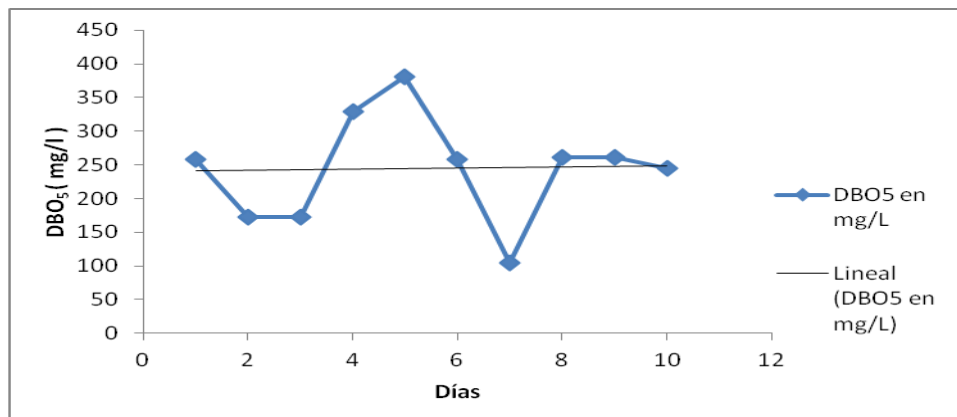


Figura 8. Resultados de análisis de DBO₅

En la Tabla 14 se muestran los valores obtenidos del análisis de DBO₅, el límites inferior de fue de 100 mg/L y el límite superior fue de 381 mg/L con un promedio de DBO de 244.8 mg/L. Este valor se utilizó en el cálculo de diseño para la construcción del HAFSS-H.

Tabla 14. Resultados obtenidos de DBO₅ en agua gris de lavadora

Días	DBO ₅ (mg/L)
1	259
2	173
3	173
4	330
5	381
6	259
7	104
8	262
9	262
Promedio	244.8

4.1.3 Tiempo de retención

Para determinar el tiempo de retención Tr (día), para alcanzar el nivel de 245 mg/L de DBO₅, se utilizó la ecuación 2:

$$Tr = \frac{-\ln(C/C_0)}{K_T} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

Tr = Tiempo de retención hidráulico [d]

C = DBO₅ de efluente = 245 mg/L

C₀ = DBO₅ de influente = 20 mg/L

K_T = Constante de velocidad de reacción de degradación de la DBO [d⁻¹] = 0.6926

De donde se obtuvo un valor de Tr = 3.61 d

4.2.1 Área superficial

El área del humedal se calculó con por la ecuación 3:

$$A = L W \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

A = Área del humedal

L = Largo del humedal = 1.90 m

W = Ancho del humedal = 0.88 m

Se obtuvo un valor de A = 1.672 m²

4.2.2 Volumen del HAFSS-H

El volumen del humedal se calculó con la ecuación 4:

$$V_{\text{HAFSS-H}} = A d \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

$V_{\text{HAFSS-H}}$ = Volumen del humedal

A = Área de humedal = 1.672 m²

d = Profundidad del humedal = 0.5 m

Se obtuvo el valor de $V_{\text{HAFSS-H}} = 0.836 \text{ m}^3$

4.2.3 Volumen de arena

El volumen de arena se calculó por con la ecuación 5:

$$V_A = L_A W E \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

V_A = Volumen de arena [m³]

L_A = Longitud de arena = 1.74 m

W = Ancho del humedal = 0.88 m

E = Espesor de arena = 0.05 m

De donde se obtuvo un valor de $V_A = 0.07656 \text{ m}^3$

En la Figura 9 se muestra una vista de la capa de arena.



Figura 9. Vista de la capa de arena

4.2.4 Volumen de grava gruesa en los extremos

El volumen de grava gruesa se calculó con la ecuación 6 para la sección de las mamparas como se muestra en la Figura 10:

$$V_{Gg} = L_{Gg} W 2E_{Gg} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

V_{Gg} = Volumen de grava gruesa [m^3]

L_{Gg} = Longitud de grava gruesa = 0.88 m

W = Ancho de célula de humedal = 0.50 m

E_{Gg} = Espesor de grava gruesa = 0.08 m

Se obtuvo un valor de $V_{Gg} = 0.0704 m^3$



Figura 10. Vista de la capa de grava gruesa en mamparas

4.2.5 Volumen de grava fina

El volumen de grava fina se calculó, con la ecuación 7:

$$V_{Gf} = L_A W L_{gf} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

V_{Gf} = Volumen de grava fina [m^3]

L_A = Longitud de arena = 1.64 m

W = Ancho de célula de humedal = 0.88 m

L_{gf} = Longitud de grava fina = 0.40 m

Se obtuvo el valor de $V_{Gf} = 0.58 m^3$

En la Figura 11. Se observan los parámetros de diseño.

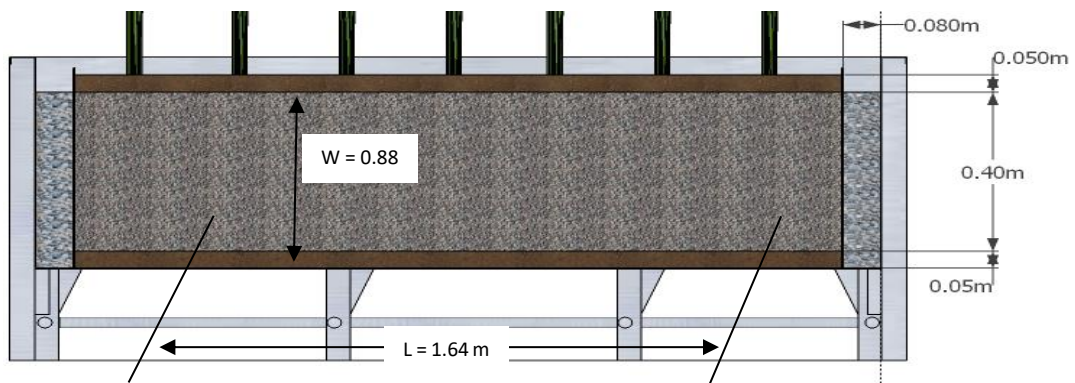


Figura 11. Parámetros de cálculo para el volumen de grava fina

4.2.6 Volumen total del substrato

Con la ecuación 8 se calculó el volumen total del substrato:

$$V_{TS} = V_{gf} + V_{Gg} + V_A \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde

V_{TS} = Volumen total del substrato [m^3]

V_{gf} = Volumen de grava fina = $0.58 m^3$

V_{Gg} = Volumen de grava gruesa = $0.0704 m^3$

V_A = Volumen de arena = $0.07656 m^3$

Obteniéndose un valor de $V_{TS} = 0.727 m^3$

4.2.7 Volumen libre de HAFSS-H

El volumen libre del HAFSS-H se calculó por la ecuación 9:

$$V_{LHAFSS-H} = V_{HAFSS-H} - V_{TS} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

$V_{LHAFSS-H}$ = Volumen libre de humedal artificial de flujo subsuperficial-horizontal [m^3]

$V_{HAFSS-H}$ = Volumen de humedal artificial de flujo subsuperficial-horizontal = $0.836 m^3$

V_{TS} = Volumen total del substrato = $0.727 m^3$

Obteniéndose un valor de $V_{LHAFSS-H} = 0.109 m^3$

4.2.8 Cálculo del caudal para HAFSS-H

Para el cálculo del caudal se utilizó la ecuación 10:

$$Q = V_{LHAFSS-H} / Tr \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

Q = Flujo de entrada [m^3/d]

$V_{LHAFSS-H}$ = Volumen libre de humedal artificial de flujo subsuperficial-horizontal = $0.109 m^3$

Tr = Tiempo de retención [d]

Se obtuvo un valor de $Q = 0.030 m^3/d$

4.2.9 Tasa de carga orgánica

La Tabla 10 indica los valores típicos de sustratos de humedales construidos. Para calcular la tasa de carga orgánica, L_{org} [g de DBO/m²d], se realizó por la ecuación 11:

$$L_{org} = \frac{(C) (dw) (\eta)}{t} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

L_{org} = Tasa de carga orgánica [g/m²d]

C = Carga orgánica = 244.78 g/m³

dw = Profundidad del sustrato = 0.5 m

η = porosidad del sustrato = 0.35

t = tiempo [d]

Se obtuvo el valor de $L_{org} = 11.86$ g/m²d

En la Figura 12 se observa el sustrato, arena, grava y composta.

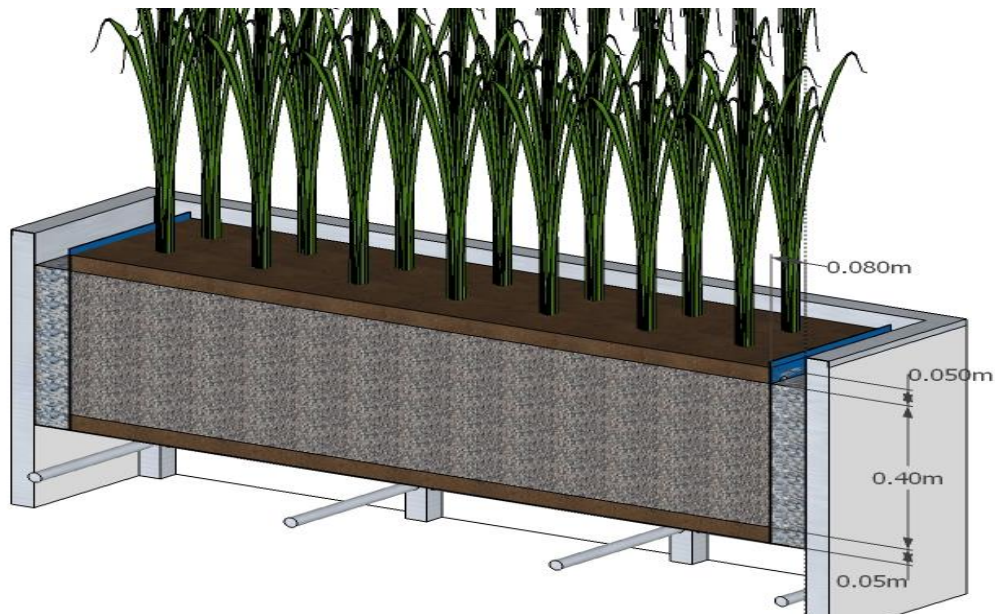


Figura 12. Sustrato arena, grava y composta

4.2.10 Cálculo de cantidad de plantas para el HAFSS-H

Se calculó el número de plantas con la ecuación 12, que considera el área interna del humedal (ver Figura 13) y las distancias estimadas entre las plantas a lo largo y ancho del humedal.

$$N_p = A_{ih} / [(d_{ah})(d_{lh})]$$

Ecuación 12

Donde:

N_p = Número de plantas

A_{ih} = Área interna del humedal = (1.74 m) (0.72 m) = 1.2528 m²

d_{ah} = Distancia de separación entre plantas en el ancho del humedal = 0.15 m

d_{lh} = Distancia de separación entre plantas en el largo del humedal = 0.20 m

Se obtuvo un valor de $N_p = 42$ plantas

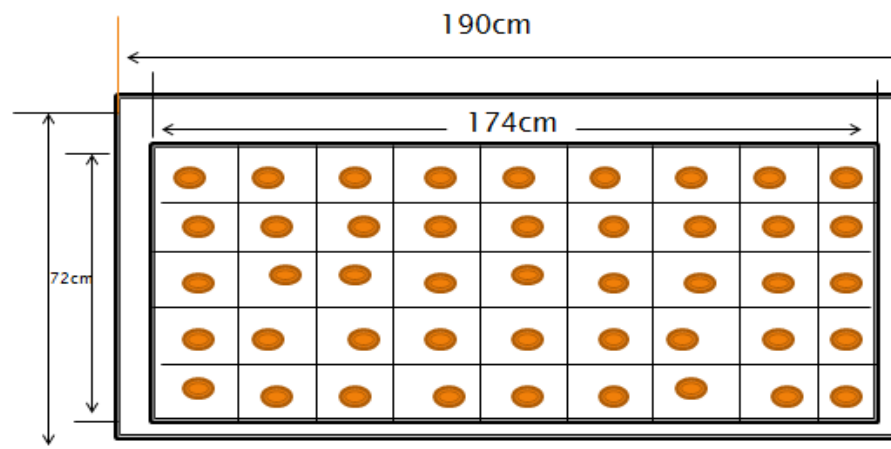


Figura 13. Cantidad de plantas en HAFSS-H

En la Tabla 15 se muestran los parámetros de diseño recomendadas para la construcción de la célula del HAFSS-H.

