



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA  
Laboratorio de Limnoecología

Comparación del tratamiento de aguas residuales domésticas en  
un humedal de flujo subsuperficial con cultivos mixtos de  
*Cyperus papyrus*- *Zantedeschia aethiopica*  
y *Typha domingensis* -*Zantedeschia aethiopica*.

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**BIÓLOGO**

PRESENTA:

**IVÁN ANDRÉS ARREDONDO FRAGOSO**

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. JUSTO SALVADOR HERNÁNDEZ AVILÉS



MÉXICO, CIUDAD DE MÉXICO

2017



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Las nuevas escrituras

Mateo Quinto:

Las bienaventuranzas

Jesús al ver a toda aquella muchedumbre, subió al monte. se sentó y sus discípulos se reunieron a su alrededor. Entonces comenzó a hablar y les enseñaba diciendo:

Felices los que tienen el espíritu del pobre, porque de ellos es el Reino de los Cielos.

Felices los que lloran, porque recibirán consuelo.

Felices los pacientes, por que recibirán la tierra en herencia.

Felices los que tienen hambre y sed de justicia, porque serán saciados

Felices los compasivos, porque obtendrán misericordia

Felices los de corazón limpio, por que verán a dios.

Felices los que trabajan por la paz, porque serán reconocidos como hijos de Dios.

Felices los que son perseguidos por causa del bien, porque de ellos es el Reino de los Cielos.

Felices ustedes, cuando por causa mía, los insulten, los persigan y les levanten toda clase de calumnias.

Alégrense y muéstrense contentos, porque será grande la recompensa que recibirán en el cielo.

Pues bien saben que así persiguieron a los profetas que vinieron antes de ustedes

Amar a los enemigos.

Ustedes han oído que se dijo: "Ojo por ojo y diente por diente".

Pero yo les digo no resistan al malvado. antes bien, si alguien te golpea en la mejilla derecha ofrécele también la otra. Si alguien te hace un pleito por la camisa entrégale también el manto. "Si alguien te obliga a llevarle la carga, llévasela el doble más lejos. Da la que te pida, y al que espera de ti algo prestado, no le vuelvas a la espalda.

# *A mi familia.*

Ojalá existieran suficientes palabras para expresar lo infinitamente agradecido que estoy con cada uno de ustedes, ya que sin su ayuda y sacrificio no hubiera logrado nada de esto.

Agradecido siempre con ustedes por el apoyarme de manera académica y personal sobre todas las cosas.

A mi padre S. Cesar Arredondo Valdez, agradezco toda la paciencia y confianza que ha depositado en mi a lo largo de mi vida, por darme el mejor ejemplo de lucha y perseverancia, por no tirar la enseña que a pesar de todas las adversidades de la vida nunca se debe tirar la toalla y siempre salir adelante, por un buen camino orgulloso siempre de los logros alcanzados y dar los mejores consejos.

A mi madre Esther Mayela Fragoso Pérez por todas las noches de desvelo, por siempre estar cuando necesitabas un abrazo, por el amor incondicional que mostró todos los días, por saber reconocer todo el esfuerzo y cariño que tuve a esta carrera, por enseñarme que las enfermedades no son excusas para crecer día con día y valorar a todas las personas que están a nuestro alrededor.

A mis hermanos Karen y Alan, agradezco el gran afecto y todos los días de risas, de peleas y de sueños. Pese a todo sé que puedo contar con dos grandes seres humanos que también me enseñaron que sobreponerse a cualquier problema se logra en familia.

A mis sobrinos Santiago Israel Arredondo Salazar y Emilio Alejandro López Arredondo quienes siempre dan esperanza y fe con sus miradas y su sonrisa, a ellos espero que las siguientes paginas les funcione como ejemplo de que los sueños se pueden cumplir solo hay que luchar por ellos.

# Agradecimientos personales

Un verdadero amigo es quien te toma la mano y te toca el corazón

Gabriel García Márquez

Muchas personas han marcado y enseñado cosas importantes en mi vida:

A Catherine Zamora Botello porque 9 años de estarme aguantando se dicen fácil. A Gadhiel mejor amigo desde la infancia.

Durante mi corta vida he encontrado personas muy valiosas a las cuales quiero mostrarles mi agradecimiento:

Agradezco a Agustín, Cristhian, Ariana, Adrés, Jaqueline, Israel, Carlos, al otro Carlos (camello) y a una persona muy especial para mi José Alberto.

A Guillermo Marín, Miriam y Erick, amigos de secundaria; Agradezco también a Alan, Daniel, Marlet, Lili, Luis, Antonio, Ares, Diana, Sol, Brenda, Gabo, Carlos, Fany, Fernando (PEMBU), Felipe, Aguirre, Potter, Betsy y Tania grandes compañeros de bachillerato.

En el nivel superior hay muchas personas a quienes agradecer:

Empezare por mis dos simbioses Chucho y Omar muchas gracias por todos los regañíos ayudas a nivel académico y personal. A Yazmín y Alfonso (pancho), Ulises, Diego, Jovani y Angy, por su gran apoyo.

Agradezco a todo el equipo de trabajo (y buenos amigos) del laboratorio de limnoecología, Itza, Jebus, Alexei, Cesar, Ramiro, Chileno, Oscar, a los niños (Iván y Jair), Victoria, Fernanda.

Pero como también la diversión y el entretenimiento es importante agradezco a los piratas (Paco, Lalo, Jorge, Luis, Mario, Yozimar) y a la porra oficial (Clau, Montse, Eyra). También agradezco infinitamente a Moni, Marco, David, Azulon, Anelly, Luisote personas con quien compartí clases y momentos de alegría.

# *Agradecimientos Institucionales*

Agradezco a la UNAM por abrirme sus puertas desde el 2009 en el CCH Azcapotzalco donde comenzó este camino a la biología.

A la FES Zaragoza por dejar seguir este sueño de poder ayudar a la naturaleza adoptándome en la carrera de Biología.

A una de las mejores personas que he conocido y de esos héroes con bata y botas, al maestro (Dr.) Justo Salvador Hernández Avilés, quien se convirtió en un amigo, lleno de sabiduría, con quien puedes pasar horas llenas de risa y aprendiendo temas de vida, política, ciencia, etc. Le agradezco la confianza depositada en mí, esperando que lo poco que pude desarrollar ayude en uno de los proyectos que ha tenido a lo largo de su vida.

Agradezco a la A. C. Mateo Quinto abrir sus puertas para poder desarrollar este proyecto, el cual espero sirva para la mejora de la misma.

Agradezco el tiempo prestado y las atenciones para el enriquecimiento de este trabajo y a mi persona en el ámbito académico

M. en C. Eliseo Cantellano de Rosas

Dr. Justo Salvador Hernández Avilés

Biól. Elvia García Santos

Dra. Bertha Peña Mendoza

Biól. Maricela Arteaga Mejía

# Índice

1. Resumen	11
2. Introducción	13
3. Marco teórico	14
3.1. El agua en México y en el mundo	14
3.2. Contaminación del agua	15
3.3. Reutilización de aguas residuales	16
3.4. Humedales naturales	17
3.5. Humedales artificiales	17
3.6. Humedales de flujo superficial	18
3.7. Humedales de flujo subsuperficial	18
3.8. Humedales de flujo vertical	19
3.9. Sistema Unitario de Tratamiento, Nutrientes y Energía	20
4. Antecedentes	22
5. Planteamiento del problema	25
6. Justificación	26
7. Hipótesis	27
8. Objetivo general	27
8.1. Objetivos específicos	27
9. Zona de estudio	28
9.1. Orografía	28
9.2. Clima	28
9.3. Hidrografía	29
10. Método	29
10.1. Trabajo de campo	29

10.1.1. Trabajo en el SUTRANE	29
10.1.2. Parámetros físicos y químicos en el SUTRANE	31
10.1.3. Pruebas químicas a las muestras de agua	32
10.2. Trabajo de laboratorio	32
10.3. Trabajo de gabinete	33
10.3.1. Tiempo de retención hidráulica	33
10.3.2. Determinación de la concentración de DQO	34
10.3.3. Determinación de la concentración de DBO	34
10.3.4. Base de datos	35
11. Resultados	36
11.1 Tiempo de retención hidráulica	36
11.2 Temperatura	36
11.3 Oxígeno disuelto	37
11.4. pH	38
11.5. Conductividad eléctrica	39
11.6. Demanda Bioquímica de Oxígeno	41
11.7. Demanda Química de Oxígeno	43
11.8. Alcalinidad	46
11.9. Dureza	48
11.10. Nutrientes	49
11.10.1. Fósforo soluble reactivo	49
11.10.2. Fósforo total	52
11.10.3. Amonio	54
11.10.4. Nitritos	55
11.10.5. Nitratos	55
11.11. Coliformes totales y fecales	57



12. Discusión de resultados	59
12.1 Tiempo de retención hidráulica	59
12.2 Temperatura	60
12.3 Oxígeno disuelto	61
12.4. pH	61
12.5. Conductividad eléctrica	62
12.6. Demanda Bioquímica de Oxígeno	63
12.7. Demanda Química de Oxígeno	66
12.8. Alcalinidad	67
12.9. Dureza	67
12.10. Nutrimientos	68
12.10.1. Fósforo soluble reactivo	68
12.10.2. Fósforo total	69
12.10.3. Amonio	70
12.10.4. Nitritos	71
12.10.5. Nitratos	71
12.11. Coliformes totales y fecales	72
13. Conclusiones	74
14. Recomendaciones	76
15. Anexos	77
16. Referencias bibliográficas	81

## Índice de figuras

Figura 1. Usos del agua en México (Conagua, 2010).	15
Figura 2. Humedal horizontal de flujo superficial (Aquaberri, 2013).	18
Figura 3. Humedal horizontal de flujo subsuperficial (EPA, 2000).	19

Figura 4. Humedal artificial de flujo vertical (Delgadillo ,2010).	20
Figura 5. En el polígono azul se ubica la Asociación Civil Mateo Quinto, en el Municipio de Amozoc, Puebla.	28
Figura 6. SUTRANE de la A. C. Mateo Quinto tomado y editado de Escamilla y Morgado (2014). El * es el punto de muestreo en el sistema.	30
Figura 7. Cultivos en el humedal de flujo subsuperficial.	31
Figura 8. Promedio de temperatura del agua en el SUTRANE.	37
Figura 9. Concentración promedio de oxígeno disuelto en el	38
Figura 10. Promedio de pH en el SUTRANE	39
Figura 11. Promedio de la conductividad eléctrica en el SUTRANE.	40
Figura 12. Porcentaje de disminución de la conductividad eléctrica en el humedal artificial.	41
Figura 13. Concentración promedio de DBO <sub>5</sub> en el SUTRANE.	42
Figura 14. Porcentaje de remoción de la DBO <sub>5</sub> en el humedal.	43
Figura 15. Concentración promedio de la DQO en el SUTRANE	44
Figura 16. Diagrama de cajas múltiples para DQO.	45
Figura 17. Porcentaje de remoción de la DQO en el humedal.	46
Figura 18. Promedio de la concentración de bicarbonatos en el SUTRANE	47
Figura19. Porcentaje de la remoción de bicarbonato en el humedal.	48
Figura 20. Concentración promedio de la dureza en el SUTRANE	49
Figura 21. Concentración promedio del FSR en el SUTRANE	50
Figura 22. Porcentajes de remoción de FSR en el humedal.	51
Figura 23. Concentración promedio del FT en el SUTRANE.	53
Figura 24. Porcentaje de remoción de FT en el humedal.	54
Figura 25. Concentración promedio del amonio en el SUTRANE.	55
Figura 26. Concentración promedio de nitratos en el SUTRANE.	56

Figura 27. Porcentaje de remoción de nitratos en el humedal.	57
Figura 28. NMP de coliformes totales y fecales en el SUTRANE	58
Figura 29. Diseño del humedal de flujo subsuperficial con las modificaciones	77
Figura 30. Humedal de flujo subsuperficial en vista 3D	78
Figura 31. Diagrama de flujo para DBO	79
Figura 32. Diagrama de flujo para DQO	80

## Índice de cuadros

Cuadro 1. Valor de P- value en la prueba de Levene para DQO	45
Cuadro 5. Valor de P- value en la prueba de Levene para fósforo soluble reactivo.	51
Cuadro 6. Valor del P-value, en la prueba de Levene para fósforo total.	52
Cuadro 7. Clasificación del agua de acuerdo con la dureza (Jairo, 2002).	68

## 1. Resumen

Esta investigación se realizó en un Sistema Unitario de Tratamiento y Reúso de Agua, Nutrientes y Energía (SUTRANE), el cual consta de un humedal de flujo subsuperficial, donde se evaluó la calidad del agua bajo un diseño experimental con los siguientes tratamientos biológicos: 1) Cultivos mixtos de alcatraz (*Zantedeschia aethiopica*) con papiro (*Cyperus papyrus*), 2) alcatraz con espadaña (*Typha domingensis*) y 3) un testigo de alcatraz para determinar con cual tratamiento se tenía una mejor depuración del agua residual y comparar la calidad del agua con las Normas Oficiales Mexicanas con la finalidad de que el agua tratada sea utilizada con fines de riego para árboles frutales y pastos de conservación pertenecientes a una Asociación Civil en Amozoc, Puebla. Se midió el tiempo de retención hidráulica (TRH); se tomaron muestras mensuales de agua de cada uno de los depósitos, *in situ* se midió temperatura, oxígeno disuelto, pH, conductividad, DBO<sub>5</sub>, alcalinidad total, dureza total, dureza de magnesio y calcio. En laboratorio se realizaron pruebas de nutrientes (fósforo total, fósforo soluble reactivo, nitritos, nitratos, amonio), DQO, y coliformes.

El TRH fue de 8 días, la temperatura oscilo alrededor de 18 °C en los tratamientos. El oxígeno disuelto en el sistema fue microaerobio a anóxico, se registró en el tratamiento de papiro-alcatraz la concentración promedio más alta (0.45 mg L<sup>-1</sup>). El pH del sistema fue de neutro a débilmente alcalino. La conductividad eléctrica fue mayor en el depósito de aguas negras con 1933 µS cm<sup>-1</sup>. La mayor concentración de DBO<sub>5</sub> se registró en las aguas negras (498.5 mg L<sup>-1</sup>), la remoción más alta de este parámetro se presentó en el tratamiento alcatraz-espadaña con 35.8%. La concentración de DQO más alta se presentó en la entrada del humedal (976.42 mg L<sup>-1</sup>), el tratamiento de alcatraz-espadaña tuvo la mayor remoción de DQO (81.8%). La dureza total promedio fluctuó alrededor de 333 mg L<sup>-1</sup>. El depósito de aguas negras tuvo la mayor alcalinidad de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (807.03 mg L<sup>-1</sup>). En la entrada se registró la mayor concentración de fósforo total, mientras que el fósforo soluble reactivo tuvo la mayor concentración en las aguas negras (57.4 y 28.07 mg L<sup>-1</sup> respectivamente), la remoción más alta se registró en el tratamiento de alcatraz-papiro para ambos

nutrientes (44.1% y 44.46%). La concentración más elevada de nitratos en el sistema fue  $19.4 \text{ mg L}^{-1}$  en la entrada, los tratamientos de alcatraz-papiro y el testigo tuvieron un 58% de remoción, mientras que el tratamiento alcatraz-espadaña solo tuvo 25.5% de remoción. El amonio incrementó en los tratamientos del humedal. Los coliformes fecales rebasaron el límite máximo permisible para la NOM-003-ECOL-1997. Se concluye que el mejor tratamiento para la remoción de materia orgánica (DBO y DQO) se consiguió con el cultivo de alcatraz-espadaña y los nutrientes inorgánicos (fósforo total, fósforo soluble reactivo, con el cultivo de alcatraz-papiro. Sin embargo, en el SUTRANE se presentaron algunas limitaciones en el tratamiento de las aguas residuales, por lo que se proponen adecuaciones con respecto al tiempo de retención hidráulica asociados con cambios en la infraestructura del humedal artificial y la siembra en policultivo de las macrofitas.