Tabla 15. Parámetros de diseño de construcción de humedal

Ecuaciones		Parámetros	Valores estimados
1	$K_r = K_{20} (1.06^{(t-20)})$	K_r = Constante de velocidad de reacción de degradación de la DBO [d^{-1}] K_{20} = Constante de velocidad de reacción a 20 °C	0.6926 d^{-1}
2	$Tr = \frac{\ln(C_0/C)}{K_r}$	Tr = Tiempo de retención hidráulico [d] C_0 = DBO ₅ de influente [mg/L] C = DBO ₅ de efluente [mg/L] K_r = Constante de velocidad de reacción de degradación de la DBO [d^{-1}]	3.61 d
3	$A = L W$	A = Área del humedal [m^2] L = Largo del humedal [m] W = Ancho del humedal [m]	1.672 m^2
4	$V_{HAFSS-H} = A d$	$V_{HAFSS-H}$ = Volumen del humedal [m^3] A = Área de humedal [m^2] d = Profundidad del humedal [m]	0.836 m^3
5	$V_A = L_A W E$	V_A = Volumen de arena [m^3] L_A = Longitud de arena [m] E = Espesor de arena [m]	0.077 m^3
6	$V_{Gg} = L_{Gg} W 2E_{Gg}$	V_{Gg} = Volumen de grava gruesa [m^3] L_{Gg} = Longitud de grava gruesa [m] W = Ancho de célula de humedal [m] E_{Gg} = Espesor de grava gruesa [m]	0.070 m^3
7	$V_{Gf} = L_A W L_{Gf}$	V_{Gf} = Volumen de grava fina [m^3] L_{Gf} = Longitud de grava fina [m]	0.58 m^3
8	$V_{ts} = V_{Gf} + V_{Gg} + V_A$	V_{ts} = Volumen total del sustrato [m^3]	0.727 m^3
9	$V_{LHAFSS-H} = V_{HAFSS-H} - V_{ts}$	$V_{LHAFSS-H}$ = Volumen libre en el HAFSS-H	0.109 m^3
10	$Q = V_{LHAFSS-H} / Tr$	Q = Flujo de entrada [m^3/d]	0.030 m^3/d
11	$L_{org} = \frac{(C_0)(dw)(\eta)}{Tr}$	L_{org} = Tasa de carga orgánica [g/m^2d] dw = Profundidad del sustrato [m] η = porosidad del sustrato = 0.35	10.68 g/m^2d
12	$N_p = A_{ih} / [(d_{ah})(d_{lh})]$	N_p = Número de plantas A_{ih} = Área interna del humedal [m^2] d_{ah} = Distancia de separación entre plantas en el ancho del humedal [m] d_{lh} = Distancia de separación entre plantas en el largo del humedal [m]	42 plantas

4.3 Selección de plantas

Se seleccionaron las plantas macrófitas tule (*Typha latifolia* L.) y Junco (*Typha domingensis*), mostradas en las Figuras 14 y 15. Se visitaron varios lugares en las zonas riparias de la ciudad de Mexicali, Baja California, seleccionando el canal de riego ubicado en las coordenadas 32°38'9.67"N 115°16'54.99"O.



Figura 14. Tule (*Typha latifolia* L.)



Figura 15. Junco (*Typha domingensis*)

4.3.1 Procedimiento para la recolección, extracción y transportación de plantas macrófitas

En la Tabla 16 se observa el procedimiento para la extracción de las plantas macrófitas y la Figura 16 muestra el material que se utilizó. Para la recolección de las plantas, se seleccionaron las de etapa en desarrollo intermedio que se localizaron en los márgenes de la zona riparia. Las plantas se extrajeron con la raíz y parte del suelo, cubriéndolas con papel vitafilm de un espesor de 2 mm almacenándolas en recipientes de plástico.

Se transportaron con mucho cuidado para evitar daños al tallo, a la raíz y al mismo envase. La descarga se realizó en el Instituto de Ingeniería en las afueras del Laboratorio de Química Ambiental en un lugar plano, procurando emular las condiciones naturales, evitando movimientos bruscos que pudieran originar pérdida de tierra, tomando el envase por las orillas, nunca del tallo de la planta. El tiempo que transcurrió entre la extracción de la planta y su plantación fue de 3 horas. Estas recomendaciones se tomaron del manual de prácticas de reforestación según la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2010)

Tabla 16. Procedimiento para la extracción de plantas macrófitas

Procedimiento	Recomendaciones	Materiales
Estudio de Campo	<ol style="list-style-type: none"> 1.- Análisis del terreno 2.- Análisis del medio ambiente 3.- Clima 4.- Medidas de seguridad 	<ol style="list-style-type: none"> 1.- Vehículo de transporte 2.- Botiquín de primeros auxilios 3.- Agua 4.- Bloqueador 5.- Sombrero
Recolección de plantas	<ol style="list-style-type: none"> 1.- Plantas en etapa intermedio 2.- Extracción de plantas con raíces 3.- Reforzar raíz con papel vitafilm 	<ol style="list-style-type: none"> 6.- Cubre bocas 7.- Bata de laboratorio 8.- Guantes 9.- Baldes 10.- Papel vitafilm 11.- Pala
Transporte	<ol style="list-style-type: none"> 1.- Acomodar las plantas de tal manera que no se dañen 2.- Velocidad moderada 	<ol style="list-style-type: none"> 12.- Vehículo de transporte
Almacén de plantas	<ol style="list-style-type: none"> 1.- Tomar el envase de la planta, nunca por el tallo 2.- Depositar la planta en un lugar con sombra 3.- Alimentarlas con agua mientras no se siembran 4.- Replantar en un tiempo no mayor a 5 días 	<ol style="list-style-type: none"> 13.- Guantes 14.- Cubre bocas



Figura 16. Materiales utilizados en campo

4.4 Construcción del HAFSS-H

En la Figura 17 se muestra el proceso de construcción del HAFSS-H, respetando los parámetros de diseño calculados, las plantas se sembraron con 10 cm de profundidad tomando en cuenta la distancia entre cada una de las plantas.



Figura 17. Procedimiento de construcción del HAFSS-H

4.5 Tren de tratamiento de agua gris de lavadora al HAFSS-H

Se construyó el tren de tratamiento que consiste en un contenedor de plástico llamado tanque sedimentador, con una capacidad de 250 galones, su función fue mezclar y sedimentar los sólidos más pesados del agua gris de lavadora, con una bomba submarina se transportaba el agua a un tanque de alimentación de agua gris con una capacidad de 300 galones y esta se transportaba al HAFSS-H también conocido como reactor biológico, pasando por último al depósito de agua tratada. Como se muestra en la Figura 18.

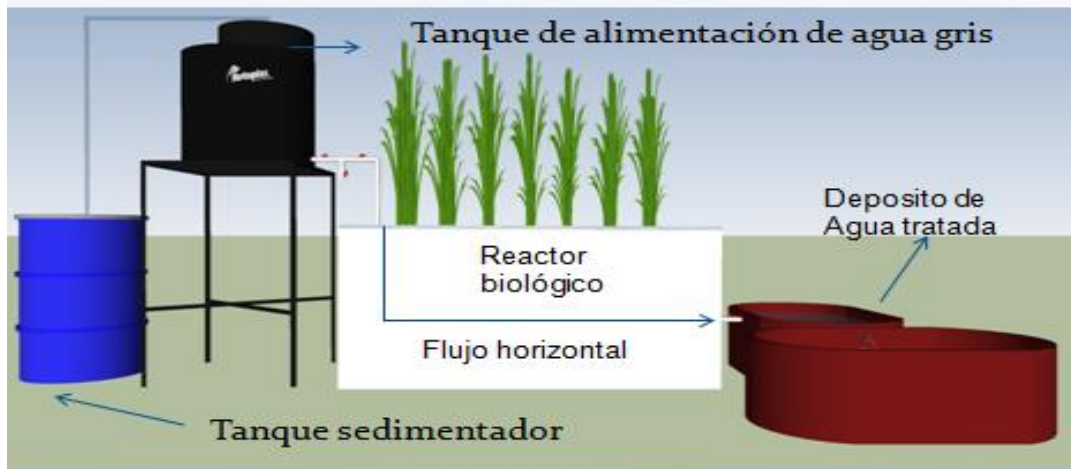


Figura 18. Tren de tratamientos del HAFSS-H

4.5.1 Toma de muestras para caracterización de agua gris de lavadora

Se tomaron muestras de 8 hogares por 30 días. Iniciando la recolección de agua gris de lavadora antes de las 10 de la mañana. Previamente se dieron las condiciones de lavado a las amas de casa, proporcionándoles una etiqueta con las instrucciones de lavado, donde se indicaron las cantidades de detergente líquido, suavizante de telas para el enjuague, no se permitía el uso de cloro y carga de ropa debería ser completa. Para los análisis bacteriológicos, se recolectaron las muestras de agua gris en bolsas estériles y se depositaron en hieleras para su transportación a 4°C al Instituto de Ingeniería, tal como lo establece en la norma mexicana NMX-AA-42-1987 que indica los límites máximos permisibles de CF. Para los análisis físicos y químicos, se recolectaron las muestras de agua de lavado y enjuague de ropa en recipientes de plástico con capacidad de 1 litro y se mezclaron en partes iguales en el laboratorio, en la Figura 19 se observan algunas muestras en el laboratorio.



Figura 19. Muestras de agua gris

4.6 Diseño experimental

La Tabla 17, muestra las condiciones establecidas de los experimentos realizados, la estación del año, el modo de operación, flujos y el tiempo de monitoreo HAFSS-H.

Tabla 17. Condiciones operacionales para las corridas experimentales

Experimento (Estación del año)	Modo de operación	Volumen de agua gris de alimentación	DQO en influente (mg/L)	Flujo de efluente (L/d)	Tiempo de monitoreo días [d]
Primer (Primavera)	Continuo	34 L/d	373 - 471	34	25
Segundo (Verano)	Continuo	34 L/d	340 - 516	34	30

4.6.1 Diseño experimental por el método de Taguchi

Para determinar y conocer los aspectos significativos del proyecto, se estableció un diseño de experimentos por el método Taguchi, el cual inició considerando factores y condiciones de lavado como se indica en la Tabla 18.

Tabla 18. Condiciones de lavado por el método de Taguchi

Factores	Condición 1	Condición 2
A: Jabón	100 mL	150 mL
B: Carga de ropa	10 kg	5 kg
C: Agua	120 L	60 L
D: Suavizante	100 L	150 L
AC: Jabón con agua	Interacción	-
AD: Jabón con suavizante	Interacción	-

4.6.2 Diseños ortogonales por el método Taguchi

Para establecer las condiciones de alimentación de agua gris de lavadora para el HAFSS-H, se tomó como base experimental la metodología Taguchi, la cual consistió en realizar arreglos ortogonales que permitieron realizar una validación estadística.

Se establecieron factores o variables controlables del proceso así como los niveles de prueba de cada uno de ellos, Se analizó la concentración de DQO en el laboratorio, con diferentes condiciones de lavado y se trabajó con 4 factores: Volumen de agua denominado como factor (C), carga de ropa factor (B), cantidad de suavizante de telas factor (D) y cantidad de jabón líquido factor (A) y 2 condiciones de lavado con una réplica. En la Tabla 19 se muestran los arreglos ortogonales con las condiciones de lavado.

Tabla 19. Arreglos ortogonales experimentales para el lavado de ropa

Pruebas	Factores	Volumen de Detergente (mL)	Volumen de agua (L)	Volumen de suavizante (mL)	Ropa (kg)
1	A ₁ C ₁ D ₁ B ₁	100	120	100	10
2	A ₁ C ₁ D ₂ B ₂	100	120	150	5
3	A ₁ C ₂ D ₁ B ₂	100	60	100	5
4	A ₁ C ₂ D ₂ B ₁	100	60	150	10
5	A ₂ C ₂ D ₁ B ₁	150	60	100	10
6	A ₂ C ₂ D ₂ B ₂	150	60	150	5
7	A ₂ C ₁ D ₁ B ₂	150	120	100	5
8	A ₂ C ₁ D ₂ B ₁	150	120	150	10

En la Tabla 20 se observan los arreglos y lavados experimentales.

Tabla 20. Arreglos experimentales por el método de Taguchi

Prueba	Factores							Variable de respuesta DQO (mg/L)	
	A	AC	C	D	AD	B	e	Y ₁	Y ₂
1	1	1	1	1	1	1	1	320	408
2	1	1	1	2	2	2	2	272	333
3	1	2	2	1	1	2	2	376	575
4	1	2	2	2	2	1	1	476	816
5	2	1	2	1	2	1	2	861	1030
6	2	1	2	2	1	2	1	567	646
7	2	2	1	1	2	2	1	412	414
8	2	2	1	2	1	1	2	510	630

La Tabla 21 muestra los resultados del diseño experimental, el cual se comprobó que los factores importantes en este estudio fueron la cantidad de ropa y la cantidad de agua.

Tabla 21. Resultados de variables significativas por método Taguchi

Factor	SS	G.I	MS	F_{exp.}
A	2626.5625	1	2626.5625	0.7486387
AC	5814.0625	1	5814.0625	1.6571592
C	602564.063	1	602564.063	171.746448
D	14460.0625	1	14460.0625	4.12149433
AD	7876.5625	1	7876.5625	2.2450254
B	229680.563	1	229680.563	65.464941
e1	31417.5625	1	31417.5625	-
e2	158.5	8	158.5	-
Total	894597.939	15	894597.939	-
e	31576.0625	9	31576.0625	3508.45139

4.7 Alimentación de agua gris de lavadora al HAFSS-H

Una vez establecidas las condiciones de lavado se recolectó el agua gris de lavadora en contenedores de plástico con una capacidad de 20 galones, previamente limpios y secos. El agua gris de lavadora se depositaba en un contenedor de plástico con una capacidad de 250 galones, se mezclaban las aguas del lavado y del enjuague, previamente filtrado y se dejaba reposar por 2 horas en el tanque sedimentador, con una bomba submarina se transportaba el agua a un tanque de alimentación de agua gris con una capacidad de 300 galones el cual transportaba el agua gris de lavadora al HAFSS-H también conocido como reactor biológico, pasando por último al depósito de agua tratada.

4.7.1 Toma de muestras

Las muestras de agua gris de lavadora se tomaban por la mañana en influente y efluente del HAFSS-H en recipientes de 1 litro para los análisis físicos y químicos y en envases estériles de 125 mL para las pruebas bacteriológicas, estas muestras se tomaron por duplicado.

Análisis de muestras

Se analizó la DQO de acuerdo a la Norma Mexicana NMX-AA-030-SCFI/2-2011 con un espectrofotómetro y un reactor H1839800 HANNA Marca HI 83099 como se muestra en la Figura 20.



Figura 20. Medidor de DQO

Los SST se analizaron el influente como el efluente por gravimetría, por la Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001 el pH se midió con un potenciómetro marca VWR Scientific Products Modelo 3100, como se observa en la Figura 21



Figura 21. Medidor de pH

La CE se midió con un conductímetro Marca Orión 3 como se observa en la Figura 22.



Figura 22. Medidor de CE

Los CF se analizaron de acuerdo a la Norma Mexicana NMX-AA-42-1987 con el método de tubos múltiples, número más probable (NMP/100mL). Se realizaron los análisis por duplicado tanto en el influente como en el efluente del HAFSS-H (ver Figura 23)

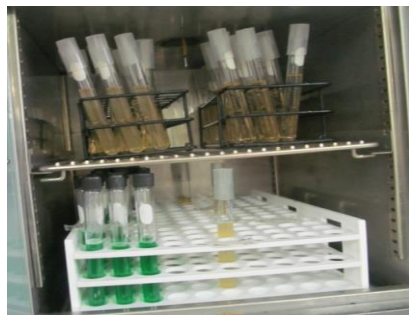


Figura 23. Análisis de coliformes fecales

Se realizaron análisis de la DBO₅ siguiendo las indicaciones de la Norma Mexicana NMX-AA-028-SCFI-2001, realizando 3 réplicas tanto en muestras del influente como del efluente del HAFSS-H como se muestra en la Figura 24.



Figura 24. Medidor de oxígeno disuelto

CAPÍTULO 5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Caracterización de agua gris de lavadora

Los resultados de los análisis de muestras de agua gris de lavadora se ilustran en la Tabla 22.

Tabla 22. Resultados de parámetros analizados a muestras compuestas de agua gris de lavadora

No. de muestras	Fecha de muestreo	pH	CE μs/cm	Color U Pt-Co	SST [mg/L]	SDT [mg/L]	SSed [mL/L]	DQO [mg/L]	NTK [mg/L]
1	03/10/2013	9	1893	15	237.5	2640	0.6	NA	NA
2	04/10/2013	7.7	2084	10	85	1504	0.6	NA	NA
3	08/10/2013	9	1896	15	135	1816	1	NA	NA
4	09/10/2013	8.1	1871	10	232.5	2432	0.4	NA	NA
5	10/10/2013	8	2612	25	162.5	1930.8	1	665	NA
6	11/10/2013	8.2	3550	10	205	2636	1.2	1037	NA
7	14/10/2013	8.8	2397	20	85	2268	0.45	1495	NA
8	15/10/2013	8.3	3580	40	72.5	1908	0.45	1500	NA
9	16/10/2013	8.2	3330	30	189.2	3116	0.5	1055	NA
10	17/10/2013	8	2551	20	100	2217.33	0.4	729	NA
11	18/10/2013	8.3	2044	10	37.5	1828	0.1	347	2.1
12	21/10/2013	8	2246	20	77.5	1156	1	669	0.8
13	22/10/2013	7.9	2488	40	163.5	1812	0.3	1188	1.5
14	23/10/2013	7.9	2412	5	120.2	1864	0.1	1474	14.9
15	24/10/2013	8.2	2910	10	32.5	1600	1.8	527	0.1
16	25/10/2013	7.9	2671	5	127.5	1628	0.3	875	10.7
17	28/10/2013	8.1	2691	15	145	1736	0.3	694	11.6
18	29/10/2013	8	2532	40	360	1628	0.5	1327	9.3
19	30/10/2013	7.9	2289	10	62.5	1664	0.5	995	6.5
20	31/10/2013	7.8	2557	20	65	1680	0.3	1160	0.5
21	01/11/2013	7.4	2394	30	160	2184	0.2	1500	7.7
22	04/11/2013	7.6	2383	30	67.5	2136	0.4	1500	13.1
23	05/11/2013	7.7	2199	30	10	1516	1	849	12.7
24	06/11/2013	7.8	2120	50	20	1570	0.01	703	8.62
25	07/11/2013	7.8	2176	25	5	1582	0.01	725	4.7
26	08/11/2013	8.4	2848	8.4	20	1472	0.01	641	6.6
27	11/11/2013	8.1	2420	35	115	1700	0.01	1340	6.5
28	12/11/2013	8.2	2284	40	80	1412	0.5	1313	5.3
29	13/11/2013	8.4	2133	5	15	1260	0.01	612	7.1
	Media	8.1	2468	21	110	1858	0.5	997	6.9
	Desv. Estándar	0.37	442.9	12.81	81.8	443.3	0.4	360.9	4.5
	Límite superior	8.6	2727	52.8	237.5	2640	1.8	1500	14.9
	Límite Inferior	7.83	1841	27.2	5	1156	0.01	347	0.5

Los resultados promedio obtenidos fueron: pH 8.1, CE 2468 $\mu\text{S}/\text{cm}$, color 21.5 Unidades Pt-Co, los SST de 110 mg/L, 0.5 mg/L la concentración de SSsed, 6.9 mg/L para el NTK y la DQO varió entre 347 mg/L y 1500 mg/L. NA: Indica que no fue analizado. La Tabla 23 muestra los resultados de CF indicando valores entre 240 a 24×10^4 NMP/100 mL.

Tabla 23. Resultados de CF en la caracterización de agua gris de lavadora

Fecha	CF NMP/100 mL
23/11/2013	2×10^3
24/11/2013	24×10^4
25/11/2013	24×10^4
26/11/2013	240
27/11/2013	750
28/11/2013	24×10^4
30/11/2013	750
01/12/2013	750
02/12/2013	240
03/12/2013	46×10^3
04/12/2013	24×10^4
Promedio	91 885
Límite superior	24×10^4
Límite inferior	240

Los resultados obtenidos de la caracterización de agua gris de lavadora del presente estudio, mostraron resultados muy similares a otros estudios, como se muestra en la Tabla 24.

Tabla 24. Comparación de resultados de la caracterización de agua gris con los obtenidos en otros estudios

Estudios	pH	SST [mg/L]	DQO [mg/L]	DBO [mg/L]	NTK [mg/L]	CF [NMP/mL]	CE [$\mu\text{S}/\text{cm}$]
Li, (2009)	7.1 - 10	68 - 465	231 - 2950	48 - 472	1.1 - 40.3	$50 - 1.4 \times 10^3$	ND
Presente investigación	7.7 - 9	5 - 360	191 - 1500	104 - 330	0.50 - 14.9	$240 - 24 \times 10^4$	1871 - 3580
Santasmassas (2013)	7.2 - 8.3	22 - 160	153 - 461	50 - 258	36	$80 - 4.4 \times 10^5$	910 - 1267
Paris (2010)	7.1	63	208	151	24.2	4.7×10^5	ND
Ushijima (2012)	10.1	70 - 100	500 - 600	ND	ND	ND	ND

ND: No determinado

5.2 Resultados de la DQO del primer y segundo experimento de la evaluación del HAFSS-H

En el primer experimento (Tabla 25) en el día 7 se presentó el mayor porcentaje de remoción del 87 % y en el segundo experimento (Tabla 26) en el séptimo día del 91 %.

Tabla 25. Resultados de DQO primer experimento

Días	DQO [mg/L]		Remoción [%]
	Influyente	Efluente	
1	450	103	77
2	428±2.8	61±1.4	86
3	443±2.1	71±2.8	84
4	397±2.1	78±1.4	83
5	396±2.8	57±2.1	87
6	448±4.2	58±3.5	87
7	471±1.4	52±0.70	88
8	453±2.1	74±1.4	84
9	445±3.5	93±2.1	79
10	393±4.9	95±2.1	79
11	398±1.4	89±2.1	80
12	415±3.5	72±1.4	84
13	396±4.9	95±0.70	79
14	397±1.4	89±1.4	80
15	398±3.5	72±4.2	84
16	397±4.2	60±1.4	87
17	389±2.1	79±1.4	82
18	415±4.2	67±.70	85
20	397±2.12	81±2.8	82
21	396±2.8	69±2.1	85
22	428±1.2	75±2.1	83
23	400±2.1	62±1.4	86
24	428±1.4	61±0.70	86
25	390±3.5	60±2.8	87
Promedio	415	74	83.53 %

Tabla 26. Resultados de DQO segundo experimento

Días	DQO [mg/L]		Remoción [%]
	Influyente	Efluente	
1	516±1.4	92±2.1	82
2	496±4.2	92±1.4	81
3	384±1.4	54±0.7	86
4	340±2.8	70±2.1	79
5	381±1.4	66±2.8	83
6	401±2.8	70±1.4	83
7	389±4.2	34±2.8	91
8	440±2.1	85±1.4	81
9	382±1.4	75±2.1	80
10	380±2.1	80±1.4	79
11	380±3.5	72±1.4	81
12	406±4.2	78±2.8	81
13	390±4.2	75±2.1	81
14	387±1.4	72±1.4	81
15	390±2.8	70±1.4	82
16	385±2.1	65±3.5	83
17	356±1.4	65±1.4	82
Promedio	400	70	82.25 %

Los resultados de DQO en influente y efluente del primer y segundo experimento, se observan en las Figuras 25 y 26, con un porcentaje de remoción del 83.53 % y 82.25% respectivamente.