## 2. Introducción

La Comisión Mundial para el medio ambiente y el Desarrollo (CMMAD), establecida por la ONU definió, en 1983 el concepto de sustentabilidad como un modo de vida individual, que parte de una forma particular hasta llegar de una forma general al desarrollo sustentable, como el desarrollo de satisfacción de las necesidades presentes sin comprometer las de futuras generaciones (Estrella y Gonzales, 2014). México abordó la sustentabilidad ambiental en su Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012 (pnd 2007-2012) como la administración eficiente y racional de los recursos naturales para mejorar el bienestar de la población actual sin comprometer la calidad de vida de las generaciones futuras (Ahumada *et al.*, 2012).

La Asociación Civil Mateo Quinto dentro de los proyectos sustentables y ambientales, tiene una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas denominada SUTRANE, que se construyó en el año de 1993, esto debido a que desde sus orígenes y por la ubicación donde se encuentra esta A.C., no cuenta con sistemas de alcantarillado ni drenaje

El SUTRANE, la cual consta de un depósito de aguas grises, un sedimentador de aguas negras, una trampa de aguas natadas y un depósito donde se mezcla el agua de estos compartimentos, la cual funciona como entrada a un humedal de flujo subsuperficial que contiene siete canaletas, el cual da una depuración biológica con macrofitas emergentes para que el agua tratada sea utilizada en riego de árboles frutales y pastos de conservación, sin embargo, se siguen presentado en la cantidad de microorganismos patógenos como coliformes, además, altas concentraciones en la Demanda Química de Oxígeno, Demanda Bioquímica de Oxígeno y nutrientes, por lo que se implementaron cultivos mixtos de *Zantedeschia aethiopica-Typha domingensis* en tres canaletas contrarrestando el tratamiento con cultivos mixtos de *Zantedeschia aethiopica-Cyperus papyrus* esperando mayores tasas de remoción por parte del primero debido a la forma estructural, forma, raíz y rizoma, para que el agua resultante pueda ser comparada con la NOM-001-SEMARNAT-1993, NOM-003-SEMARNAT-1996.

### 3. Marco teórico

#### 3.1. El agua en el mundo y en México

De los aproximadamente 113,00 km<sup>3</sup> de agua que se precipitan cada año sobre la Tierra en el ciclo hidrológico, cerca de 71,000 km<sup>3</sup> se evaporan y retornan a la atmósfera, el resto, unos 42,000 km<sup>3</sup>, recargan los acuíferos o retornan a los océanos por la vía de los ríos. La mayoría de los recursos de agua dulce del planeta se concentran en sólo seis países: Brasil, Rusia, Canadá, EE. UU., China e India. Más del 40% de los ríos del mundo se concentran en estos países. En promedio cerca del 46% del total global de las descargas de los ríos ocurren entre mayo y agosto (Shiklomanov, 2000).

La distribución del agua dulce sobre la superficie de la Tierra ha cambiado notablemente, como resultado de los esfuerzos directos del hombre para manejarla, estas alteraciones se acentuaron conforme la humanidad se urbaniza y también como resultado del impuesto por la revolución agrícola de los últimos decenios. Las principales acciones directas se iniciaron con la manipulación de los flujos de los grandes ríos, las presas de almacenamiento, el drenaje de los humedales, el transporte del agua a los centros urbanos, la explotación de los acuíferos y la irrigación de tierras agrícolas. La navegación, la agricultura, la industria, la generación de energía y los usos domésticos han sido en esta fase de la historia humana, las principales actividades económicas que dependen directamente del agua (Toledo, 2002).

La precipitación media en el territorio nacional es de 775 mm, equivalente a 1513 km<sup>3</sup>. De esta cantidad 1084 km<sup>3</sup> se evapotranspiran y el escurrimiento superficial medio es de 400 km<sup>3</sup> de los cuales solamente se aprovechan 47 km<sup>3</sup>. De esta cantidad de agua, el 77% del agua se utiliza en la agricultura, el 14% para el abastecimiento público, 5% para la generación de energía y el 4% es utilizada para la industria (Jiménez *et al.*, 2010).

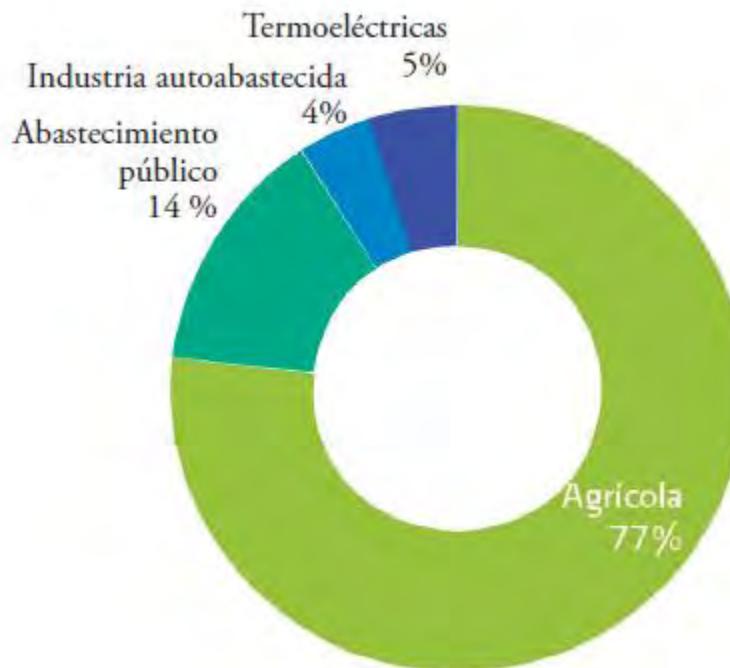


Figura 1. Usos del agua en México (Conagua, 2010)

Sin embargo, hay una gran problemática con el agua en México. Arreguín *et al.* (2004) mencionan que existen tres factores que limitan el aprovechamiento del agua: 1) La distribución temporal, pues se tiene una mayor precipitación de junio a septiembre (verano hemisférico). 2) La distribución espacial ya que en la parte sur del país se tiene mayor precipitación anual, como ejemplo la precipitación de Tabasco es trece veces mayor que la Baja California Sur. 3) Existe una mayor distribución, en el centro norte y noreste del territorio mexicano la población es del 77%, pero la disponibilidad del agua en estas zonas es de apenas el 31%.

### 3.2. Contaminación del agua

El crecimiento acelerado de la población humana, especialmente en países en vía de desarrollo; la contaminación de los cuerpos de agua superficial y subterránea; la distribución desigual del recurso hídrico y los graves periodos de sequía; han forzado a buscar nuevas fuentes de abastecimiento de agua, considerándose a las aguas residuales una fuente adicional para satisfacer la demanda del recurso (Silva *et al.*, 2008). Toda actividad humana tiene asociada una generación de aguas



residuales que deben ser sometidas a un tratamiento que garantice la continuidad del ciclo de consumo del recurso (Martelo y Lara, 2012).

La calidad sanitaria está determinada por las concentraciones de parásitos, representados por los huevos de helmintos y los coliformes fecales como indicador de los niveles de bacterias, así como virus causantes de enfermedades entéricas al ser humano (Medidas de protección sanitaria en el aprovechamiento de aguas residuales, 2007 en Veliz *et al.*, 2009).

La calidad de estas aguas puede generar dos tipos de problemas, de salud pública, particularmente importantes en países tropicales por la alta incidencia de enfermedades infecciosas, cuyos agentes patógenos se dispersan en el ambiente de manera eficiente a través de las excretas o las aguas residuales crudas (Duncan, 1996) y los problemas ambientales, ya que afectan la conservación o la protección de sistemas acuáticos y pérdida del suelo (Pierce y Turner, 1990 en Silva *et al.*, 2008).

### **3.3. Reutilización de aguas residuales.**

La utilización de aguas residuales en áreas agrícolas proviene de los tiempos antiguos en Atenas; sin embargo, la mayor proliferación de sistemas de aplicación de aguas residuales en el suelo ocurrió durante la segunda mitad del siglo XIX (Silva *et al.*, 2008). El reúso de aguas residuales está definido como su aprovechamiento en actividades diferentes a las cuales fueron originadas (Ministerio del Medio Ambiente, 2001). Los tipos y aplicaciones se clasifican de acuerdo con el sector o infraestructura que recibe el beneficio, siendo los principales: el urbano, que incluye irrigación de parques públicos, campos de atletismo, áreas residenciales y campos de golf; el industrial, en el que ha sido muy empleado durante los últimos años, especialmente en los sistemas de refrigeración de las industrias y el agrícola; que consiste en la irrigación de cultivos, siendo este último el uso principal (Gutiérrez, 2003). Por otra parte, Veliz *et al.*, (2009) mencionan que las actividades donde más se reutilizan las aguas residuales recuperadas son riego agrícola y de áreas verdes de parques, cementerios, campos deportivos y jardines; actividades industriales, fundamentalmente para torres de enfriamiento, alimentación de calderas y

necesidades de los procesos. Los usos industriales varían grandemente, y para garantizar agua de calidad adecuada, por regla general, se requieren tratamientos avanzados, recarga de acuíferos subterráneos y alimentación de lagos recreativos, acuicultura, descarga de inodoros, sistemas contra incendios, aire acondicionado.

### **3.4. Humedales naturales**

Los humedales son medios semiterrestres con un elevado grado de humedad y una profunda vegetación, que reúnen ciertas características biológicas, físicas y químicas, que les confieren un elevado potencial autodepurador. Los humedales naturales pueden alcanzar gran complejidad, con un mosaico de lámina de agua, vegetación sumergida, vegetación flotante, vegetación emergente y zonas con nivel freático más o menos cercano a la superficie. 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 y Guadalupe, 2006).

### **3.5 Humedales artificiales**

La construcción de humedales artificiales ha tenido crecimiento especialmente en países en vía de desarrollo, presentándose como alternativas de tratamiento de aguas residuales (Jensen *et al.*, 1993). Cooper (1999) los define como sistemas de ingeniería diseñados y construidos para tomar ventajas sobre los procesos que ocurren en los humedales naturales, basándose en la simbiosis entre las macrófitas, microorganismos y las interacciones químicas del suelo.

Los humedales eliminan la materia orgánica y nutrientes a través de una combinación de factores biológicos, físicos y químicos (Mancilla *et al.*, 2013)

Los humedales se pueden clasificar dependiendo el tipo de flujo por el que el agua fluya.

### **3.6. Humedal horizontal de flujo superficial**

En estos humedales el agua está por encima del sustrato teniendo contacto con la atmósfera, tienen áreas de agua donde se introducen plantas acuáticas flotantes

sumergidas o emergentes, el flujo del agua está regulado de acuerdo con la poca profundidad a la baja velocidad del flujo del agua y a la presencia de tallos de las plantas (Fig. 2). Estos sistemas son empleados más específicamente para el tratamiento terciario de aguas residuales domésticas o urbanas, por lo que resultan eficientes para la remoción de microorganismos y los sólidos suspendidos (Vymazal, 2011).

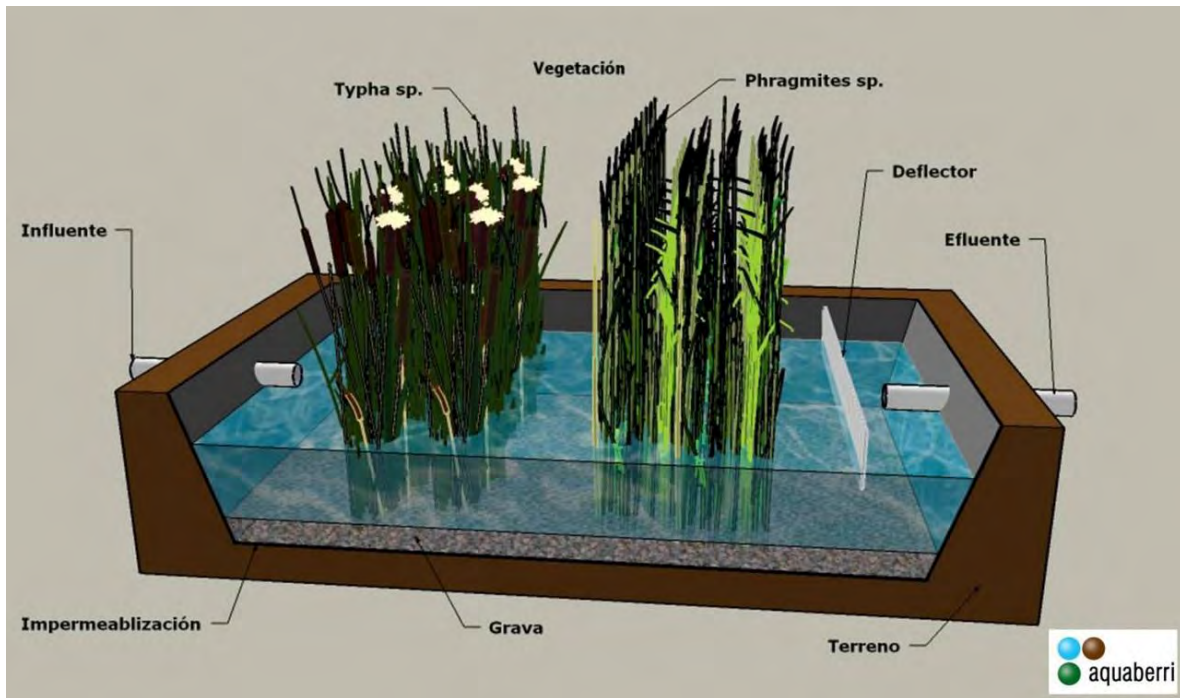


Figura 2. Humedal horizontal de flujo superficial (Aquaberri, 2013).

### 3.7. Humedal horizontal de flujo subsuperficial

Están diseñados específicamente para el tratamiento de algún tipo de agua residual, o su fase final de tratamiento, y está construido típicamente en forma de un lecho o canal que contiene un medio apropiado. Las principales ventajas de mantener un nivel subsuperficial del agua son la prevención de mosquitos y olores y la eliminación del riesgo de que el público entre en contacto con el agua residual parcialmente tratada. La profundidad del medio en estos humedales tiene un rango de 0.3 a 0.9 metros (Fig. 3). La vegetación emergente más comúnmente utilizada en este tipo de humedal incluye las espadañas y aneas (*Typha spp.*), los juncos (*Scirpus spp.*) y los carrizos (*Phragmites spp.*). Algunas ventajas de estos

humedales, es que son muy efectivos en la remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno, la Demanda Química de Oxígeno, los Sólidos Suspendidos Totales, los metales y algunos compuestos orgánicos refractarios de las aguas residuales domésticas. La remoción de nitrógeno y fósforo a bajos niveles es también posible, pero se requiere un tiempo de retención mucho mayor (EPA, 2000).

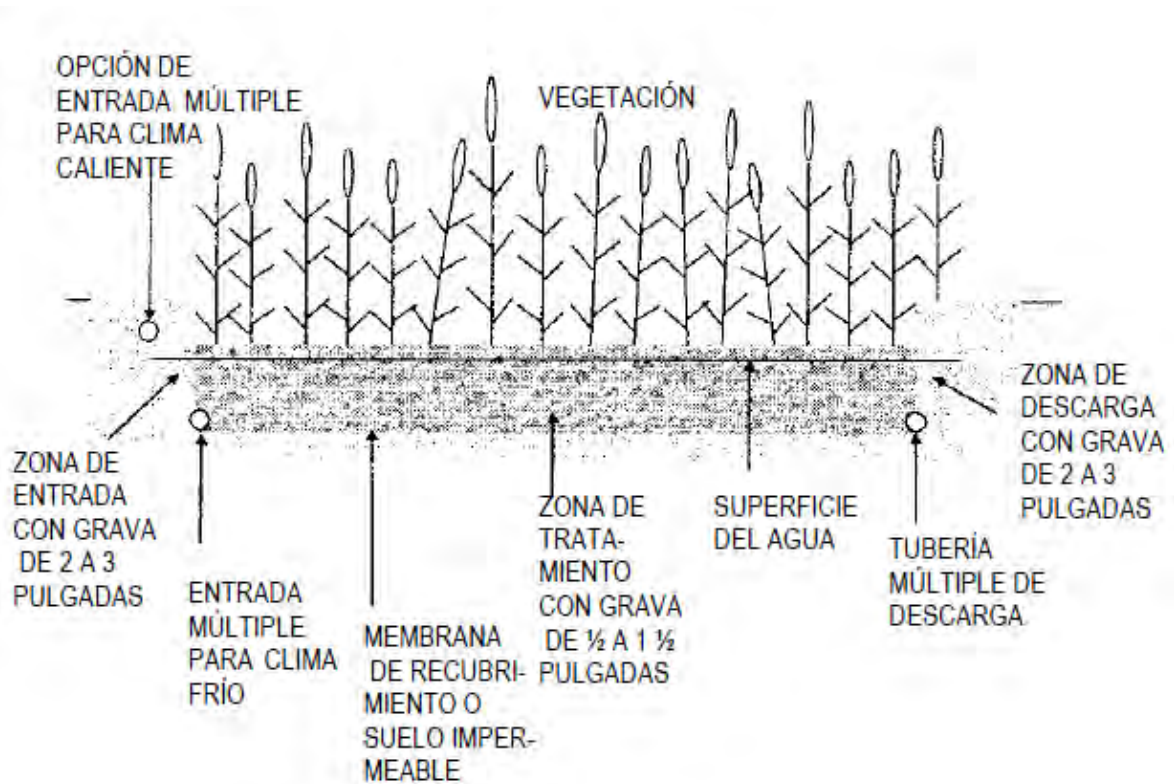


Figura 3. Humedal horizontal de flujo subsuperficial (EPA, 2000)

### 3.8. Humedales artificiales de flujo vertical

Este tipo de humedales reciben el agua residual de arriba hacia abajo, por medio de sistemas de tuberías, esta se infiltra en un sustrato inerte y se recogen al final del humedal por una red de drenaje. A diferencia del humedal subsuperficial de flujo horizontal, el sustrato está constituido por varias capas, encontrándose las más finas en la parte superior, aumentando el diámetro de la grava hacia abajo, para favorecer la aireación también se montan sistemas de chimeneas con salidas al exterior (Delgadillo, 2010). Este tipo de humedales tiene como característica

distintiva que presentan el metabolismo aerobio como el principal, además de que pueden soportar mayores cargas orgánicas que los de flujo horizontal y mayor remoción en la DQO (Fenoglio, 2000).

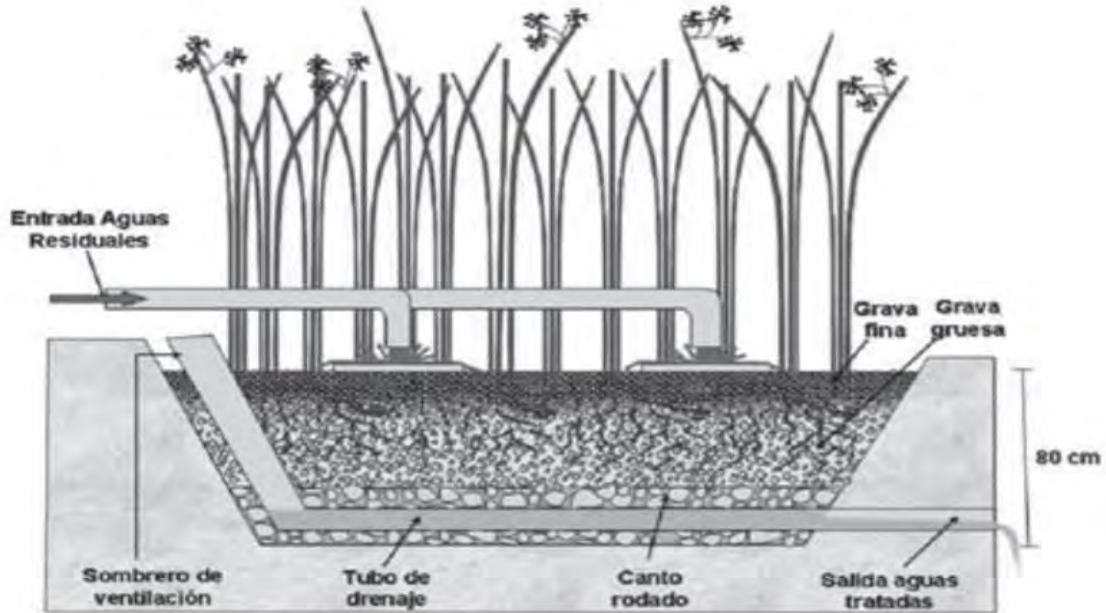


Figura 4. Humedal artificial de flujo vertical (Delgadillo,2010).

### 3.9. Sistema Unitario de Tratamiento del Agua, Nutrientes y Energía (SUTRANE)

El Sistema Unitario de Tratamiento del Agua, Nutrientes y Energía (SUTRANE) es una ecotecnología que consta de dos compartimentos iniciales de operación: la fosa de aguas grises (jabonosas) y la fosa de aguas negras. En ambas fosas se lleva a cabo un proceso de biodegradación; en la fosa de aguas grises, la biodegradación es aeróbica gracias a la acción del aire, posteriormente esta agua pasa a la trampa de aguas natadas. En esta trampa se encuentran plantas acuáticas como lirios. En la fosa de aguas negras hay un proceso de biodegradación anaeróbica, ya que es un depósito de sedimentación cerrado donde hay un incremento de temperatura y de presión, la cual es causada por acción de bacterias organoheterotróficas anaerobias facultativas. Estas fosas se construyen de ferrocemento, lo más cerca a las instalaciones de uso y consumo del agua, de esa manera disminuye el costo de tubería y mangueras de las líneas de distribución del agua y de los drenajes.

Además de un depósito donde se mezclan las aguas natadas y las aguas negras. Después de estos tratamientos pasan por un filtro biofísico el cual optimiza el proceso biodegradatorio de las aguas de desecho. Este filtro consta de dos o más canales impermeabilizados donde se bloquea toda la posibilidad de filtraciones. De acuerdo con el diseño original propuesto, estos canales de abajo hacia arriba se cubren con capas de piedra bola, gravilla, grava y arena exterior y se extiende una capa de tierra vegetal, en la cual, se siembran hortalizas y flores. Para finalizar se encuentra la fosa recolectora, la cual, es un depósito de ferrocemento a donde se van acumulando las aguas enriquecidas que no fueron asimiladas por las plantas de hortaliza o el cultivo de flores (Díaz *et al.*, 2012).

## 4. Antecedentes

La tecnología de tratamiento de aguas residuales fue especialmente estudiada por Kathe Seidel en la década de 1960 y de Reinhold Kickuth en la década de 1970 (Wu *et al.*, 2014)

Entre 1952 y 1956 Seidel llevó a cabo numerosos experimentos donde utilizó plantas para el tratamiento de varios tipos de contaminación de agua. En 1968 los humedales artificiales de flujo subsuperficial fueron creados en Hungría para preservar la calidad del agua de lago Balaton y dar tratamiento al agua residual (Lakatos, 1998 en Vymazal, 2008).

Los humedales artificiales de flujo libre fueron creados en Norte América con la ingeniería ecológica de los humedales naturales (Vymazal, 2008).

El avance de los humedales artificiales ha sido desarrollado en las últimas décadas del siglo veinte, como una alternativa para el tratamiento de aguas residuales de varios tipos, aunque en un principio solo se utilizaban para aguas de origen doméstico (Kadlec y Knight, 1996: Vymazal, 2008).

En 1980 los sistemas de humedales artificiales centralizaron la atención europea, especialmente en países como Alemania; fuera de este país Australia comenzó con la construcción de humedales artificiales (Geller y Bewachsene, 1982, Bucksteeg, 1986, Tischler *et al.*, 1985, en Vymazal 2011).

En cuanto a las macrofitas Vymazal (2011), señala que los géneros de *Typha*, *Sciperus*, *Phragmites*, *Phalaris*, *Iris*, etc, son de las más utilizadas para el tratamiento de aguas residuales en humedales construidos.

En total existen 64 sistemas de humedales individuales en todo el país, y 96 sistemas donde combinan el humedal artificial con algún otro tipo de tratamiento (tanque séptico y tanque Imhoff, etc.) Los humedales artificiales, únicamente aportan el 0.56% de  $L\ s^{-1}$  de caudal tratado a nivel nacional (Conagua, 2010).

Galván en el 2011 realizó un estudio en un humedal de flujo subsuperficial evaluando la remoción en lixiviados de nitrógeno amoniacal, las muestras de

lixiviados eran del bordo poniente de la ciudad de México. Para ello utilizó dos cisternas una con *Phragmites spp.* teniendo como sustrato grava y otra con el puro sustrato. Obtuvo una remoción del 90% en la cisterna con *Phragmites spp.* y grava con un tiempo de retención hidráulica de 20 días (Galván, 2011)

El SUTRANE de la Asociación Civil Mateo Quinto se construyó en 1993, con el fin de tratar aguas residuales domésticas de una manera ecológica. Éste fue construido como una tesis de arquitectura de la Universidad Iberoamericana de Puebla.

En el año 2014 como parte de una tesis de licenciatura de la carrera Biología Escamilla y Morgado (2014), evaluaron el funcionamiento del humedal de manera experimental con carrizo y alcatraz y comparando la calidad del agua con las Normas Oficiales Mexicanas NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997, iniciando con la limpieza general del SUTRANE y eliminado la vegetación ajena a este. Se midió el crecimiento de la vegetación del humedal y se hicieron pruebas de agua (DBO, oxígeno disuelto, coliformes totales, coliformes fecales, temperatura, conductividad eléctrica y pH). Para esto se calculó el tiempo de retención hidráulica. La temperatura mayor se registró en la fosa de aguas negras al igual que la conductividad eléctrica. El alcatraz presentó el mayor crecimiento, el pH se mantuvo dentro de la NOM-003-SEMARNAT-1997, la temperatura se mantuvo en promedio a 15°C, la concentración del oxígeno disuelto en el humedal fue baja correspondientes con la actividad microbiana. Se tuvo una remoción del 38% de la DQO en el humedal y la DBO<sub>5</sub> se mantuvo dentro de la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Dentro de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza se han desarrollado investigaciones en humedales construidos. Espinosa (2015) en evaluó el crecimiento vegetal de alcatraz y platanillo, la supervivencia de ambas macrofitas, donde el alcatraz registró 0 % de mortandad en el estudio, además del análisis de la calidad del agua donde en uno de los módulos del estudio la DBO tuvo reducciones del 46%, DQO 81%, 48% para fósforo soluble reactivo, 35.4 % para fósforo total, 50% para nitrógeno amoniacal, 44% de nitratos y 52% de nitritos; para el segundo módulo se tuvieron remociones de 90% para DBO, 70%DQO, 20%



nitrógeno amoniacal, 44% nitratos, 52% nitritos, 41%fósforo total y 62% para fósforo soluble reactivo.

Una tesis de licenciatura de la misma facultad elaborada por Alvarado (2016), se diseñó un humedal artificial en la granja didáctica “Dos puertas” esto debido a que el agua del rio se encontraba por encima de los límites máximos permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Cervantes y Mora (2013) evaluaron la calidad del agua en un humedal de flujo subsuperficial, la cual tenía como fin usos recreativos, comparando la calidad del agua con NOM-001-SEMARNAT-1996 del afluente (barranca Panacuale) y NOM-003-SEMARNAT-1997. La DBO rebasó el LMP de la primera norma, mientras que los sólidos totales se encontraron por debajo de lo establecido por la misma. De acuerdo con la y NOM-003-SEMARNAT-1997 el agua si se pudo utilizar con para recreación.

Ozalde (2016) uso el alcatraz y anturio como tratamiento secundario de aguas grises en la Ciudad de México, donde los resultados registrados estuvieron por debajo de los LMP de la NOM-003-SEMARNAT-1997 por lo que puede ser utilizada con contacto directo para el público.

## 5. Planteamiento del problema

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2015), al terminar el año 2014 estaban en funcionamiento 2337 plantas de tratamiento públicas operando en el país, con capacidad de  $151883.43 \text{ L s}^{-1}$  que daban tratamiento a solo  $111253.53 \text{ L s}^{-1}$  (52.72%) del agua residual generada y alcantarillada en los sistemas municipales de alcantarillado en el país. A pesar de la planta de tratamiento de aguas residuales PTAR Atotonilco, que es una de las más grandes del mundo con capacidad para tratar  $9000 \text{ L s}^{-1}$  del agua residual proveniente del Valle de México (CONAGUA, 2015), la mayor carga hidráulica que soporta es de  $35000 \text{ L s}^{-1}$ , correspondiente al 23.04 % del agua residual generada.

La ciudad de Puebla contaba hasta el año 2014 con 434 mil 062 habitantes (INEGI, 2010) pero está catalogada como baja en disponibilidad de agua y con déficit para satisfacer las necesidades del sector urbano. Los principales problemas del estado con respecto al recurso hídrico son la apropiación, una mala distribución, mayor demanda incrementada en los últimos años, además de que es un recurso limitado y que las cunecas ya se encuentran contaminadas y en degradación (López, 2014).