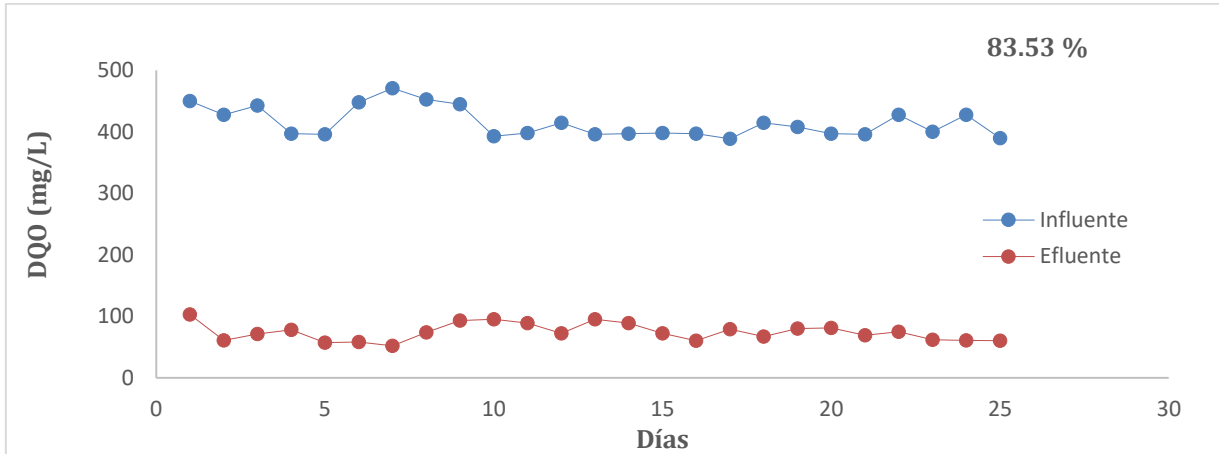


Figura 25. Concentración de DQO de influente y efluente durante el primer experimento

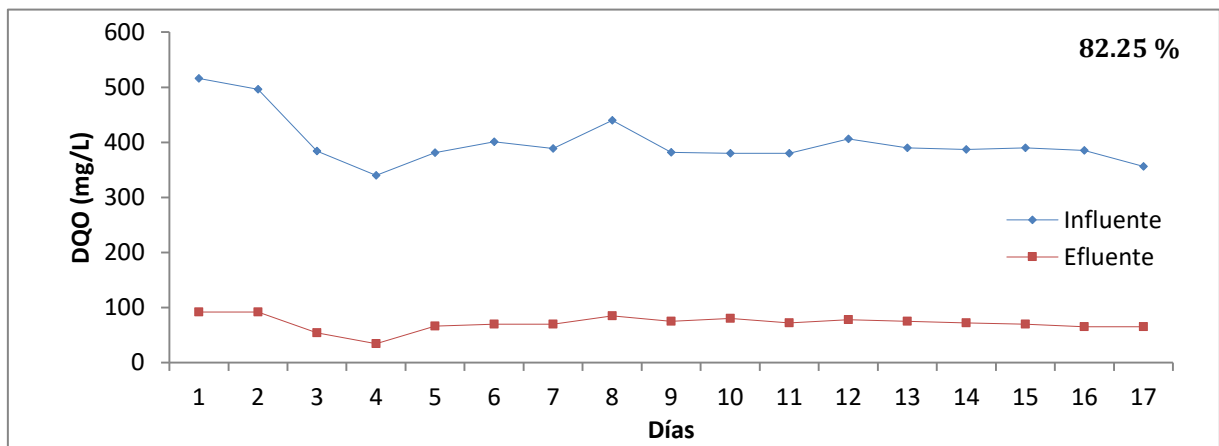


Figura 26. Concentración de DQO de influente y efluente durante el segundo experimento

5.2.1 Resultado de los análisis físicos, químicos y bacteriológicos del primer y segundo experimento del HAFSS-H

Los resultados del primer y segundo experimento se muestran en la tabla 27 y 28, La remoción de CF varió entre 94.4 % y 92.8 %.

Tabla 27. Resultados de parámetros físicos, químicos y bacteriológicos en el influente y efluente (Primer experimento)

Días	Fecha de muestreo	pH		CE [$\mu\text{S}/\text{cm}$]		SST [mg/L]		CF [NMP/100 mL]		NTK [mg/L]	
		Infl.	Efl.	Infl.	Efl.	Infl.	Efl.	Infl.	Efl.	Infl.	Efl.
1	06/05/14	8.0	8.4	1967	2529	360	37.5	NA	NA	6.8	N.D
2	07/05/14	8.0	8.4	1897	2450	87.5	20	93X10 ⁵	43X10 ³	7.1	1.5
3	08/05/14	8.0	8.3	1897	2621	87.5	5	93X10 ⁵	24X10 ³	4.6	2.6
4	09/05/14	7.6	7.6	1546	2229	72.5	0	93X10 ⁵	21 X10 ³	4.2	2.4
5	12/05/14	8.0	7.4	1559	2140	18	0	24 X10 ⁴	24 X10 ³	2.4	1.5
6	13/05/14	7.4	7.9	1532	2130	137	50	24 X10 ⁴	24 X10 ³	3.3	0.2
7	14/05/14	7.9	8.4	1674	2230	41	25	24 X10 ³	4300	1.8	0.4
8	15/05/14	7.9	7.9	2342	2352	107	12	24 X10 ³	4300	1.6	0.4
9	16/05/14	7.9	8.3	1816	2772	58	3	15 X10 ³	4300	2	1.2
10	20/05/14	7.9	8.0	1571	2719	90	0	93 X10 ⁵	43 X10 ³	2.3	0.2
11	21/05/14	7.9	8.0	1553	2451	88	5	15 X10 ⁴	43 X10 ³	3.5	0.4
12	22/05/14	7.4	7.3	1570	2175	88	0	93 X10 ³	9300	3.3	1.2
13	23/05/14	8.4	7.7	1533	1941	85	0	24 X10 ⁴	9300	NA	0.4
14	27/05/14	8.2	7.4	1352	2509	82.5	47.5	15 X10 ³	930	5.2	1.5
15	28/05/14	8	7.5	1645	2578	32.5	15	9 X10 ⁴	4300	2	0.2
16	29/05/14	8.2	7.5	1580	2545	16	2	9 X10 ⁵	43 X10 ³	1.6	1.2
17	30/05/14	8.0	7.3	1650	2220	22	3	43 X10 ⁴	24 X10 ³	N.A	0.4
18	02/06/14	7.2	6.9	1378	3090	17	2	43 X10 ⁵	24 X10 ³	N.A	1.2
19	03/06/14	7.0	6.7	1379	3010	84	48	24 X10 ⁴	2400	N.A	0.2
20	04/06/14	7.2	6.5	1391	2321	23	10	24 X10 ⁴	2400	N.A	0.4
21	05/06/14	7.6	6.7	1413	2333	33	14	24 X10 ³	430	N.A	0.2
	Promedio	7.8±0.16	7.6±0.25	1630.7±94	2445±124	75.6±34	14.2±7.6	20.4X10 ⁵	1.5X10 ⁴	3.6±0.84	1.0±0.42
	Desiación Estándar	0.37	0.59	240.30	290.38	73.38	17.28			1.81	0.74
	Prueba T	0.16	0.25	102.78	124.20	31.39	7.39			0.77	0.32
	Valor mínimo	7.6	7.4	1527.9	2320.8	46.2	6.8	9X10 ⁴	430	2.7	0.6
	Valor máximo	8.0	7.9	1733.5	2569.2	109.0	21.6	93X10 ⁵	43X10 ³	4.2	1.2
	Depuración [%]						79 %		94.4%		65.6 %

Tabla 28. Resultados de parámetros físicos, químicos y bacteriológicos en influente y efluente (Segundo experimento)

Días	pH		CE [$\mu\text{S}/\text{cm}$]		SST [mg/L]		CF [NMP/100 mL]		NTK [mg/L]	
	Inf.	Efl.	Infl.	Efl.	Infl.	Efl.	Infl.	Efl.	Infl.	Efl.
1	8.0	7.8	1681	2208	45	43	2×10^6	93×10^3	4.5	1.5
2	8.1	7.9	1652	2092	29	7	93×10^4	21×10^3	3.7	0.7
3	8.4	8.0	1694	2197	28	8	15×10^4	7×10^4	6.6	5.4
4	8.2	7.7	1714	2369	42	6	15×10^4	7×10^4	7.2	0.6
5	7.7	7.0	1769	2737	23	7	7×10^4	1500	3.3	0.1
6	8.2	7.9	1648	2603	47	9	7×10^4	1500	4.3	1.1
7	8.0	7.2	1678	2633	47	8	43×10^3	4300	3.0	0.4
8	8.0	7.3	1691	2608	30	5	24×10^4	2100	3.4	0.4
9	7.8	7.3	1648	2703	25	8	7×10^4	1500	6.4	0.6
10	7.9	7.2	1705	2732	40	6	15×10^4	7000	3.4	0.2
11	7.8	7.3	1677	2753	20	8	43×10^4	2400	5.0	0.8
12	7.9	7.2	1680	2764	36	7	64×10^3	4600	3.7	0.7
13	8.0	7.0	1679	2856	48	6	43×10^3	3900	3.0	0.5
14	8.1	7.2	1682	2863	46	5	39×10^3	2400	6.2	0.6
15	8.0	7.0	1687	2846	48	4	28×10^3	2300	3.1	0.5
16	7.9	7.0	1675	2869	42	6	46×10^3	2800	3.2	0.4
17	7.8	7.2	1680	2872	44	6	24×10^3	1500	4.5	0.3
Promedio	8.0	7.0	1685	2630	38	9	267471	17165	4.0	1
Desviación Estándar	0	0	28	256	10	9	499137	29605	1	1
Valor mínimo	7.7	7.0	1648	2197	20	4	24000	1500	3.0	0.1
Valor máximo	8.4	8.0	1769	2872	48	43	$2 \text{ E} 6$	93000	7.2	5.4
Depuración [%]					76.3 %		92.8 %		81.4 %	

El pH promedio del influente en el primer experimento estuvo en 7.6 y para el efluente 7.8 (ver figura 27), mientras que para el segundo experimento el pH promedio del influente fue de 8.0 y para el efluente de 7.0 (ver Figura 28)

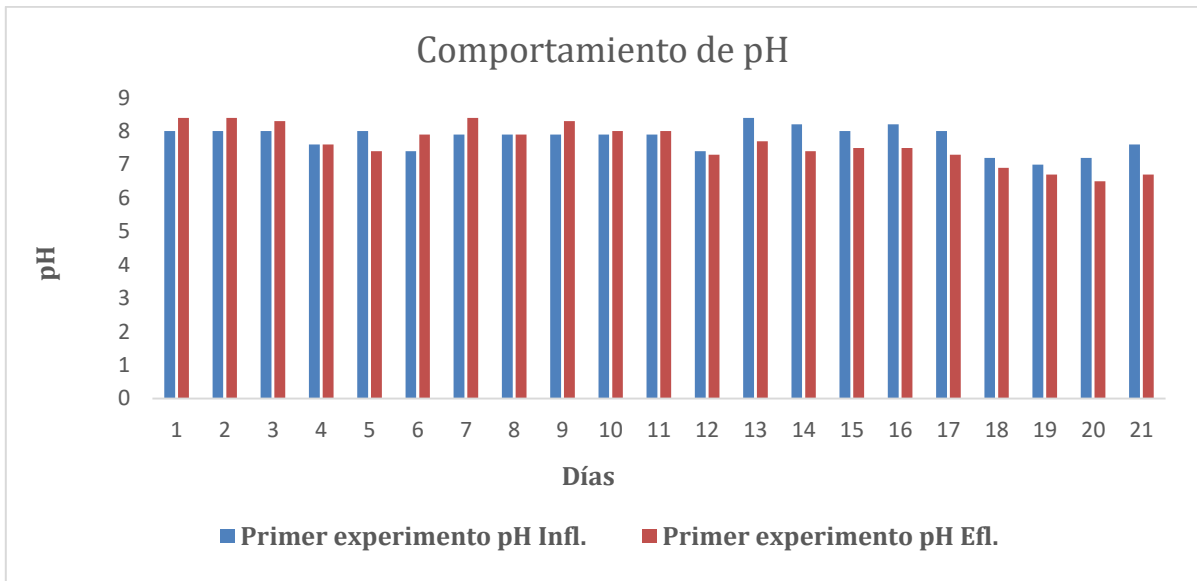


Figura 27. Comportamiento de pH en influente y efluente del HAFSS-H en el primer experimento