El estado de Puebla cuenta con 78 de estas, sin embargo, en el municipio de Amozoc de Mota no cuenta con ninguna de ellas. según el resumen del inventario nacional de plantas municipales de tratamiento de aguas residuales en operación Dic-15 (CONAGUA, 2015).

La Asociación Civil Mateo Quinto, tiene como objetivo social el dar hogar temporal o permanente a niñas y jóvenes con discapacidad intelectual y en estado de abandono. Esta asociación cuenta con un terreno donde se ubican casas habitación, así como unidades de producción y de conservación. Sin embargo, desde su fundación de más de 30 años, esta no cuenta con sistema de agua potable ni de drenaje. Por lo que han instalados sistemas de captación de agua de lluvias y una unidad para el tratamiento de aguas residuales de tipo doméstico que descarga el agua tratada a pastos de conservación y árboles frutales.

Aunque la planta de tratamiento denominada SUTRANE está en operación, al momento sigue presentando una depuración limitada, sobre todo por altos niveles en la demanda de oxígeno y el total de coliformes fecales, debido a la regulación del tiempo de retención hidráulica del humedal, por lo que se han implementado diferentes estrategias para mejorar la calidad del agua tratada como el empleo de cultivos mixtos de macrofitas en el humedal de flujo subsuperficial.

## **6. Justificación**

en la Asociación Civil Mateo Quinto, las aguas crudas domésticas son vertidas a un SUTRANE el cual consta de un humedal de flujo subsuperficial que da tratamiento al agua por medio de macrofitas y comunidades microbianas asociadas a sus rizomas y raíces; las cuales participan en la asimilación de nutrientes, degradación de la materia orgánica, en ciclos biogeoquímicos como la nitrificación, desnitrificación y amonificación. Para mejorar la calidad del agua se plantea la utilización de cultivos mixtos de macrofitas (espadaña, alcatraz, papiro) las cuales se ha demostrado en estudios previos (Vymazal, 2011, Hadad et al., 2006, Belmont y Metcalfe, 2003 y Calheiros *et al.*, 2015), que por sus características favorecen una mejor depuración del agua residual, la cual podría ser empleada para el riego de árboles frutales (duraznos) y pastos de conservación al interior de la misma asociación civil.

## 7. Hipótesis

Se espera tener un tratamiento más eficiente de agua residual y por ende una mejor calidad de agua en las canaletas con cultivos mixtos de alcatraz-espadaña que en las canaletas con alcatraz-papiro con base en las diferencias en la estructura y forma vegetal, así como sus tipos de rizoma y las características de las raíces que desarrollan.

## 8. Objetivo general

Evaluar la calidad del agua en un humedal de flujo subsuperficial alimentado con agua residual tratada a través de un Sistema Unitario de Tratamiento y Reúso de Agua Nutriente y Energía (SUTRANE) con cultivos mixtos de *Zantedeschia aethiopica-Cyperus papyrus* y *Zantedeschia aethiopica-Typha domingensis*.

### 8.1. Objetivos particulares

Determinar y comparar la calidad del agua en los diferentes compartimentos del SUTRANE con respecto al agua tratada del humedal de flujo subsuperficial.

Evaluar la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales domésticas al emplear cultivos mixtos de *Zantedeschia aethiopica-Cyperus papyrus* y *Zantedeschia aethiopica-Typha domingensis*.

Comparar la calidad de agua obtenida con el tratamiento de aguas residuales en el humedal de flujo subsuperficial con la NOM-001-SEMARNAT-1993, NOM-003-Semarnat-1996, NOM-CCA/032-ECOL/1993.

Proponer recomendaciones en la modificación de la infraestructura del SUTRANE y/o en el diseño del humedal de flujo subsuperficial tendiente a la optimización del tratamiento de agua residual doméstica producida por la Asociación Civil.

## 9. Zona de estudio

El humedal de flujo subsuperficial donde se realizó la presente investigación pertenece a La Asociación Civil Mateo Quinto, la cual se ubica en el municipio de Amozoc en el estado de Puebla, en el kilómetro 14.5 de la carretera federal Puebla-Tehuacán. En las coordenadas 19°02'56'' latitud norte y 98°04'02.39'' longitud oeste a 2320 m snm (Escamilla y Morgado, 2014).



Figura 5. En el polígono azul se ubica la Asociación Civil Mateo Quinto, en el Municipio de Amozoc, Puebla.

### 9.1. Orografía

En el municipio confluyen tres regiones morfológicas: al norte, las estribaciones inferiores de la Malinche; al centro el Valle de Tepeaca, y al sur la Sierra de Amozoc (Enciclopedia de Delegaciones y Municipios de Puebla, 2015).

### 9.2. Clima

El municipio se localiza dentro de la zona de los climas templados del Valle de Tepeaca; identificándose el clima templado subhúmedo con lluvias en verano (García, 1988); que se presenta en una franja latitudinal del sur del municipio predominando en las primeras estribaciones de la Malinche; y el clima semifrío

subhúmedo con lluvias en verano presentándose en las zonas más altas del volcán la Malinche, excluyendo la cumbre que presenta clima frío.

### **9.3. Hidrografía**

El municipio pertenece a la cuenca del Atoyac, una de las más importantes del Estado (Enciclopedia de Delegaciones y Municipios de Puebla, 2015).

## **10. Método**

### **10.1. Trabajo en campo**

#### **10.1.1. Trabajo en el SUTRANE**

El Sistema Unitario de Tratamiento y Reúso de Agua Nutriente y Energía (SUTRANE) habilitado por un humedal de flujo subsuperficial.

El SUTRANE, cuenta con un depósito de aguas grises (jabonosas) de 1.5 m x 1.5 m, que es el agua residual doméstica procedente de la cocina y del sistema de lavado de ropa, una fosa de trampa de grasas 1.5 m x 3 m el cual contiene lirio acuático para formar una trampa de densidad de aceites, tiene una caída de aguas negras, provenientes de los baños (excusados), las cuales pasan por un sedimentador totalmente cerrado construido de ferrocemento de 10 m x 1.5 m y una mezcladora que es la entrada hacia el humedal de flujo subsuperficial de 0.5 m x 5.6 m, este cuenta con siete canaletas de 10 m de largo x 0.8 m de ancho y 0.8 m de profundidad que cuentan con una cisterna para almacenar el agua al final de la canaleta y por último una cisterna de salida de la cual el agua se riega hacia pastos de conservación y árboles frutales (Figura 6).

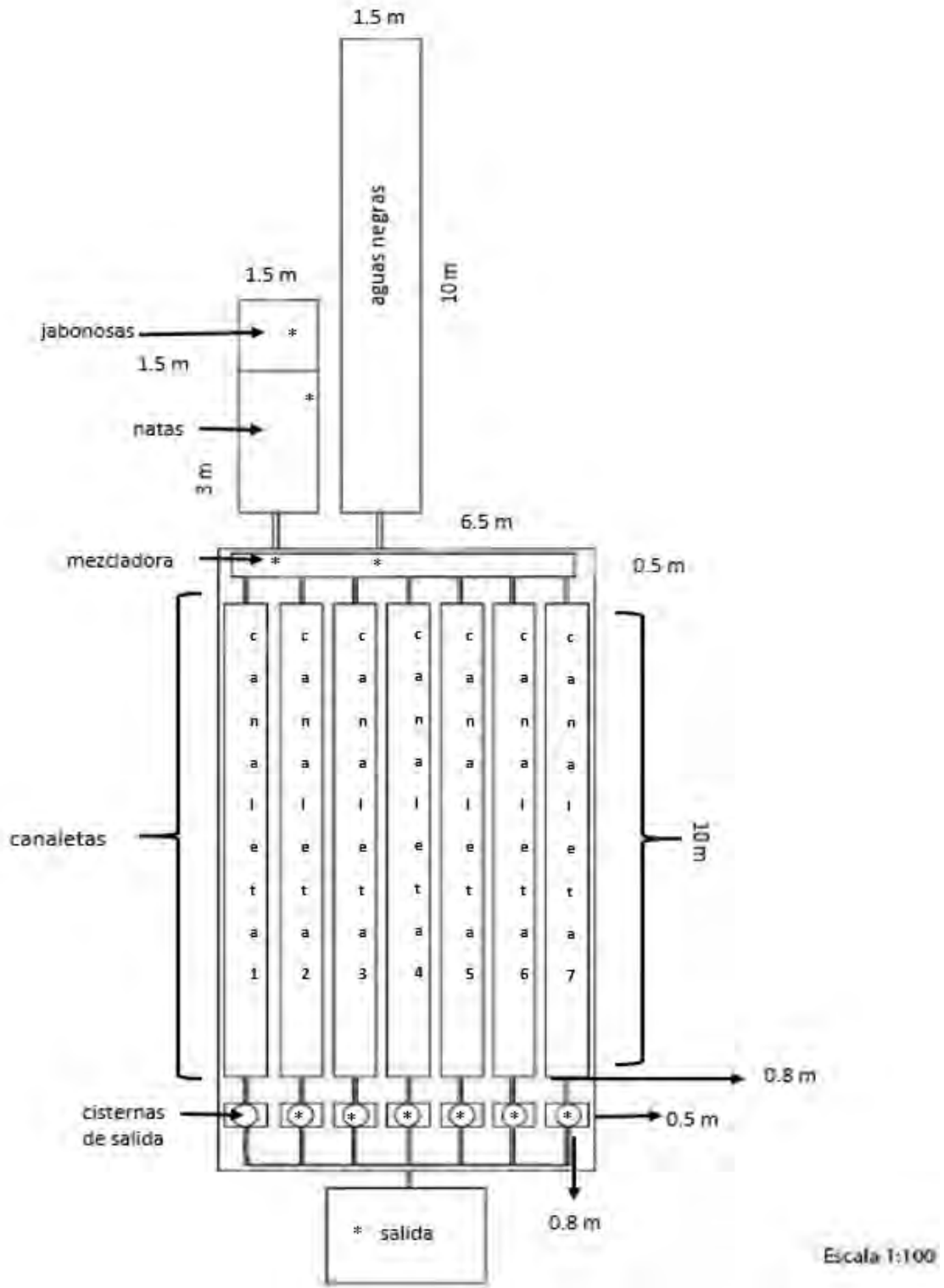


Figura 6. SUTRANE de la A. C. Mateo Quinto tomado y editado de Escamilla y Morgado (2014). El \* es el punto de muestreo en el sistema.

En el humedal artificial de flujo subsuperficial se renovó el tezontle que se tenía previo al estudio. Como se muestra en la Figura 7 En tres de ellas (canaletas 1, 3 y 5) se introdujeron ocho alcatraces (*Zantedeschia aethiopica*) con tres papiros (*Cyperus papyrus*) distribuidos estos últimos al inicio, medio y al final de la canaleta, en otras tres (canaletas 2, 4 y 6) se colocaron ocho alcatraces con tres espadañas (*Typha domingensis*) con la misma distribución, y en una se plantaron diez alcatraces que servirán como testigo (canaleta 7)

Se realizó poda mensual de macrofitas para eliminar el exceso de biomasa vegetal para tener más control en el flujo del agua. Asimismo, se realizó limpieza de residuos sólidos de la fosa de aguas jabonosas y natas.



Figura 7. Cultivos en el humedal de flujo subsuperficial.

#### 10.1.2. Parámetros físicos y químicos en el SUTRANE

*In situ* mensualmente se realizaron las siguientes pruebas físicas y químicas del agua (Cuadro 1):



Cuadro 2. Parámetros físicos y químicos realizados en el SUTRANE *In situ*.

Parámetro	Equipo
Temperatura	Termómetro de mercurio de -20°C a 150°C
Oxígeno disuelto (OD)	Oxímetro marca Hach con $\pm 0.05$ mg/L de precisión

### 10.1.3. Pruebas químicas a las muestras de agua

Mensualmente *In situ*, de marzo a noviembre del 2016 se tomaron muestras de manera directa en la superficie de la biopelícula de agua en cada uno de los depósitos y en las cisternas de salida del humedal artificial, utilizando botellas de polietileno con capacidad de 1 L, las cuales se conservaron a 4 °C. A estas muestras se les tomaron las siguientes pruebas químicas de calidad del agua (Cuadro 2).

Cuadro 3. Parámetros químicos realizados en campo para las muestras de agua del SUTRANE *lin situ*.

Parámetro	Método / Equipo	Referencia
pH	Potenciómetro de pluma marca PHMETER; con una precisión de $\pm 0.1$	
Conductividad eléctrica	multiparámetro marca Corning, con una precisión de $\pm 0.01$ mS $\text{cm}^{-1}$ , $\pm 0.01$ mg $\text{L}^{-1}$	
DBO <sub>5</sub>	Oxímetro marca Hach con $\pm 0.05$ mg $\text{L}^{-1}$ de precisión	NMX-AA-028-SCFI-2001
Dureza total y dureza de calcio	Método de titulación con EDTA Método complejimétrico	A.P.H.A. 2012
Alcalinidad total total	Método de indicadores	A.P.H.A. 2012

## 10.2. Trabajo de laboratorio

En laboratorio se determinó la concentración de nutrimentos, además de pruebas bacteriológicas y químicas (Cuadro 3).

Cuadro 4. Pruebas químicas realizadas en laboratorio a las muestras de agua del SUTRANE.

Parámetro	Método / Equipo	Referencia
DQO	Reflujo abierto	NMX-AA-030/1-SCFI-2012
Fósforo soluble reactivo (FSR)	cloruro estanoso	A.P.H.A. 2012
Fósforo total (FT)	fosfomolibdato con digestión	A.P.H.A. 2012
Amonio	método de fenol	A.P.H.A. 2012
Nitritos	azul de indofenol	A.P.H.A. 2012
Nitratos	ácido fenoldisulfónico	A.P.H.A. 2012
Coliformes totales y coliformes fecales	Número Más Probable (NMP)	NMX-AA-42-1987

## 10.3. Trabajo de gabinete

### 10.3.1. Tiempo de retención hidráulica (TRH)

Para la determinación del flujo promedio del humedal se aplicó la siguiente ecuación (Reed *et al.*, 1995)

$$Q = V * U$$

Donde:

Q= Flujo promedio a través del humedal ( $m^3 d^{-1}$ )

V= flujo de agua residual generado por persona al día<sup>-1</sup>

U= número de usuarios de agua

Para estimar el tiempo de retención hidráulica se empleó la siguiente ecuación tomada en Reed (1995).

$$TRH = \frac{L * W * d * n}{Q}$$

Donde:

L= longitud del estanque (m)

W= Ancho del estanque (m)

D= profundidad del estanque

n= porosidad o espacio utilizado por el agua para fluir a través del humedal

### 10.3.2. Determinación de la concentración de la DBO<sub>5</sub>

Se estimó la concentración de la DBO<sub>5</sub> con la siguiente ecuación

$$DBO_5 = \frac{ODi \text{ mg } L^{-1} - OD_5 \text{ mg } L^{-1}}{\% \text{ de la dilución expresado en decimales}}$$

Donde:

ODi= Concentración de oxígeno disuelto inicial

OD<sub>5</sub>= Concentración de oxígeno disuelto al quinto día

### 10.3.3. Determinación de la concentración de la DQO

La concentración de DQO fue medida con la siguiente ecuación:

$$\gamma(DQO) = \frac{(V_{FASb} - V_{FASm}) * C_{FAS} * M_O * v_0}{V_m}$$

Donde:

V<sub>FASb</sub> = Volumen del sulfato ferroso usado contra el blanco de la prueba

$V_{FASm}$  = Volumen del sulfato ferroso usado en la porción de prueba

$C_{FAS}$  = [ ] de la porción de sulfato ferrosoamoniaco utilizada en la medición

$M_o$  = Masa molar de un átomo de oxígeno

$V_o$  = Número estiquiométrico =0.5

$V_m$  = Volumen de la muestra

$M_o * V_o = 8000 \text{ mg mol}^{-1}$

#### **10.3.4. Base de datos**

Los datos fueron procesados en una base de datos de Microsoft Excel 2016 donde a los resultados obtenidos se les realizó un análisis gráfico donde se mostró las cantidades o concentraciones dependiendo el caso. Se compró la calidad del agua entre los tratamientos y el agua en los depósitos anteriores a la entrada del humedal artificial, esto con pruebas estadísticas primero se realizó la prueba de Kolmogorov-Smirnov para conocer si los datos presentaban normalidad, posteriormente se realizó la prueba de ANOVA para ver si existían diferencias significativas, y la prueba de Tuckey para mostrar entre cuales depósitos y tratamientos existían las diferencias con el programa estadístico STAT GRAPHICS centurion XVI.I versión 16.01.0011. Para ello se realizaron gráficas de medias con desviación típica en el progr versión 1386 ama estadístico R 386 3.3.2 con la paqueteria Rcmdr.

Los datos obtenidos de las pruebas de la calidad de agua se confrontaron con las Normas Oficiales Mexicanas y las de sector público NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-003-SEMARNAT-1997 y NOM-CCA/032-ECOL/1993.

## 11. Resultados

### 11.1. Tiempo de retención hidráulica (TRH)

Para determinar el tiempo de retención hidráulica se consideró el gasto promedio de las personas que habitan en la comunidad ( $0.15\text{m}^3$  por persona  $\text{dia}^{-1}$ ). Por lo que:

Valor de flujo promedio (Q) considerado para el humedal de flujo subsuperficial

$$Q = (20 \text{ personas}) (0.15 \text{ m}^3 \text{ por persona } \text{dia}^{-1})$$

$$Q = 3 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$$

Este flujo dividido entre el número total de canaletas:

$$Q = 0.42 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$$

Considerando las dimensiones de las canaletas del humedal se estableció el tiempo de retención hidráulica teórico:

La porosidad del tezontle es de 0.53 para medir el TRH, de acuerdo con lo señalado por Zurita et al. (2009), entonces:

$$\text{TRH} = ((10 \text{ m}) (0.80 \text{ m}) (0.80 \text{ m}) (0.53)) / (0.42 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}) = 8 \text{ días por canaleta}$$

### 11.2. Temperatura

La temperatura promedio en el humedal tuvo pocas diferencias, predominando  $18^\circ\text{C}$  para los tratamientos, mientras que el depósito de aguas negras y la salida del humedal registraron la temperatura promedio menor con  $17.5^\circ\text{C}$  (Figura 8).

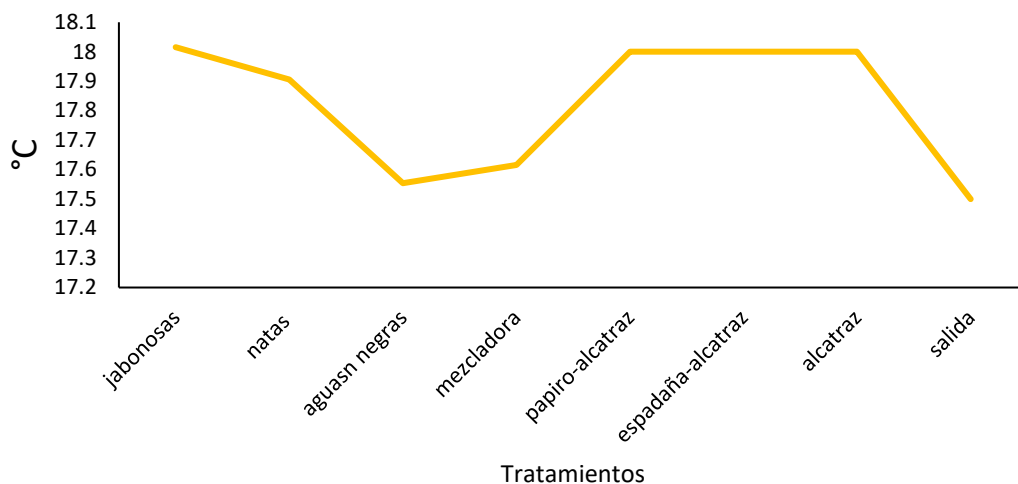


Figura 8. Promedio de temperatura del agua en el SUTRANE.

El análisis estadístico con la prueba de Kolmogórov-Smirnov arrojó que todos los parámetros que se tomaron fueron normales con el 95% de confianza.

### 11.3. Oxígeno disuelto

La concentración de oxígeno disuelto del sistema fue bajo en general; la concentración promedio más alta se presentó en el tratamiento de papiro-alcatraz ( $0.45 \text{ mg L}^{-1}$ ), mientras que, dentro de los tratamientos la concentración más baja se dio en el testigo (alcatraz) con  $0.080 \text{ mg L}^{-1}$ . Las aguas jabonosas presentaron la mayor concentración de oxígeno en el agua previa al tratamiento biológico ( $0.40 \text{ mg L}^{-1}$ ) (Figura 9).

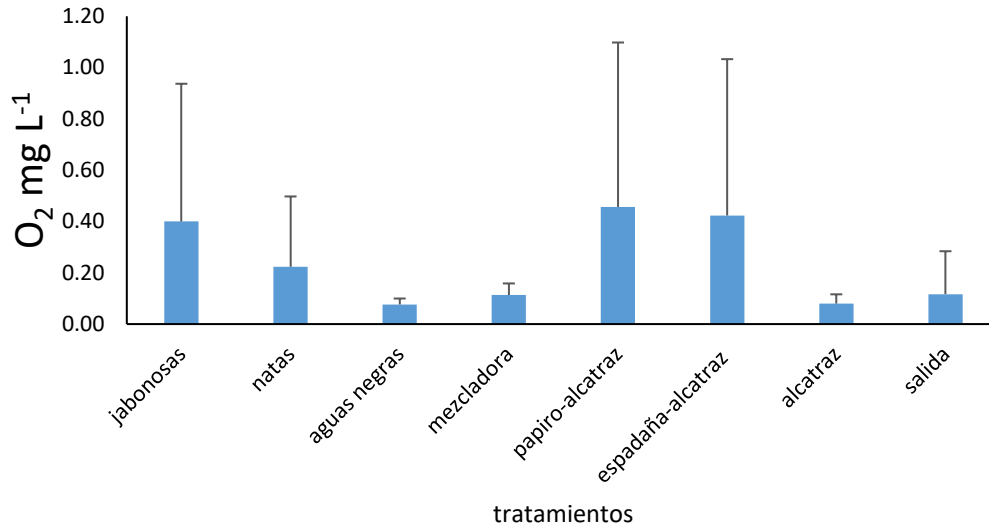


Figura 9. Concentración promedio de oxígeno disuelto en el SUTRANE.

#### 11.4. pH.

El pH del sistema no tuvo mucha variación, presentando promedios arriba de 7, por lo que el agua se cataloga entre neutra a poco alcalina. El valor promedio más alto de pH para el agua antes de entrar al humedal es de la mezcladora (7.58), mientras que en las aguas natadas el pH tiene el promedio más bajo (7.16). Dentro de los tratamientos el testigo fue el que registró el mayor pH con 7.8 y para los tratamientos de papiro-alcatraz y espadaña-alcatraz, los valores promedio de pH fueron de 7.7 (Figura 10).

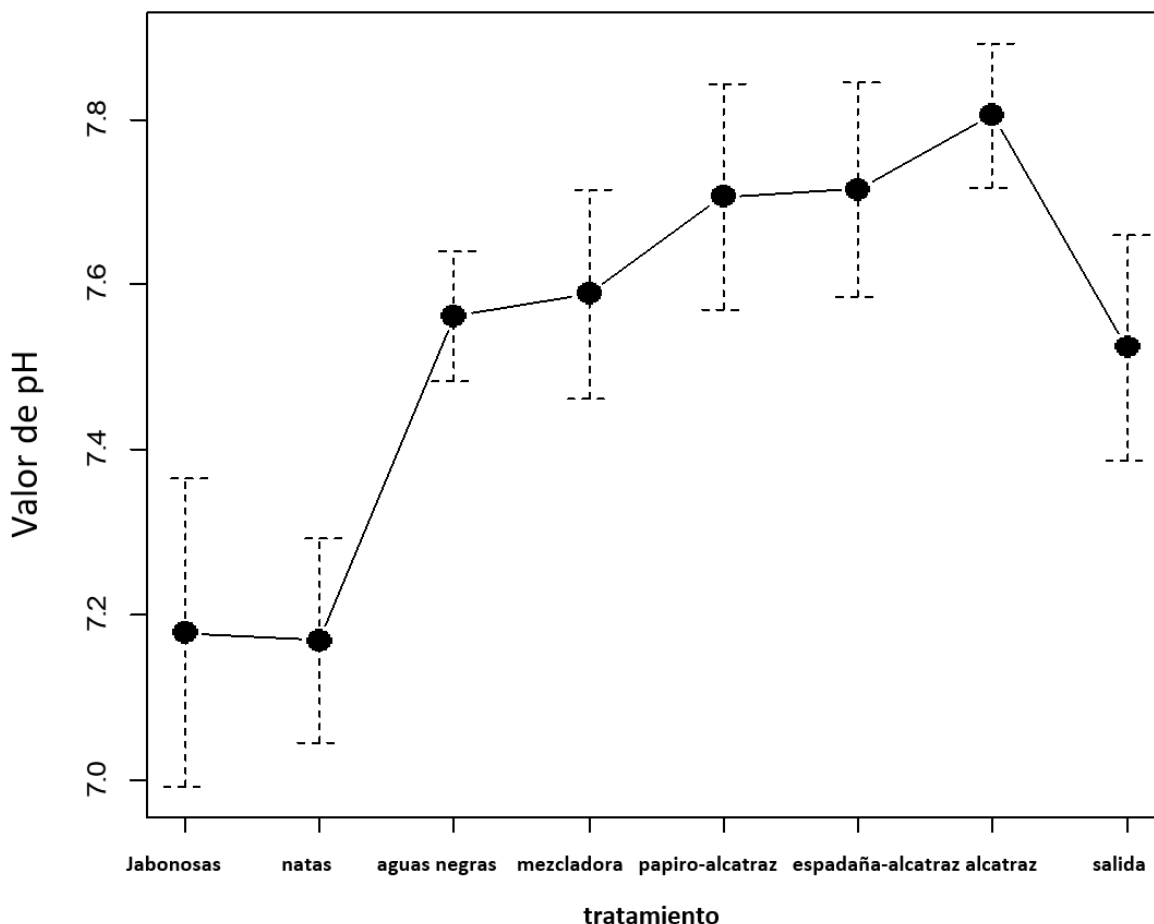


Figura 10. Promedio de pH en el SUTRANE.

De acuerdo con el análisis de ANOVA en las aguas jabonosas se presentaron diferencias significativas ( $F_{(7,61)}=3.18$ ,  $P=0.006$ ) con respecto a los tratamientos (Figura 10), esto también pasa con las aguas natadas, mientras que en la entrada del humedal y entre los tratamientos biológicos no hay diferencias significativas entre ellas.

### 11.5. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica del agua disminuyó hacia los tratamientos en el humedal. Las aguas negras registraron el valor promedio más alto de conductividad eléctrica en el SUTRANE ( $1933.25 \mu\text{S cm}^{-1}$ ). En la entrada del humedal artificial (la mezcladora) registró un promedio de  $1799.8 \mu\text{S cm}^{-1}$ , el tratamiento papiro-alcatraz el menor registro de los tres tratamientos ( $1426.9 \mu\text{S cm}^{-1}$ ), el alcatraz fue el que tuvo el valor promedio más elevado de los tres con  $1506 \mu\text{S cm}^{-1}$  (Figura 11).



El análisis de ANOVA demostró que al 90% de confianza ( $(F_{(7,61)} P=0.002)$ ) presentan diferencias significativas. Con el análisis de medias se observó que existen diferencias significativas entre la entrada del humedal y los tratamientos, pero no entre estos (Figura 11).

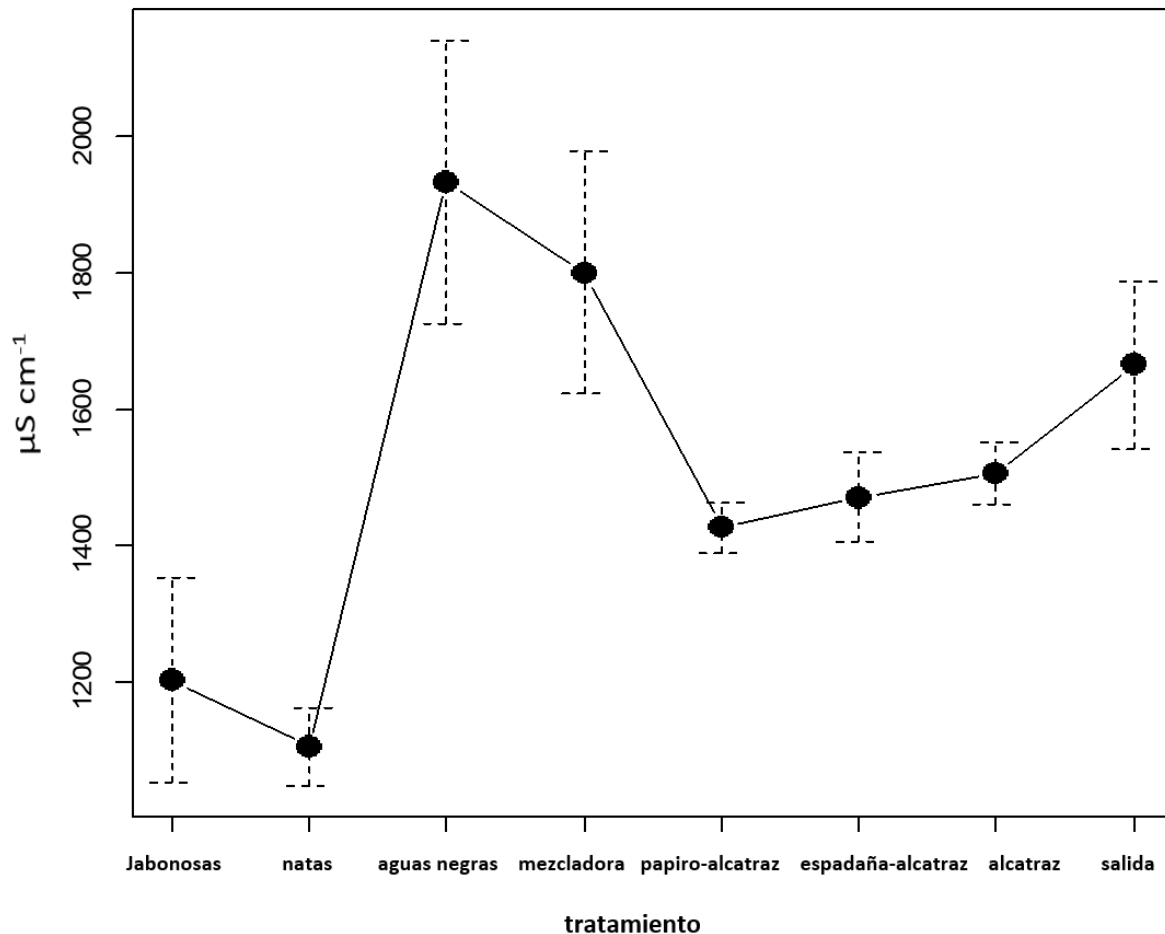


Figura 11. Promedio de la conductividad eléctrica en el SUTRANE durante el periodo de estudio. La conductividad eléctrica disminuyó dentro del humedal artificial, siendo el tratamiento de papiro-alcatraz (20.7%) la disminución más alta de todas. En el tratamiento espadaña-alcatraz el porcentaje de reducción fue de 18.2 % (Figura 12).