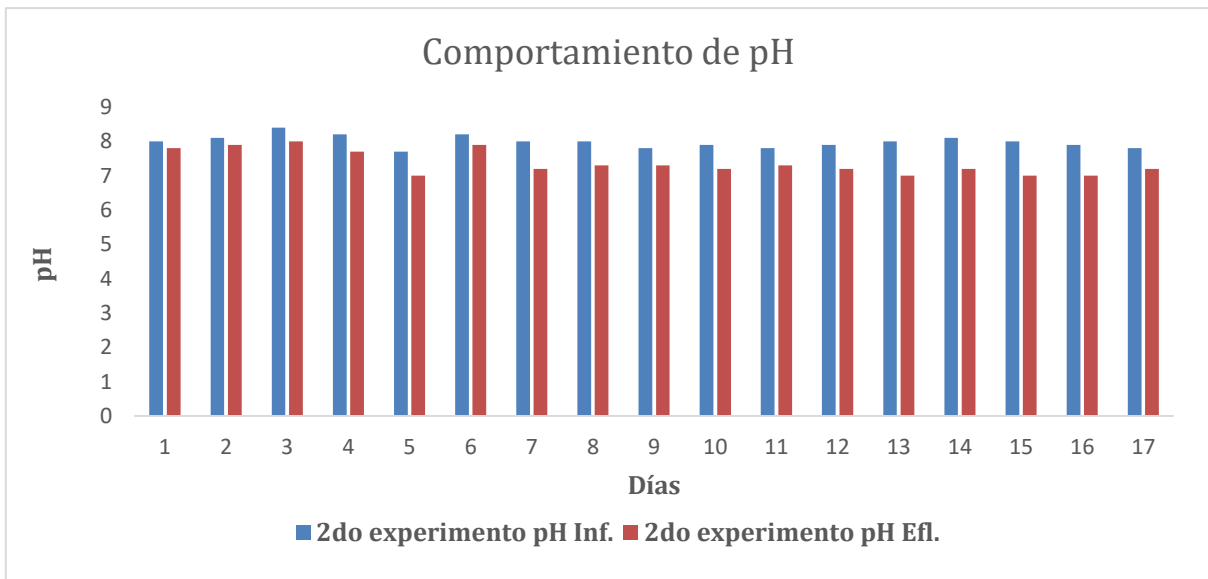


Figura 28. Comportamiento de pH en influente y efluente del HAFSS-H en el segundo experimento

La CE en el influente varió en un intervalo promedio entre 1685 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 1630.7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el efluente, los valores obtenidos se encuentran entre 2630 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 2445 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (ver Figura 29 y 30)

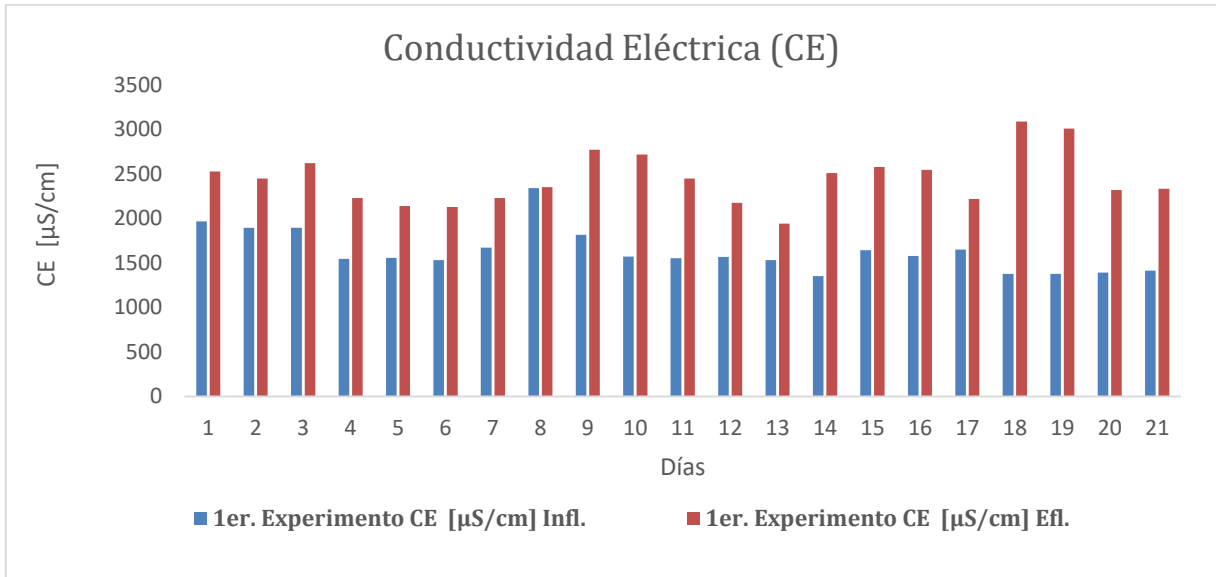


Figura 29. CE en influente y efluente del HAFSS en el primer experimento

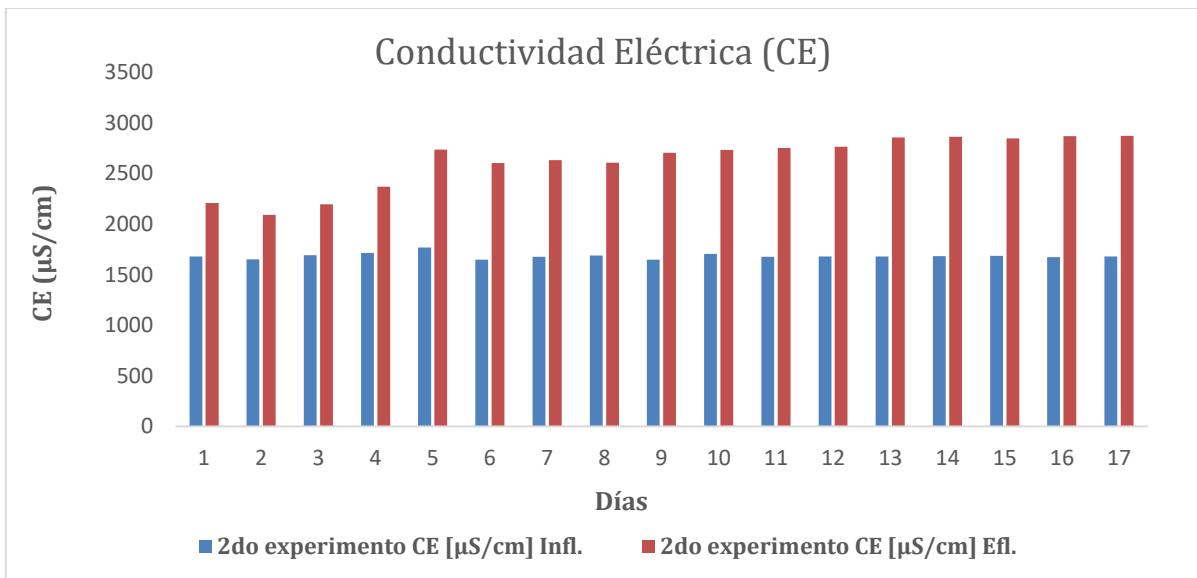


Figura 30. CE en influente y efluente del HAFSS en el segundo experimento

Los SST presentaron un porcentaje de remoción de 78.89 % y 75.8 % respectivamente como se muestra en las figuras 31 y 32.

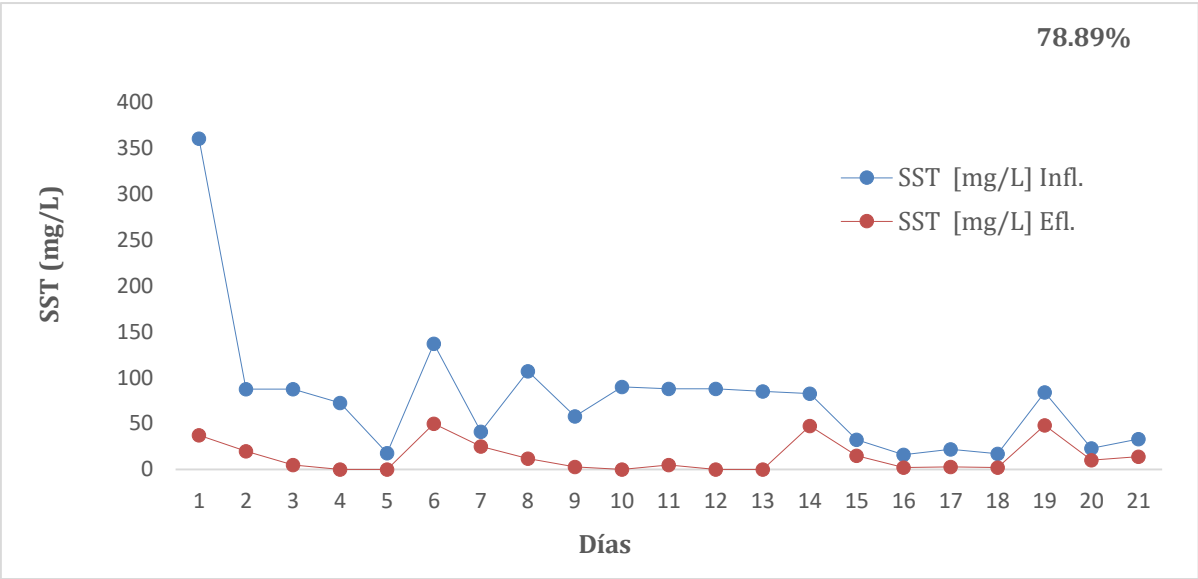


Figura 31. SST en el influente y efluente del HAFSS en el primer experimento

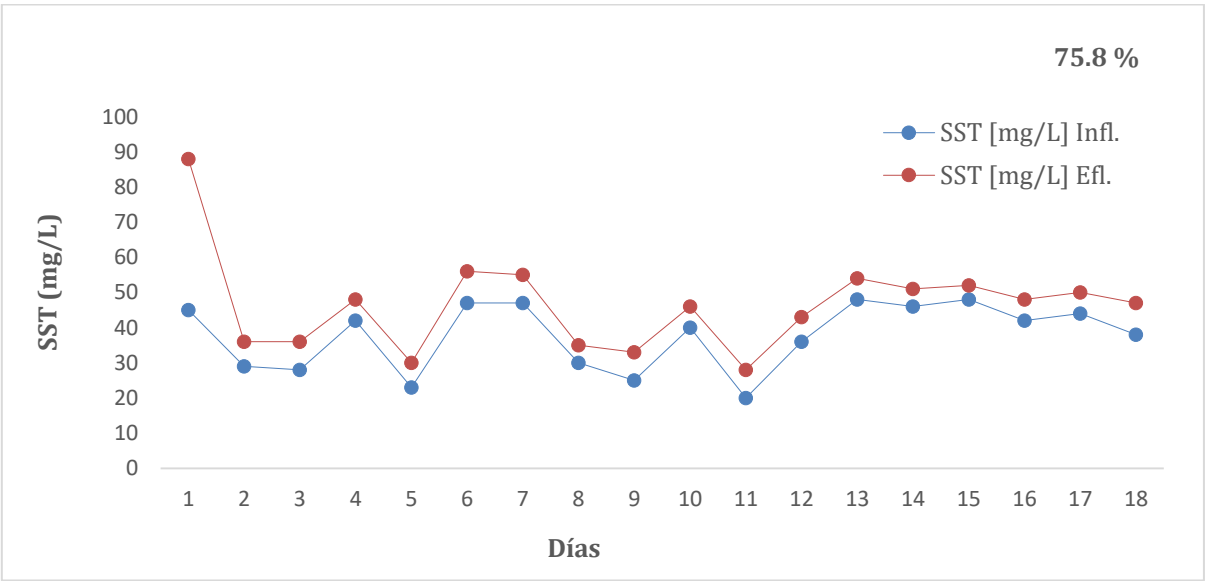


Figura 32. SST en el influente y efluente del HAFSS en el segundo experimento

El NTK fue de 65.6 % y 81.4 % respectivamente como se muestra en la figura 33 y 34.