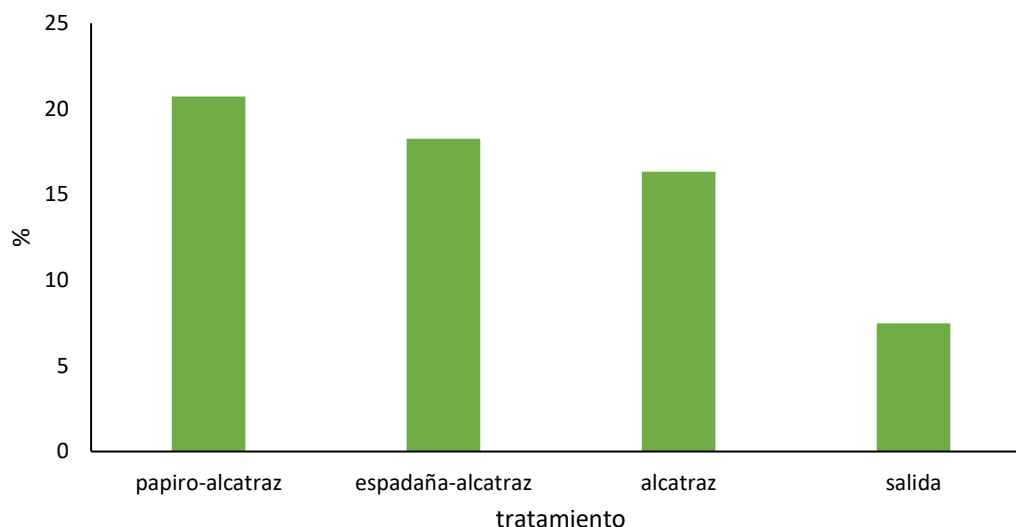


Figura 12. Porcentaje de disminución de la conductividad eléctrica en el humedal artificial.

### 11.6. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>).

El promedio de la concentración de la DBO<sub>5</sub> en la entrada del humedal registró 403.5 mg L<sup>-1</sup>, mientras que para el tratamiento que contenía alcatraz tuvo la menor concentración de este parámetro (251.19 mg L<sup>-1</sup>). La concentración promedio para el tratamiento de alcatraz-papiro que se obtuvo en el estudio fue el más alto dentro del humedal (274.27 mg L<sup>-1</sup>). El tratamiento de alcatraz-espadaña tuvo la concentración más baja con 250 mg L<sup>-1</sup> (Figura 13).

El análisis de ANOVA constató que hubo diferencias significativas al 90% ( $\alpha=0.10$ ) de confianza ( $p=0.065$ ). El diagrama de medias muestra que hay diferencias significativas entre las aguas negras con respecto a todos los tratamientos y la salida y las aguas jabonosas con los tratamientos de espadaña-alcatraz y el testigo (Figura 13). No se mostró diferencias significativas entre la entrada del humedal con respecto a los tratamientos y la salida.

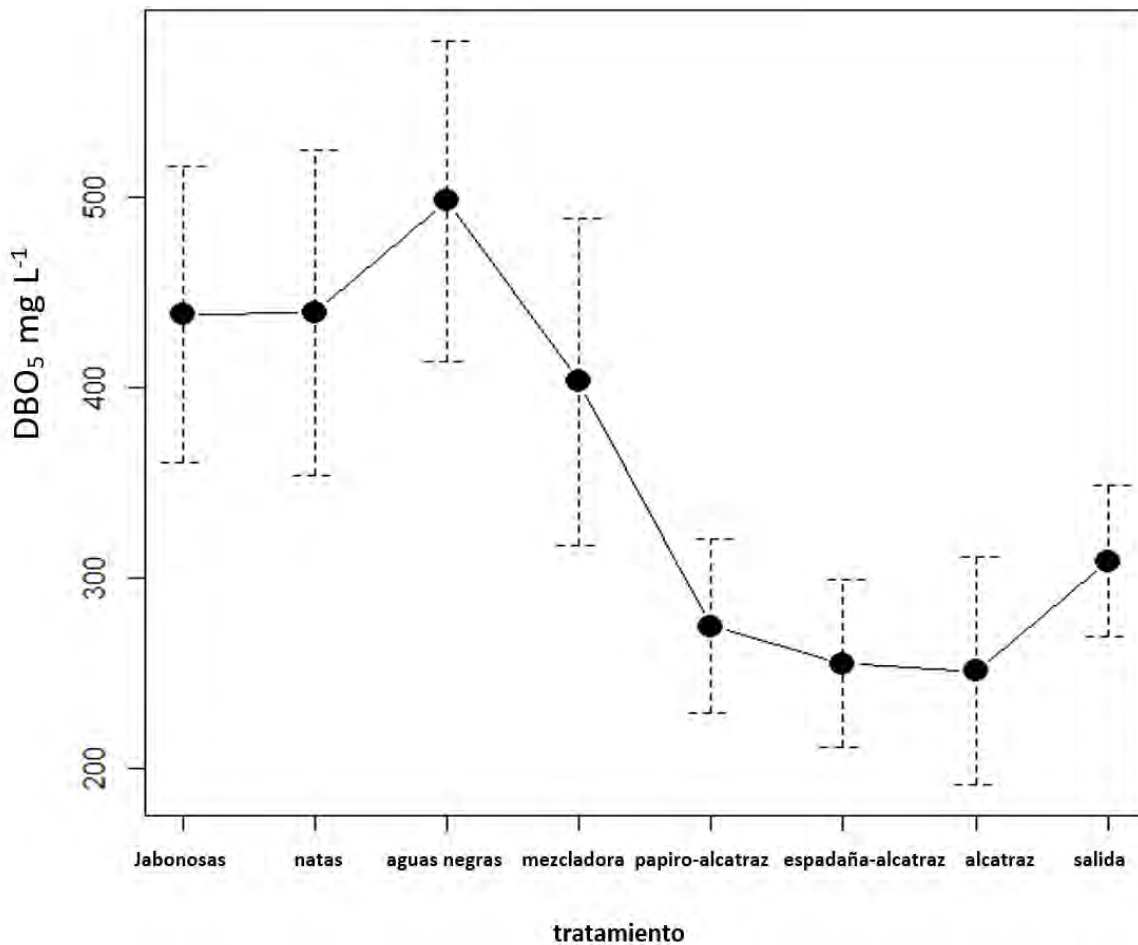


Figura 13. Concentración promedio de DBO<sub>5</sub> en el SUTRANE.

Con respecto a la entrada del humedal de flujo subsuperficial, el tratamiento de espadaña-alcatraz registro la mayor remoción con 36.71%, El tratamiento de papiro-alcatraz tuvo 31.83% mientras que en la salida del humedal hubo una acumulación de materia orgánica, por lo que tuvo la remoción menor con 13.86% (Figura 14).

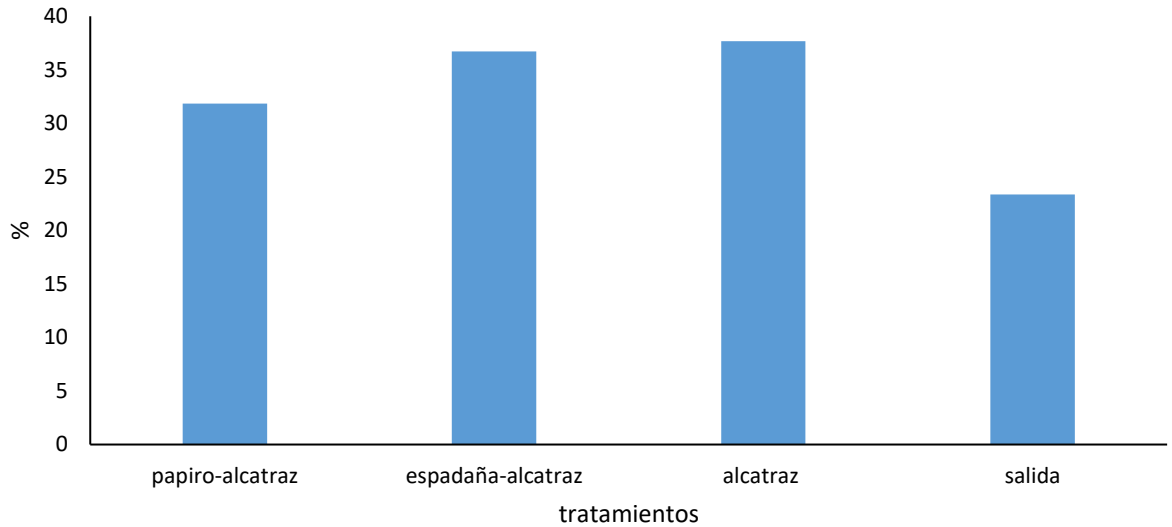


Figura 14. Porcentaje de remoción de la DBO<sub>5</sub> en el humedal.

### 11.7. Demanda Química de Oxígeno (DQO).

En la figura 15 se muestra el promedio de la DQO para la entrada del humedal fue de la más alta de todo el SUTRANE ( $976 \text{ mg L}^{-1}$ ), mientras que en los tratamientos disminuyó la concentración de este parámetro, donde el tratamiento espadaña-alcatraz obtuvo la concentración más baja con  $270.25 \text{ mg L}^{-1}$ ; el tratamiento de papiro-alcatraz fue el que tuvo la concentración promedio más alta en el estudio con  $318 \text{ mg L}^{-1}$ .

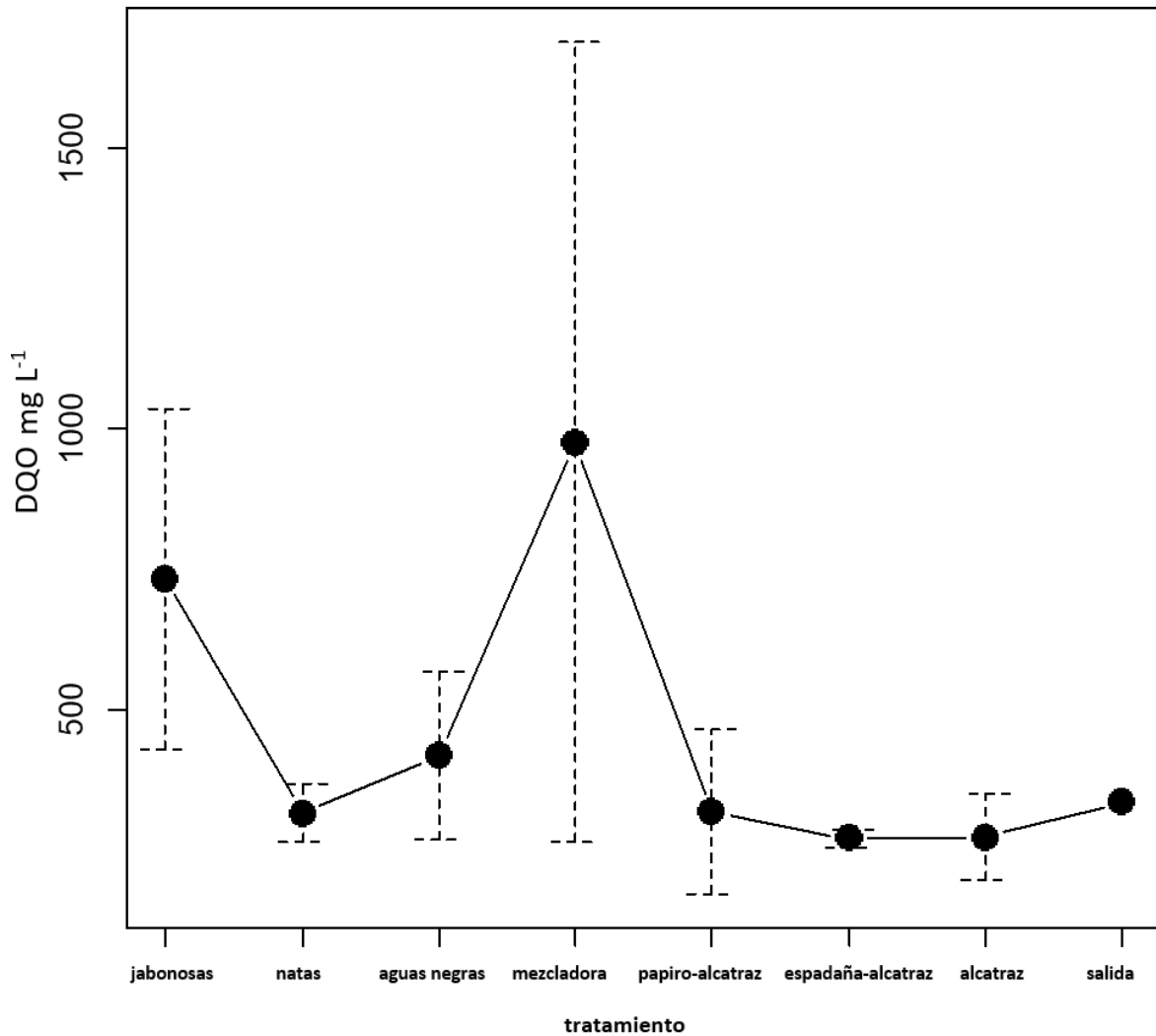


Figura 15. Concentración promedio de la DQO en el SUTRANE.

A pesar de que la prueba de Kolmogorov-Smirnov demostró que para este parámetro todos los compartimentos del SUTRANE, así como los tratamientos del humedal artificial fueron normales, con 90% de confianza, la homocedasticidad de los datos no se cumple para algunos casos (el análisis de varianza de Levene) (Cuadro 4).