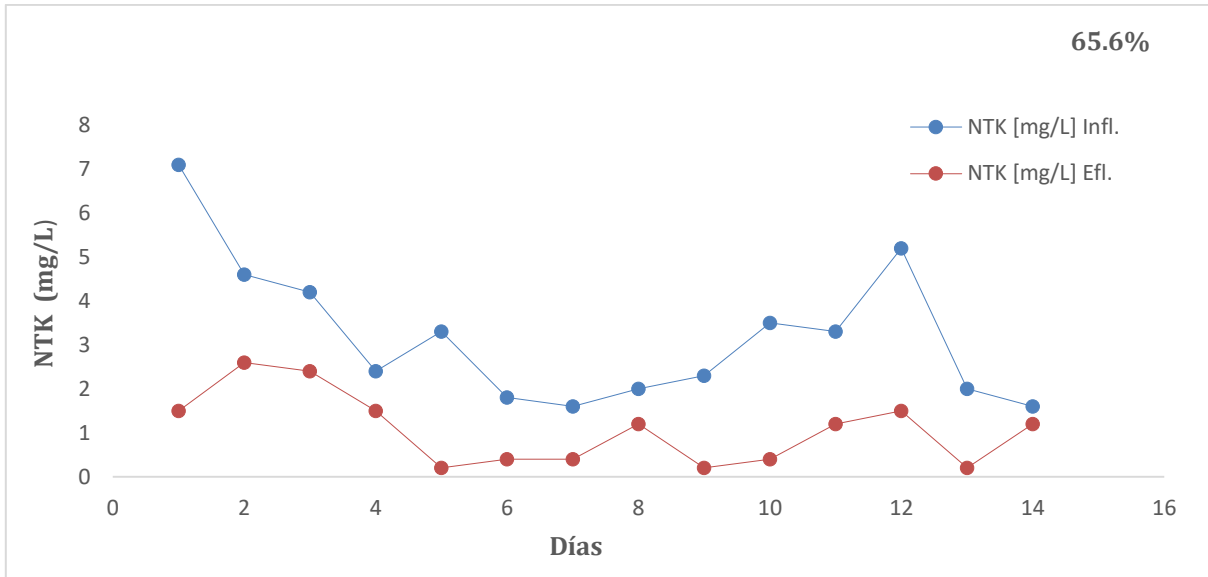


Figura 33. Resultados de NTK en influente y efluente en el primer experimento

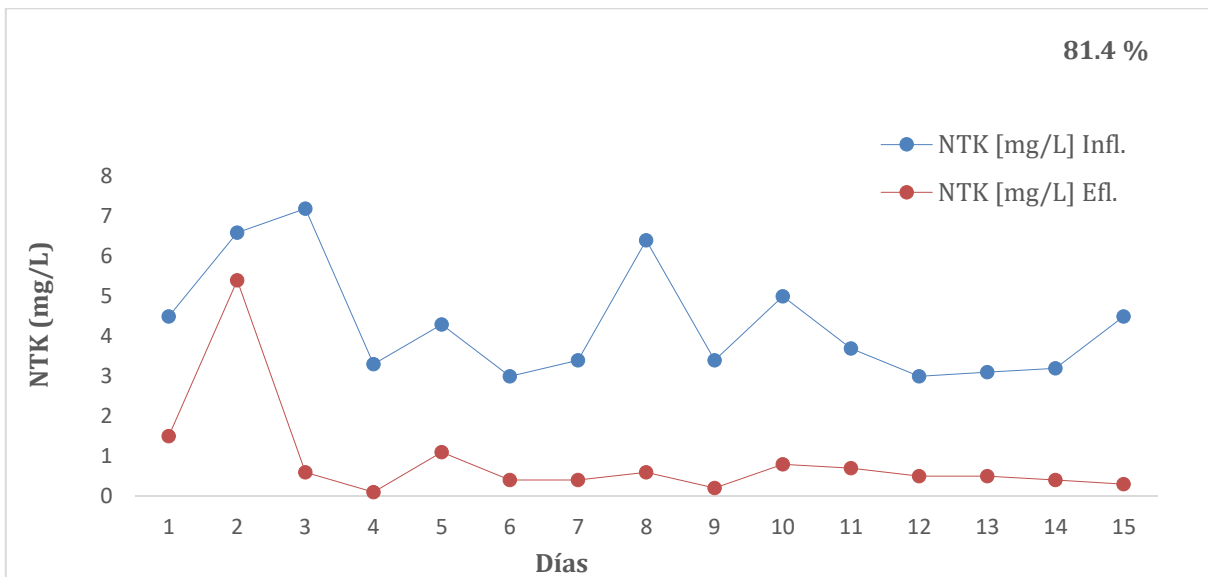


Figura 34. Resultados de NTK en influente y efluente en el segundo experimento

5.3 Relación DQO/DBO₅

Fue necesario establecer la relación DQO/DBO₅ para realizar la conversión necesaria para cambiar los valores de DQO en DBO₅ para compararlos con la Norma Mexicana NMX-AA-028-SCFI-2001 que indica los valores máximos permisibles de DBO en las aguas residuales. Durante 8 días se tomaron muestras de agua gris de lavadora y se realizaron análisis de DQO y de DBO₅ como se observa en la Tabla 29 estableciendo la relación de DQO/DBO₅.

Tabla 29. Resultados de DQO, DBO₅ y de la relación DQO/DBO₅

Días	DQO [mg/L]	DBO ₅ [mg/L]	Relación DQO/DBO ₅
1	408	120	3.4
2	333	86	3.9
3	575	128	4.5
4	816	165	4.9
5	1030	264	3.9
6	646	169	3.8
7	414	102	4.1
8	630	159	4.0
		Promedio	4.04

5.3.1 Resultados de análisis de DQO y obtención de DBO₅

Aplicando la relación de DQO/DBO₅ y con los resultados obtenidos del análisis de DQO, se obtuvieron los resultados de DBO₅ de 30 días de evaluación como se observa en la Tabla 30 obteniendo un promedio mensual de 20 mg/L

Tabla 30. Resultados de DQO y DBO₅

Días	DQO [mg/L]	DBO ₅ [mg/L]	DQO [mg/L]	DBO ₅ [mg/L]
	Inf.	Inf.	Efl.	Efl.
1	516	144	88	25
2	496	139	88	25
3	384	107	54	15
4	340	95	34	9.5
5	381	107	66	18
6	401	112	70	20
7	389	109	70	20
8	440	123	85	24
9	382	107	75	21
10	380	106	80	22
11	380	106	72	20
12	406	114	78	22
13	390	109	75	21
14	387	108	72	20
15	390	109	70	20
16	385	108	65	18
17	356	100	65	18
Promedio [mg/L]	400	112	71	20

5.3.2 Comparación de los resultados del efluente con los límites de la normatividad.

Comparando los resultados del estudio con los límites establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público. Los resultados de concentración de DBO₅, DQO, SST, NTK y fosfatos, presentaron valores por debajo de los límites de la norma como se muestra en la Tabla 31, los CF no cumplen con las normas, aunque la cantidad de remoción es muy alta.

Tabla 31. Comparativo de los resultados del efluente con los límites de la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997

Parámetros	Efluente del HAFSS-H	NOM-003-SEMARNAT-1996	
		CI	CD
DBO ₅ [mg/L]	20.0	20	30
SST [mg/L]	3.0	20	30
CF [NMP/100 mL]	14978	240	1000
NTK [mg/L]	1.15	NA	NA
Fosfatos [mg/L]	0.3	NA	NA

CD: Contacto directo CI: Contacto indirecto NA: No aplica

5.4 Resultados de remoción promedio en el primero y segundo experimento

En la Tabla 33 se muestran los resultados promedio del primero y segundo experimento, obteniendo resultados promedio de SST 77.3 %, DQO 83 %, CF 93.6 %, NTK 71 % y fosfatos 27.8 %.

Tabla 32. Resultados promedio parámetros físicos, químicos y bacteriológicos

(Primero y segundo experimento)

Experimento	SST [%]	DQO [%]	CF [%]	NTK [%]	Fosfatos [%]
Primero	78.89	83.53	94.4	65.6	NA
Segundo	75.8	82.25	92.8	81.4	27.79
Promedio	77.3	83.0	93.6	73.5	27.8

5.5 Discusión

Los resultados obtenidos de la caracterización de agua gris de lavadora del presente estudio, mostraron resultados muy similares a otros estudios como los obtenidos por Li, (2009), que también caracterizaron agua de lavadora, excepto los valores de DQO, en donde se reportan valores más altos que los obtenidos en el presente estudio. Santasmasas et al., (2013), Paris-Schlapp, (2010), Ushijima et al., (2012). Después de caracterizar el agua gris, se evaluó el humedal.

En el primer y segundo experimento; se alimentó en el HAFSS-H; agua gris con una DQO promedio de 415 mg/L y 400 mg/L. Al séptimo día se redujo a 52 mg/L, y 34 mg/L dando una remoción de DQO de 83 % y 82 % respectivamente. En un estudio realizado por Romero et al., (2009), se evaluó el porcentaje de remoción de la carga orgánica de aguas residuales, en un sistema de tratamiento por humedales artificiales de flujo horizontal y con dos especies vegetales. *Phragmites australis* (carrizo) y *Typha dominguensis* (tule). Se llevó a cabo en dos etapas: La primera para calcular el tiempo de retención hidráulico y la segunda para determinar el porcentaje de remoción de DQO en el sistema. Obtuvieron un porcentaje de remoción promedio de DQO de 61 %, con un tiempo de retención hidráulico de 5 días. Los resultados que obtuvieron son similares a los obtenidos en el presente estudio en donde la remoción de DQO fue de 83 % y 82 % con un tiempo de retención hidráulico de 7 días. Los valores aceptables de los tiempos de retención hidráulica para este tipo de humedales oscilan entre 5 a 9 días, según Tejeda, (2010)

Castañeda (2013) Evaluó la depuración de agua residual doméstica en un humedal natural de la región de los altos de Jalisco con totora (*Thipa latifolia*). Obtuvo un tiempo de retención de 3, 5 y 7 días, con un pH entre 7.4 y 7.6, una remoción de DBO₅ de 86 % y nitrógeno del 64 %. En el primer experimento del presente estudio el pH promedio fue de 7.8 en el influente y 7.6 en el efluente, el porcentaje de remoción promedio de DB del NTK fue de 62.2 %.

En cuanto a CF se obtuvieron porcentajes de remoción por arriba del 90 % durante los experimentos del estudio. Estos resultados son comparables con los encontrados por Steer et al., (2002), Li et al, (2009) y García, (2010) en donde se reportan porcentajes de remoción mayores al 90 %.

El pH en el influente varió de 8 a 7.8 y en el efluente de 7.6 a 7. Se observaron ligeros incrementos del pH en el influente y un incremento en la CE en el efluente. Bernal *et al.*, (2003), quien realizó un estudio en un humedal artificial horizontal–subsuperficial utilizando plantas *Typha sp*, encontró que el pH y la CE casi siempre fueron mayores en el efluente. Este autor comenta que esto puede deberse a que la grava o la piedra caliza del soporte utilizado, aporta alcalinidad al agua en forma de iones carbonato y/o bicarbonato afectando el valor de pH y CE.

5.6 Conclusiones y recomendaciones

La evaluación del HAFSS-H en este estudio, dio como resultado una buena remoción de DQO, CF, SST y NTK en el tratamiento de agua gris, por lo que se puede concluir que la tecnología de humedales artificiales es adecuada para el tratamiento de aguas grises en las zonas áridas y semiáridas de México.

La planta *Typha domingensis* mostró capacidad para la eliminación de contaminantes y una buena capacidad de adaptación a los humedales. El tiempo de retención óptimo para el humedal fue de 7 días.

Las bacterias que se desarrollan en las raíces de las plantas y en los distintos sustratos juegan un papel muy importante en el proceso de degradación de la materia orgánica, sin embargo, se recomienda que para complementar este trabajo se valoren a detalle otros procesos involucrados.

5.8 Referencias bibliográficas

1. Abe, K., Jomada, M., Okupa, A., Itahashi, S., & Banzai, K. (2014). Purification performance of a shallow free-water-surface constructed wetland receiving secondary effluent for about 5 years. *Ecological Engineering*, 69, 126-133.
2. Aguado, J. L. (2009). El agua, recurso indispensable pero limitado.
3. Alfaro, B. N. N. D. (2012) Caracterización de las actividades bacterianas presentes en el humedal artificial 1 de la UAM Iztapalapa.
4. Álvarez, M. (2007). Estanques y jardines acuáticos: una guía esencial para construir estanques, jardines acuáticos, fuentes y cascadas en el jardín. Editorial Albatros.
5. APA (6th ed.) Crites, R., & Tchobanoglous, G. (1998). Small and decentralized wastewater management systems. Boston: WCB/McGraw-Hill. Chicago (Author-Date, 15th ed.)
6. Arango Gartner, Á. M. (2013). Biosistema integral de tratamiento de aguas residuales domésticas. Diseño, construcción y evaluación.
7. Arcos, R., Castellano de Rosas, E., Alejo, M. D. L. L., García, R., & Solís, R. (2002). Remoción de la materia orgánica mediante la utilización de humedales artificiales en la comunidad de Sta. María Nativitas Texcoco Edo. de México. In *Memorias* (pp. 1-8). FEMISCA. <http://bases.bireme.br/>
8. Arias, C. A., & Brix, H. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 13, 17-24. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91101302>.
9. Arias, C. A., & Brix, H. (2016). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Ciencias e Ingeniería Neogranadina*, (13), 17-24.
10. Azcoitia Toribio, E. D. (2012). Efecto de sobrecargas hidráulicas en el rendimiento de humedales construidos para la depuración de aguas.
11. Bedoya Pérez, j. C., Ardila Arias, A. N., & Reyes Calle, J. (2014). Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial en el tratamiento de las aguas residuales generadas en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, Colombia. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 30(3), 275-283.
12. Berlanga-Robles, C. A., Ruiz-Luna, A., & Lanza Espino, G. D. L. (2008). Esquema de clasificación de los humedales de México. *Investigaciones geográficas*, (66), 25-46.
13. Bernal, D., Cardona, D., Galvis, A., & Peña, M. (2008). Guía de selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales domésticas por métodos naturales. *Seminario Internacional Sobre Métodos Naturales para el Tratamiento de Aguas Residuales. CINARA. Universidad del Valle. Cali. Colombia. Recuperado de <http://www.ingenieroambiental.com/4014/berna.pdf> en Junio de*

14. Bernal, F., Mosquera, D., Maury, H., González, D., Guerra, R., Pomare, A., & Silva, M. (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*, 149.
15. Bernal, R., Galeano, G., Rodríguez, A., Sarmiento, H., & Gutiérrez, M. (2011). Nombres comunes de las plantas de Colombia.
16. Bixquert Ariño, F. J. (2014). Estudio de la vegetación en el humedal artificial Tancat de la Pipa y en el filtro verde V-30: determinación de la biomasa vegetal y su contenido nutritivo, evaluación de la velocidad de crecimiento y asimilación de nutrientes (Doctoral dissertation).
17. Brito, L., Willman R., Ramos B., Carlos de J. (2010). Comportamiento de un humedal construido para tratar el efluente de sépticos en un auto motel ubicado en el municipio bolívar del estado Anzoátegui.
18. Brix H., Arias, C.A & Del Bubba, M. (2001). Media selection for sustainable phosphorus removal in subsurface flow constructed wetlands. *Water Sci. Technol.*, 44, 47-54.
19. Brix, H., Koottatep, T., & Laugesen, C. H. (2007). Wastewater treatment in tsunami affected areas of Thailand by constructed wetlands. *Water Sci. Technol.*, 56(3), 69-74.
20. Cano, A. L. (2003). Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales: La EDAR de los Gallardos (Almería). In *Ecología, manejo y conservación de los humedales* (pp. 99-112). Instituto de Estudios Almerienses.
21. Castañeda, A. A., & Flores, H. E. (2013). Tratamiento de aguas residuales domésticas mediante plantas macrófitas típicas en Los Altos de Jalisco, México. PAAKAT, (5). <http://www.suv.udg.mx/>
22. Chan, S. Y., Tsang, Y. F., Cui, L. H., & Chua, H. (2008). Domestic wastewater treatment using batch-fed constructed wetland and predictive model development for NH₃-N removal. *Process Biochemistry*, 43(3), 297-305.
23. Chang, J.-J., Wu, S.-Q., Dai, Y.-R., Liang, W., & Wu, Z.-B. (2012). Treatment performance of integrated vertical-flow constructed wetland plots for domestic wastewater. *Ecological Engineering*, 44(0), 152-159.
24. Ciema, (2005) Centro de Investigación y Estudios en Medio Ambiente. Tecnología sostenible para el tratamiento de aguas residuales. Proyecto: Astec Sucher & Holzer. Austria - Nicaragua. Managua, Nicaragua: 2005. 43 p.
25. CNA (Comision Nacional del Agua). (2007). Situación del subsector agua potable. alcantarillado y saneamiento. Comisión Nacional del Agua. México D.F. 235 pp.: SEMARNAT

26. Comisión Nacional del Agua. (2007). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento.
27. Comisión Nacional del Agua. (2008). Estadísticas del agua en México 2008 sobre sequía. México: CONAGUA, Capítulo 2.
28. Comisión Nacional del Agua. (2009). Sistema nacional de información del agua (SINA). México: CONAGUA.
29. Comisión Nacional del Agua. (2010). Estadísticas del agua en México 2010. México: CONAGUA. <http://www.conagua.gob.mx/>
30. CONAFOR. (2010). Practicas de reforestación, Manual básico, primera edición Comisión Nacional Forestal. Recuperado de <http://es.scribd.com/>
31. CONAGUA (2012) Estadísticas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua. www.conagua.gob.mx
32. CONAGUA, (2008). Estadística de agua en México. <http://www.conagua.gob.mx/>
33. CONAGUA, (2009). Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación. <http://www.ibwc.state.gov/>, consultado: el 14 de septiembre del 2012
34. CONAGUA, (2009). Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación.
35. CONAGUA, (2010). Statistics on Water in México. Edition 2010. Recuperado de <http://www.conagua.gob.mx/>
36. CONAPO (Consejo Nacional de Población). (2005). Proyecciones de población con base en el conteo .
37. COPLADE, (2014). Comité de planeación para el desarrollo del estado de Baja California. Consultado el 4 de Agosto del 2015
38. Corbella, I. (2012). La visión del uso de las aguas grises desde el Departamento de Salud . Generalitat de Catalunya Agencia de Salud Pública de Catalunya. Consultada el 26 de octubre de 2012.
39. Delgadillo, O. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Cochabamba- Bolivia: Nelson Antequera Durán. www.infoandina.org. Consulta 22 de febrero del 2012
40. Elke, M., Glaser, D., Setty, K., Sussman, D., & Yocum, D. (2007). Diseño e Implementación de Soluciones para los problemas de recursos hídricos en San Cristóbal de las Casas, México.
41. Elmitwalli, T. A., & Otterpohl, R. (2007). Anaerobic biodegradability and treatment of grey water in up flow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor. *Water Research*, 41(6), 1379-1387.

42. EPA (Environments Protection Agency). (1993). Guía para el diseño y construcción de un humedal construido con flujos subsuperficiales. US-EPA. Region 6. División de manejo de aguas RAMA de instalaciones municipales sección técnica.
43. EPA, (2000) .Wastewater Technology Fact Sheet Wetlands: Subsurface Flow.Washington D.C., E.E.U.U., (EPA 832-F-00-023).
44. Escalante, V., Cardoso, L., Ramírez, E., Moeller, G., Mantilla, G., Montecillos, J., ... & Villavicencio, F. (2003). El reuso del agua residual tratada en México. In *Memorias del evento: Agua 2003* (pp. 1-7). IWA.
45. Escobar M.J.E. (2012) Nombres comunes de las plantas de Colombia. Totorá. (*Typha latifolia*)
46. Escutia-Lara,Y., Lara-Cabrera, S., & Lindig-Cisneros, R.A. (2009). Efecto del fuego y dinámicas de las hidrófitas emergentes en el humedal de la Mintzia, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás
47. Espinosa-García, A. C., Arias-Ortíz, C. F., & Mazari-Hiriart, M. (2004). Virus en sistemas acuáticos e implicaciones en salud pública Virus in aquatic systems and public health implications. *Hidrobiológica*, 14(2), 166-178.
48. Esponda, A. (2001). Arranque de un sistema experimental de flujo vertical a escala piloto de tipo humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales (Doctoral dissertation, Tesis de Licenciatura. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México, México).
49. Ezcurra E. and V. Rodríguez. (1986). Rainfall Patterns in the Gran Desierto, Sonora, Mexico. *Journal of Arid Environments* 10, 13-28
50. Gallegos, A. E. (2012). Diseño, construcción y dimensionamiento de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas (grises y negras) a nivel de laboratorio para implementación en el Campamento la Joya de los Sachas, Epitacio Echeverría Ecuador.
51. García Palacio, J. A. (2010). Efecto del uso de plantas y configuración de los sistemas en la remoción de organismos patógenos mediante el uso de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales domésticas en condiciones tropicales.
52. García Serrano, J., & Corzo Hernández, A. (2008). Depuración con Humedales Construidos. Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial
53. García, H.J., Flessa, K., Santiago, S.E., Romero, H.S., Zamora, A.F., & Ramírez, H.J (2012). Salinity responses to inflow alterations in a 6500 ha *Typha* wetland. *Ecological Engineering*. 52,191-202

54. García, H.J., Valdés, C.C., Cadena, C.L., Romero, H.S., Silva, M.S., González, P.G., Leyva, G.G & Aguilera, M.D. (2011). Humedales artificiales como un método viable para el tratamiento de drenes agrícolas. *Revista mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1, 97-111.
55. Gerba, C. P., Thurston, J. A., Falabi, J. A., Watt, P. M., & Karpiscak, M. M. (1999). Optimization of artificial wetland design for removal of indicator microorganisms and pathogenic protozoa. *Water Science and Technology*, 40(4), 363-368.
56. Gross, A., Shmueli, O., Ronen, Z., & Raveh, E. (2007). Recycled vertical flow constructed wetland (RVFCW)—a novel method of recycling greywater for irrigation in small communities and households. *Chemosphere*, 66(5), 916-923. <http://www.sciencedirect.com/>
57. Guido-Zárate, A., & Durán-de-Bazúa, C. (2008). Remoción de contaminantes en un sistema modelo de humedales artificiales a escala de laboratorio. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 23(1), 15-22.
58. Hermosillo, M. D. (2011). Humedales artificiales, Sistema sustentable para el tratamiento de aguas residuales una perspectiva para México.
59. Hidalgo, J. C., Montano, J. J., & Estrada, M. S. (2005). Recientes aplicaciones de la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas. *Theoria*, 14(1), 17-25
60. Hídrico, P. E. (2008). Estado de Baja California. 2008-2013. *Comisión Estatal del Agua (CEA)*.
61. Hoefflich, E. E. (2007). Programa de conservación y manejo reserva de la Biosfera alto golfo de California y Delta del Río Colorado. Comisionado Nacional de Áreas Naturales Protegidas.
62. Hoffmann, H., Platzer, C., Winker, M., & Muench, E. V. (2011). Technology review of constructed wetlands subsurface flow constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment. *Deutsche Gesellschaft für, Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, Sustainable sanitation-ecosan program, Postfach, 5180, 65726.* <http://www.sswm.info/>
63. INEGI. (2011). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Introducción a la ecología. (México. 1980)
64. Infojardin, (2012). Mordisco de rana, *Hydrocharis morsus-ranea*. <http://fichas.infojardin.com>
65. Kadlec, R. H. (2009). Comparison of free water and horizontal subsurface treatment wetlands. *Ecological engineering*, 35(2), 159-174.
66. Li, F., Wichmann, K., & Otterpohl, R. (2009). Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses. *Science of the Total Environment*, 407(11), 3439-3449. Recuperado de <http://scholar.google.es/>