Cuadro 5. Valor de P- value en la prueba de Levene para DQO

Tratamientos (comparación)	P- value
Jabonosas / natas	0.0045
Jabonosas / pairo-alcatraz	0.04
Jabonosas / alcatraz	0.035
Natas / mezcladora	0.0002
Mezcladora / pairo-alcatraz	0.009
Mezcladora / espadaña alcatraz	0.02
Mezcladora / alcatraz	0.002

Por lo que se usó la prueba de Kruskal-Wallis (KW =0.8) donde no se encontraron diferencias significativas al 90% de confianza (Figura 16). Asimismo, no se observan diferencias significativas con el análisis de cajas múltiples con muesca para todos los compartimentos del SUTRANE. Sin embargo, se registraron la presencia de casos extraordinarios en las aguas jabonosas, negras, mezcladora y pairo. Siendo particularmente para la mezcladora el valor máximo registrado.

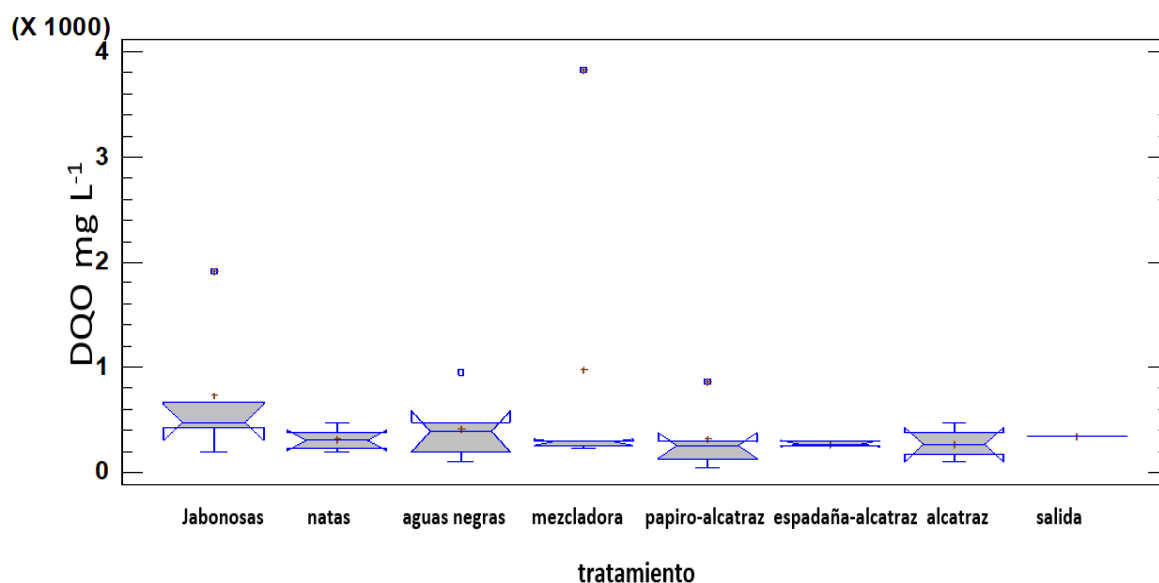


Figura 16. Diagrama de cajas múltiples para DQO.

El tratamiento espadaña-alcatraz fue el que registró una mayor remoción de DQO con 72.3, mientras que el tratamiento con pairo fue el que obtuvo la menor

remoción con 65.8%. En la salida de humedal tiene 72.1% de remoción, lo cual indica que aún hay una depuración de materia orgánica (Figura 17).

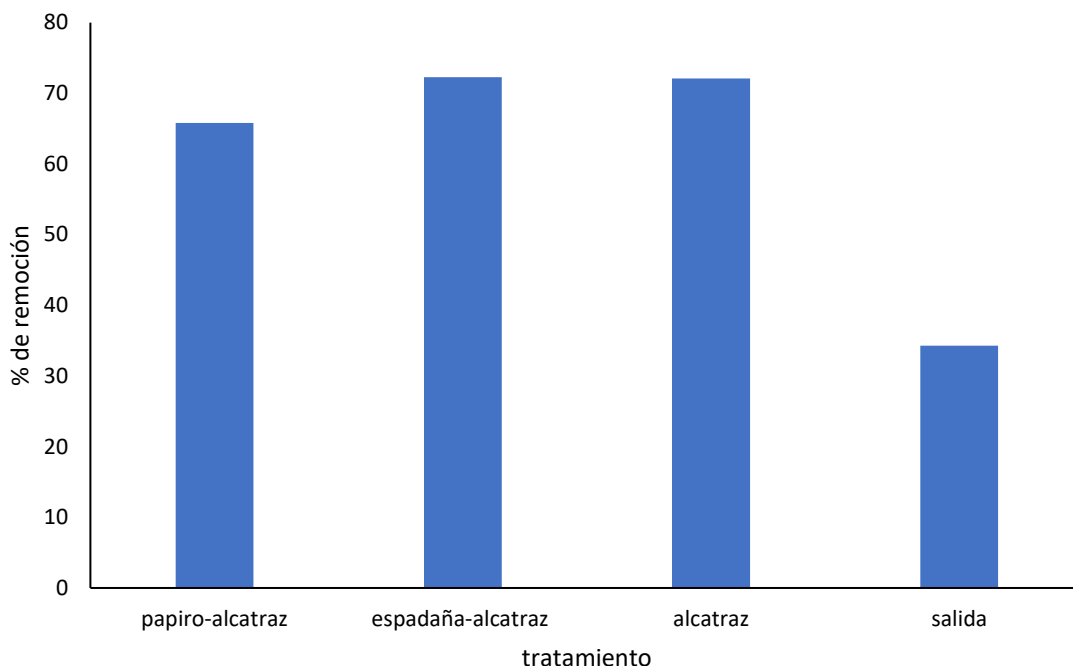


Figura 27. Porcentaje de remoción de la DQO en el humedal

### 11.8. Alcalinidad.

La alcalinidad total estuvo dada por aniones de  $\text{HCO}_3^-$ , durante todo el periodo de estudio. Las aguas negras presentaron la mayor concentración promedio de  $\text{HCO}_3^-$  ( $807.14 \text{ mg L}^{-1}$ ), dentro de los tratamientos, el testigo fue en donde se registró la menor concentración de alcalinidad promedio con  $622.66 \text{ mg L}^{-1}$ , hacia la salida la concentración promedio de  $632.5 \text{ mg L}^{-1}$  (Figura 18).

Con la prueba de ANOVA al 90% de confianza ( $F_{(7,55)} P=0.0.19$ ) se mostró que hay diferencias significativas. Con la prueba de Tuckey al 90% de confianza estas se encontraron entre las aguas jabonosas y todos los demás compartimentos del sistema excepto con las aguas natadas. Entre la entrada del humedal con los tratamientos no hay diferencias significativas (Figura 18).

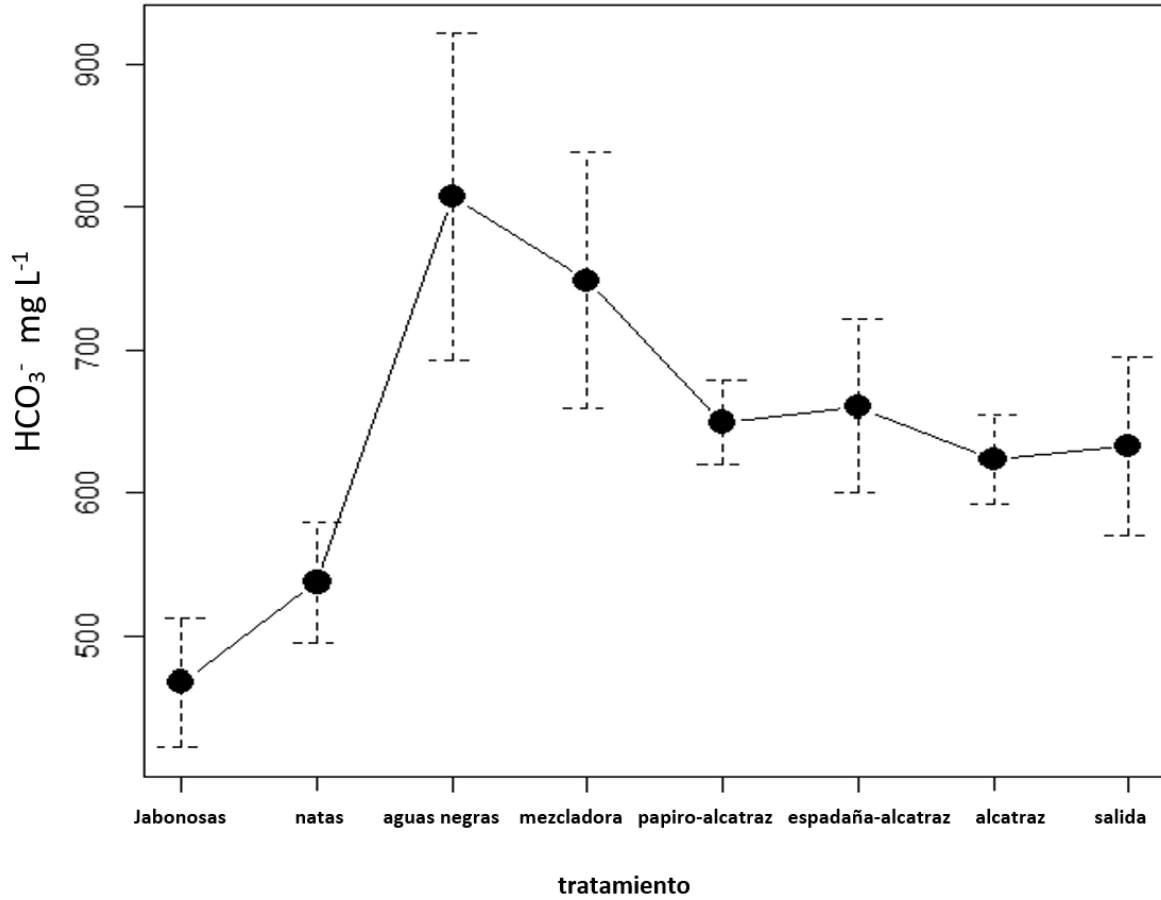


Figura 18. Promedio de la concentración de bicarbonatos en el SUTRANE.

El testigo presentó la mayor remoción de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> dentro del humedal artificial 16.8%, el tratamiento de espadaña-alcatraz, por su parte tuvo el porcentaje de remoción más bajo presentando 11.7 % (Figura 19).



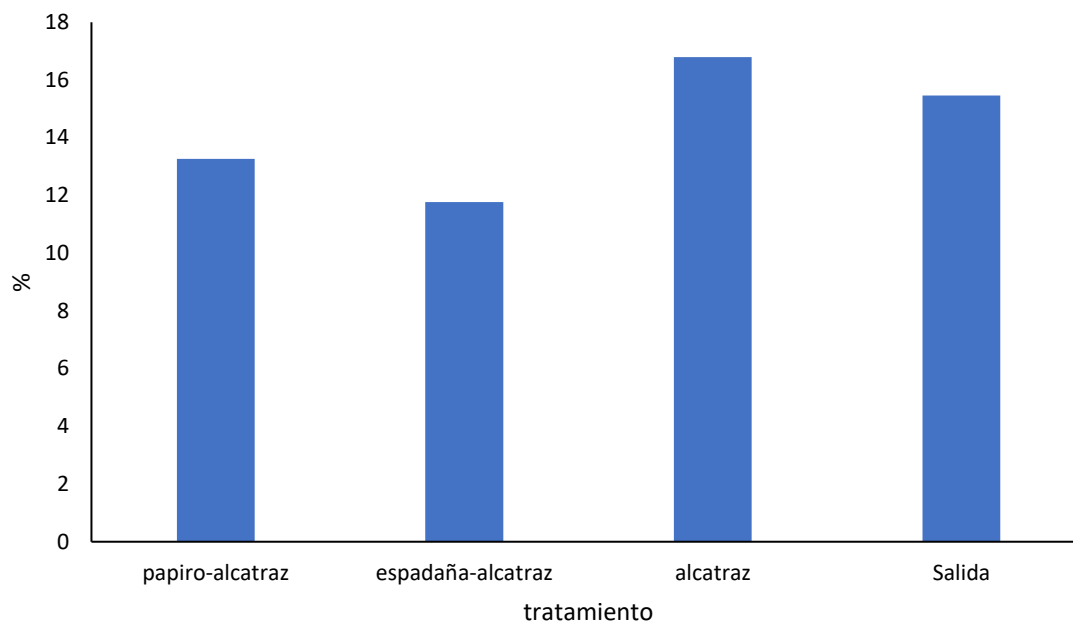


Figura 19. Porcentaje de remoción de bicarbonato en el humedal

### 11.9. Dureza

La dureza total del SUTRANE incrementó hacia los tratamientos en el humedal, aunque la concentración promedio más alta en el sistema estuvo en la salida ( $390.4 \text{ mg L}^{-1}$ ), mientras que en las aguas jabonosas se tuvo la menor concentración con  $243.9 \text{ mg L}^{-1}$ . Dentro de los tratamientos la dureza osciló entre 353 y  $370 \text{ mg L}^{-1}$  (Figura 20). Las concentraciones promedio de la dureza de magnesio estuvo en un intervalo de 192.58 a  $281.38 \text{ mg L}^{-1}$ , mientras que la dureza de calcio fue la menor registrando concentraciones de 75.5 a  $105.93 \text{ mg L}^{-1}$ .

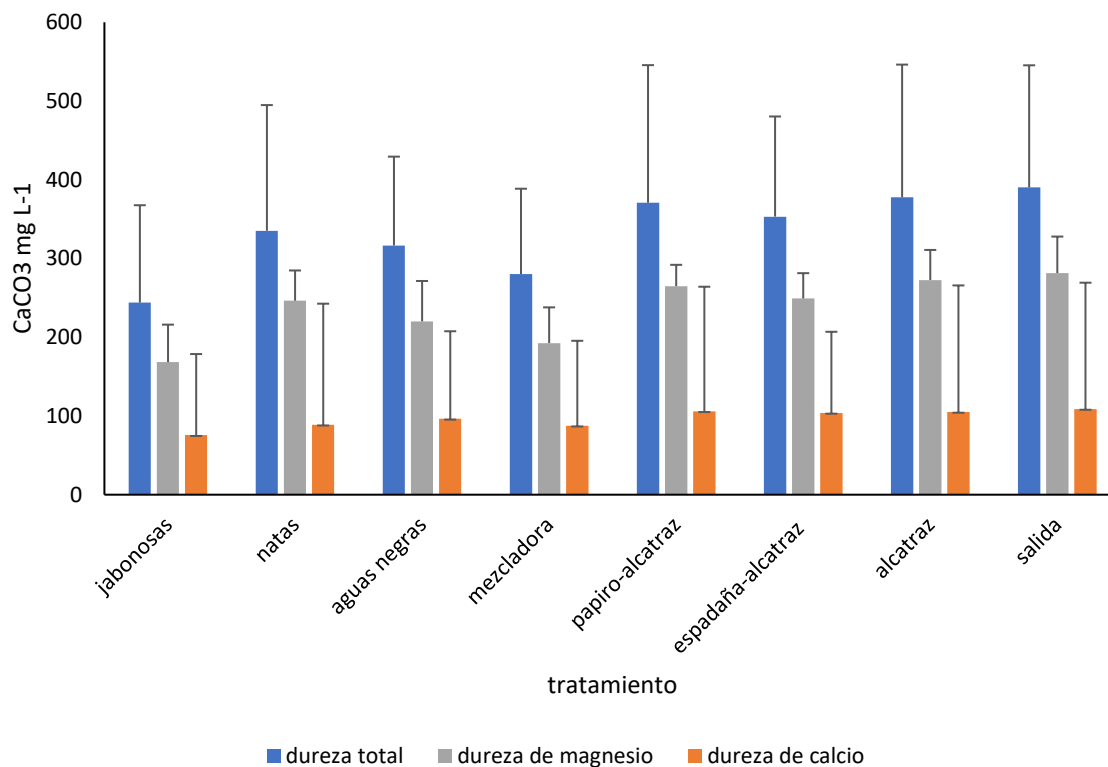


Figura 20. Concentración promedio de la dureza en el SUTRANE.