67. Ling, T. Y., Apun, K., & Zainuddin, S. R. (2009). Performance of a pilot-scale biofilters and constructed wetland with ornamental plants in greywater treatment. *World Applied Sciences Journal*, 6(11), 1555-1562. [http://idosi.org/wasj/wasj6\(11\)/16.pdf](http://idosi.org/wasj/wasj6(11)/16.pdf)
68. Llagas Chafloque, W. A., & Guadalupe Gómez, E. (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. *Rev. Inst. investig. Fac. minas metal cienc. geogr*, 9(17), 85-96.
69. Mariñelarena, A. (2006). Manual de autoconstrucción de sistemas de tratamiento de aguas residuales domiciliarias. *La Plata: FREPLATA Editores*.
70. Martín Fernández, I. (2008). Propuesta de un sistema de tratamiento de aguas residuales a bajo costo para la localidad de Guelatao de Juárez, Oaxaca (México).
71. Martin, J. (2010). *Phragmites australis*. Real Jardín Botánico. Madrid, España, Europa. HYPERLINK "<http://www.ars-grin.gov/cgi-bin/npgs/html/taxon.pl?28091>" <http://www.ars-grin.gov> , consultada el 29 de septiembre del 2012
72. Martínez, S. A. A., Toro, F. M. B., Rojas, G. G., Giraldo, J. P. S., & Ángel, M. L. H. (2010). Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Informador técnico*, (74), 12-22. Consultado el 20 de febrero del 2012.
73. Melo Quintana, G., & Sánchez Leal, L. C. (2013). Evaluación fitodepurante de un sistema biológico artificial en aguas de riego como alternativa para la sostenibilidad del recurso hídrico.
74. Miranda, M. G., & LOT, A. (1999). El lirio acuático, ¿una planta nativa de México?. *Ciencias*, (053).
75. Molina, J. N. (2000). Plantas acuáticas de los humedales Bogotorianos. Centro Educativo Distrital Simón Bolívar J.T. recuperado de: <http://maomolina.tripod.com/plantas.htm>, consultado: el 22 de octubre del 2012
76. Montoya, J. I., Ceballos, L., Casas, J. C., & Morató, J. (2013). Estudio comparativo de la remoción de materia orgánica en humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial usando tres especies de macrófitas (Comparative study of the organica matter removal in horizontal subsurface flow constructed wetland USI). *Revista EIA*, 7(14), 75-84.
77. Murillo, M. T. (1983). Usos de los helechos: en Suramérica con especial referencia a Colombia. Universidad Nacional de Colombia.
78. Navarro, A., García, Y., Vázquez, A., & Marrugo, J. L. (2013). Eficiencia de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales del empacado de hortalizas. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 4(1), 39-50.
79. NMX (1987). NMX-AA-42-1987. Calidad del agua determinación del número más Probable (NMP) de coliformes totales, coliformes fecales (termo tolerantes) y *Escherichia coli* presuntiva.

80. NMX (2001). NMX-AA-028-SCFI-2001. Análisis de agua - determinación de la demanda Bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO₅) y residuales tratadas.
81. NMX (2001). NMX-AA-030-SCFI-2001. Análisis de agua - determinación de la demanda química de oxígeno (DBO₅) en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
82. NMX (2001). NMX-AA-038-SCFI-2001. Análisis de agua-determinación de turbidez en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
83. NMX (2010). NMX-AA-026-SCFI-2010. Análisis de agua - medición de nitrógeno total Kjeldahl en aguas naturales, residuales y Residuales tratadas.
84. NMX (2011). NMX-AA-008-SCFI-2011. Análisis de agua. Determinación del pH.- método electrométrico.
85. NMX, (2000). NMX-AA-093-SCFI-2000. Análisis de agua - determinación de la conductividad electrolítica – método de prueba.
86. NOM-001-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
87. NOM-003-SEMARNAT-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.
88. Osnaya Ruiz Maricarmen. (2012), Tesis. Propuesta de diseño de un humedal Artificial para el tratamiento de aguas residuales en la Universidad de la Sierra Juárez. Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México.
89. Paris, S., & Schlapp, C. (2010). Greywater recycling in Vietnam—Application of the HUBER MBR process. *Desalination*, 250(3), 1027-1030.
90. Pérez, C.R. (2003). Humedales construidos. Estado del arte. (II) Ingeniería Hidráulica, Vol. XXIV, No. 3
91. Pérez, J. C. B., Arias, A. N. A., & Calle, J. R. (2014). Evaluación de humedal artificial de flujo de humedal artificial en el tratamiento de las aguas residuales generadas en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, Colombia. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 30(3), 275-283. <http://revistas.unam.mx/>
92. Piérart, I. P., & Rojas, G. C. (2013). Modelo integrado de un sistema de biodepuración en origen de aguas residuales domiciliarias. Una propuesta para comunidades periurbanas del centro sur de Chile. *Revista Gestión y Ambiente*, 16(3), 39-51. Recuperado de <http://www.revistas.unal.edu.co/>
93. Piñeyro, M., & Chalar, G. Eficiencia en la depuración de un efluente de frigorífico por humedales construidos a escala.
94. PNUD (Programa Nacional Unidas para el desarrollo, 2006). Informe Sobre desarrollo Humano, Más allá de la Escases, Poder, Pobreza y Crisis mundial.

95. Ponce, y., & Omar, G. (2014). Estudio de factibilidad para la instalación de una planta desalinizadora de agua del mar para consumo humano y comercialización en la provincia de Santa Elena
96. Ramírez-Carrillo, H. F., Luna-Pabello, V. M., & Arredondo-Figueroa, J. L. (2009). Evaluación de un humedal artificial de flujo vertical intermitente, para obtener agua de buena calidad para la acuicultura. *Revista mexicana de ingeniería química*, 8(1), 93-99.
97. Reyes-Luz, M. I., Guido-Zárate, A., & Durán-de-Bazúa, C. (2006). *Remoción de fósforo en un sistema de humedales artificiales a escala de laboratorio* (Doctoral dissertation, Tesis profesional (Ingeniería Química), en proceso. Facultad de Química, UNAM. México DF México).
98. Rodríguez M, 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 Ed*, 21, 25-33.
99. Rodríguez, S.J.A., (2008) Tratamiento de aguas residuales en pequeñas comunidades. Tesis (Ingeniero Químico especialidad en Ingeniería de Procesos). Universidad de sonora. División de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia.
100. Rojas, K., Vera, I., & Vidal, G. (2013). Influence of season and species *Phragmites australis* and *Schoenoplectus californicus* on the removal of organic matter and nutrients contained in sewage wastewater during the start up operation of the horizontal subsurface flow constructed wetland. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (69), 285-299.
101. Romero, A.M., Colín, C. A., Sánchez, S. E., & Ortiz, H., M. A. (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), 157-167. Recuperado de <http://revistas.unam.mx/>
102. Ruiz, M. O. (2012). Propuesta de diseño de un humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales en la Universidad de la Sierra de Juárez. Tesis para obtener el Título de Licenciado en Ciencias Ambientales. Ixtán de Juárez, Oaxaca, México. www.unsij.edu.mx Consultado el 28 de julio del 2012
103. Rzedowski, J, R. (2006). *Vegetación de México*. Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad, 1ra. Edición digital. México, 504. <http://www.conanp.gob.mx>. Consultado el 29 de septiembre del 2012
104. Salazar, R. P., Chinchilla, C. A., Marín, J. S., & Pérez, J. A. (2013). Evaluación del funcionamiento de un sistema alternativo de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Uniciencia*, 27(1), 332-340. www.revistas.una.ac.cr/uniciencia
105. Santasmasas, C., Rovira, M., Clarens, F., & Valderrama, C. (2013). Grey water reclamation by decentralized MBR prototype. *Resources, Conservation and Recycling*, 72, 102-107. <http://www.sciencedirect.com/>

106. Santos, C., Taveira-Pinto, F., Cheng, C. Y., & Leite, D. (2012). Development of an experimental system for greywater reuse. *Desalination*, 285, 301-305. <http://www.sciencedirect.com/>
107. Setty, K. (2007). Manual de construcción: Humedales construidos para el Tratamiento de Aguas negras. *Bren school of environmental science and management, university of California, Santa Barbara*.
108. Sorto Meza, R. B., & Romero Pineda, Y. M. (2013). *Propuesta de diseño de un humedal artificial para tratamiento de aguas residuales de la industria avícola* (Doctoral dissertation, Universidad de El Salvador).
109. Steer, D., Fraser, L., Boddy, J., & Seibert, B. (2002). Efficiency of small constructed wetlands for subsurface treatment of single-family domestic effluent. *Ecological Engineering*, 18(4), 429-440. <http://www.sciencedirect.com/>
110. Suárez, A., Agudelo, N., Rincón, J., & Millán, N. (2014). Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Mutis*, 4(1), 7. <http://revistas.utadeo.edu.co/>
111. Taguchi, Gen'ichi, Elsayed A. Elsayed, y Thomas C. Hsiang (1989). *Quality Engineering in Production Systems*. McGraw-Hill, Inc., New York
112. Tejeda J.C. (2010). Diseño de un humedal para la remoción de Cd, As y Cr con plantas de *Typha latifolia* (espadaña). Tesis de maestría en Ciencias Ambientales. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, México. 121 pp
113. U.S. EPA (1993). United States, Environmental Protection Agency U.S. EPA-Region 6. Guía para el diseño y construcción de un humedal construido con flujos subsuperficiales. Recuperado de <http://nepis.epa.gov/>
114. Ushijima, K., Ito, K., Ito, R., & Funamizu, N. (2013). Greywater treatment by slanted soil system. *Ecological Engineering*, 50, 62-68. <http://www.sciencedirect.com/>
115. Vinueza Estévez, J. S. (2014). Diseño de un sistema de pantanos artificiales para el tratamiento de aguas negras y grises del campo base y área de mantenimiento el coca de la Empresa Triboilgas.
116. Vymazal, J. (2005). Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. *Ecological Engineering*, 25(5), 478-490.
117. Vymazal, J. (2009). The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. *Ecological Engineering*, 35(1), 1-17. <http://www.sciencedirect.com/>
118. Vymazal, J., & Kröpfelová, L. (2011). A three-stage experimental constructed wetland for treatment of domestic sewage: First 2 years of operation. *Ecological Engineering*, 37(1), 90-98.

119. Winward, G. P., Avery, L. M., Frazer-Williams, R., Pidou, M., Jeffrey, P., Stephenson, T., & Jefferson, B. (2008). A study of the microbial quality of grey water and an evaluation of treatment technologies for reuse. *Ecological engineering*, 32(2), 187-197.
120. Winward, G. P., Avery, L. M., Stephenson, T., & Jefferson, B. (2008). Chlorine disinfection of grey water for reuse: Effect of organics and particles. *Water Research*, 42(1), 483-491.
121. Yáñez, R. S. G., & Cisneros, R. L. (2014). Efecto de la profundidad del agua en la germinación de *Typha domingensis*. *Revista Biológicas*, 15(2), 14-18.
122. Yocum, D. (2007). Manual de Diseño: Humedal construido para el tratamiento de las aguas grises por biofiltración. *Bren School of Environmental Science and Management. University of California, Santa Barbara. Estados Unidos de Norteamérica Anexos*.
123. Zalazar, R. P., Chinchilla, C. A., Marín, J. S., & Pérez, J. A. (2013). Evaluación del funcionamiento de un sistema alternativo de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Uniciencia*, 27(1), 332-340. www.revistas.una.ac.cr/uniciencia
124. Zambrano, X., Saltos, X., & Villamar, F. (2009). Diseño del sistema de tratamiento para la depuración de las aguas residuales domésticas de la población San Eloy en la Provincia de Manabí por medio de un sistema de tratamiento natural compuesto por un humedal artificial de flujo libre.