## 11.10. Nutrientos

### 11.10.1. Fósforo soluble reactivo

El fósforo soluble reactivo tuvo la mayor concentración en el depósito de aguas negras (28.07 mg L<sup>-1</sup>). La concentración promedio del PO<sup>4-</sup> en la entrada del humedal fue de 24.23 mg L<sup>-1</sup>, el tratamiento de papiro-alcatraz mostró el valor promedio de la concentración más baja dentro de los tratamientos (12.24 mg L<sup>-1</sup>) y el promedio más alto de la concentración de este nutriente la tuvo el tratamiento de espadaña-alcatraz (15.55 mg L<sup>-1</sup>) (Figura 21).

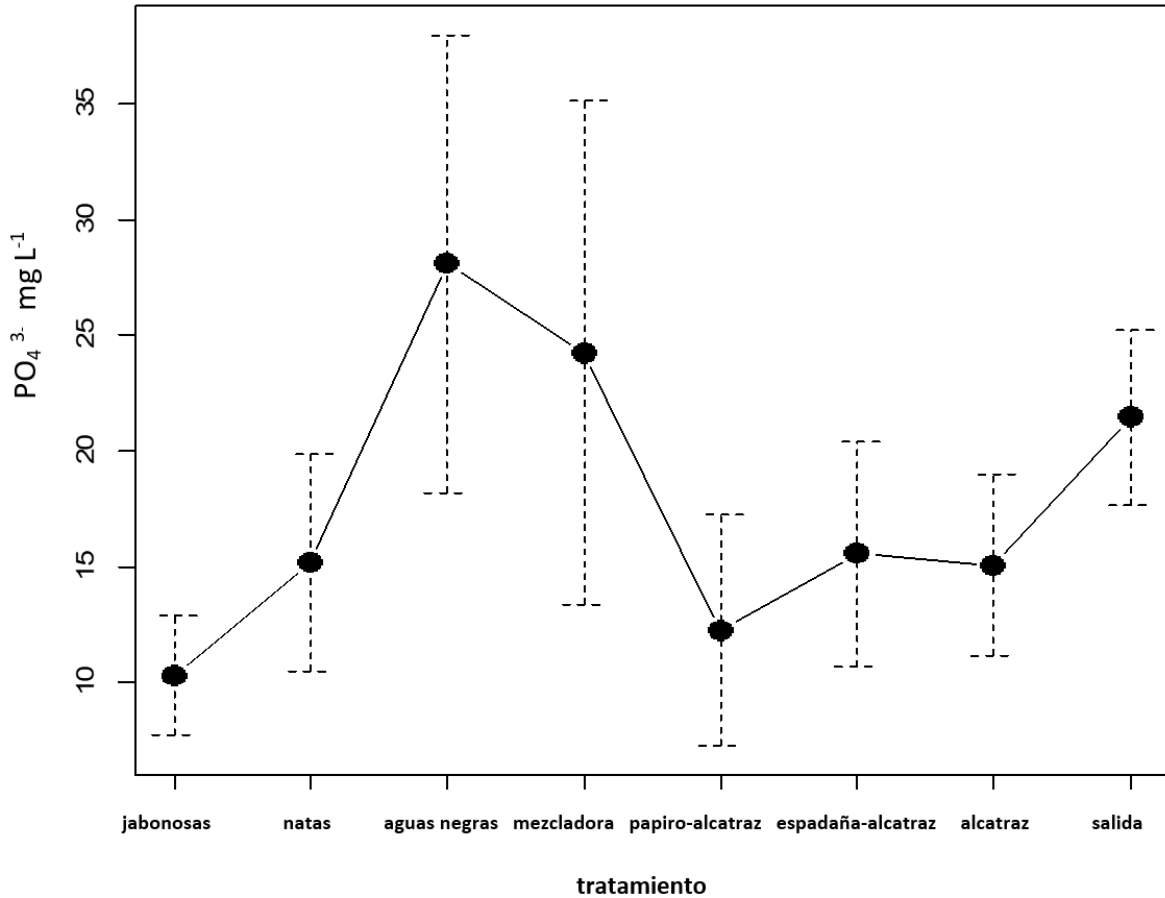


Figura 21. Concentración promedio del FSR en el SUTRANE.

En la figura 22 se muestra que para este nutrimento se tuvo una depuración de 49.4% de fósforo soluble reactivo en el tratamiento de papiro-alcatraz siendo este el que tuvo una mayor remoción. El tratamiento espadaña-alcatraz tuvo la menor remoción de este nutrimento con 36%, mientras que el alcatraz alcanzó una remoción de 38%, todos con respecto a la entrada del humedal.

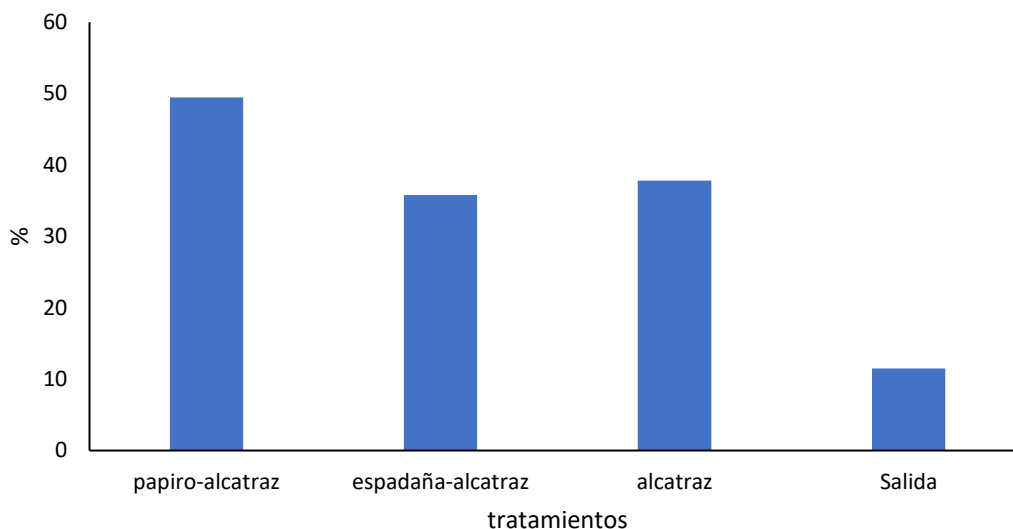


Figura 22. Porcentajes de remoción de FSR en el humedal

Las concentraciones de ortofosfatos en el agua se encontraron normales con la prueba de Kolmogorov-Smirnov (90%) a pesar de eso por el análisis de varianza no se cumple la homocedasticidad en los siguientes casos.

Cuadro 5. Valor de P- value en la prueba de Levene para fósforo soluble reactivo

Tratamientos (comparación)	P- value
<b>Jabonosas / aguas negras</b>	0.002
<b>Jabonosas / mezcladora</b>	0.001
<b>Natas / mezcladora</b>	0.04
<b>Aguas negras / alcatraz</b>	0.02
<b>Aguas negras / salida</b>	0.02
<b>Mezcladora / espadaña-alcatraz</b>	0.04
<b>Mezcladora / alcatraz</b>	0.01
<b>Mezcladora / salida</b>	0.01

### 11.10.2. Fósforo total

La concentración del fósforo total en el humedal tuvo mucha dispersión a lo largo de estudio. En la entrada del humedal se registró la concentración promedio del fósforo total más alta de todo el sistema  $57.4 \text{ mg L}^{-1}$ , mientras que la concentración promedio más baja de este nutriente dentro del humedal estuvo registrada en el tratamiento de papiro-alcatraz ( $31.71 \text{ mg L}^{-1}$ ), el tratamiento de espadaña-alcatraz alcanzó la concentración promedio más alta dentro de los tratamientos con ( $38.5 \text{ mg L}^{-1}$ ) (Figura 23). Las concentraciones de fósforo total en el agua se encontraron normales con la prueba de Kolmogorov-Smirnov (90%) sin embargo el análisis de varianza no se cumple en los siguientes casos

Cuadro 6. Valor del P-value, en la prueba de Levene para fósforo total

Tratamientos (comparación)	P- value
Natas / Aguas negras	0.01
Natas / Mezcladora	0.04
Aguas negras / espadaña-alcatraz	0.02

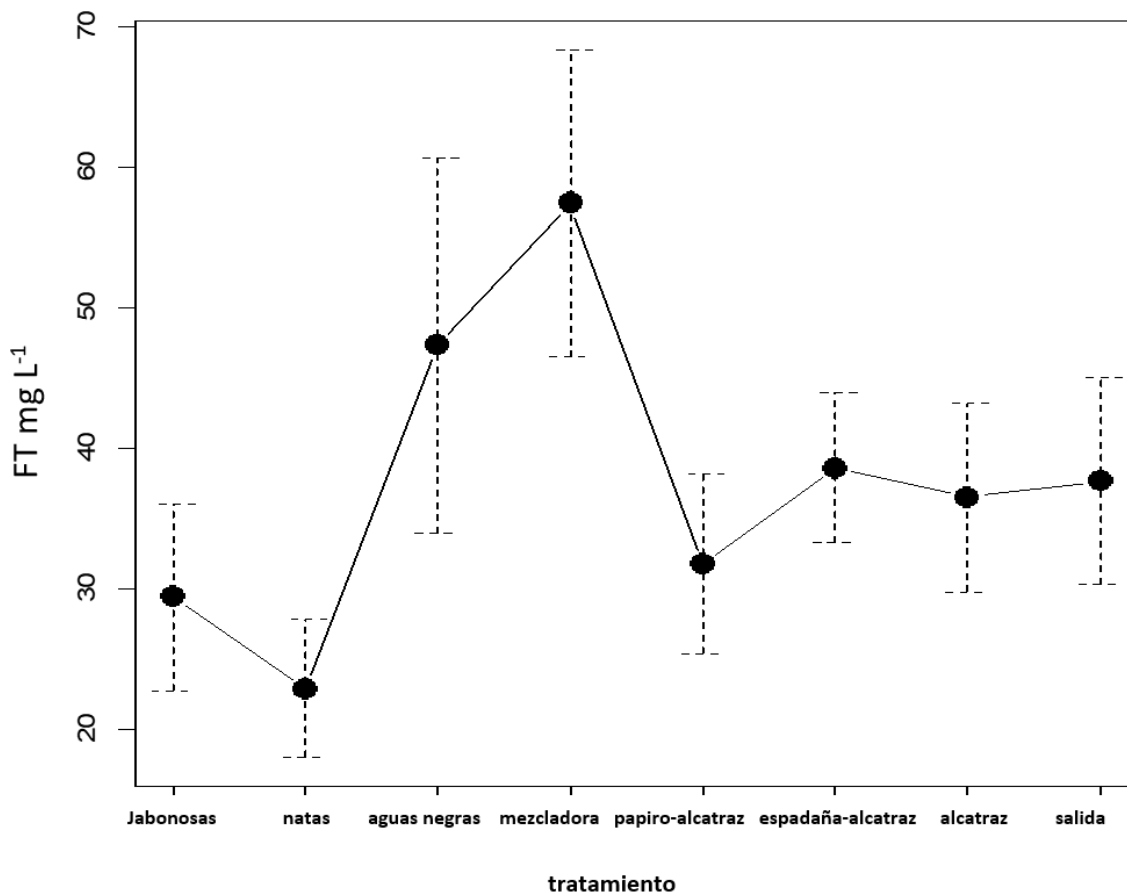


Figura 23. Concentración promedio del FT en el SUTRANE.

La concentración del fósforo total de la entrada del humedal tuvo una remoción de 44.7% con respecto al tratamiento de papiro-alcatraz, siendo esta la mayor depuración de todos los tratamientos, el tratamiento de espadaña-alcatraz tuvo la menor remoción con 32.8% (Figura 24).

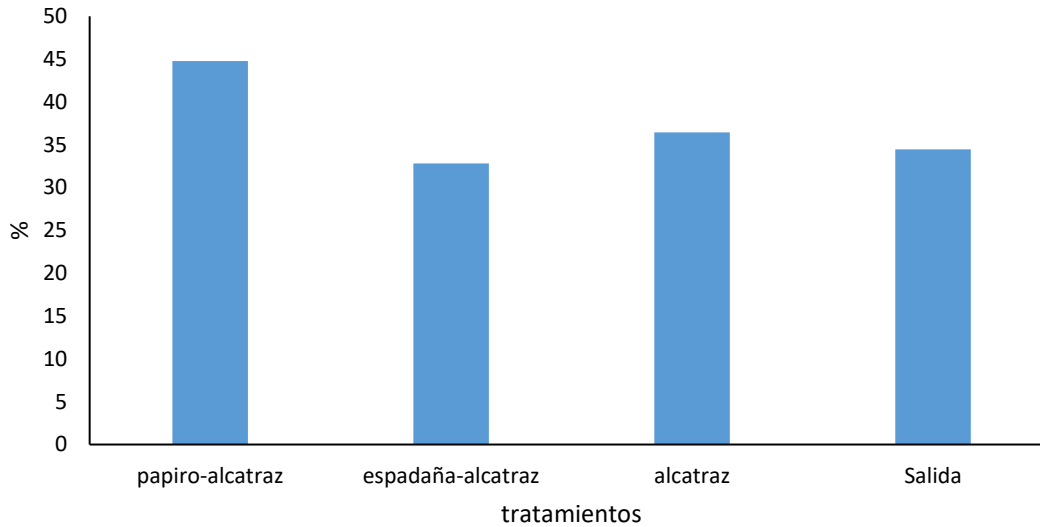


Figura 24. Porcentaje de remoción de FT en el humedal

### 11.10.3. Amonio

En la entrada del humedal el valor promedio de la concentración a lo largo del estudio fue de  $16.07 \text{ mg L}^{-1}$ . En los tratamientos de papiro-alcatraz y espadaña-alcatraz hubo acumulación de este nutrimento ya que tuvieron mayores concentraciones de amonio ( $17.04 \text{ mg L}^{-1}$  y  $17.71 \text{ mg L}^{-1}$  respectivamente). El tratamiento con menor concentración fue el de alcatraz el cual registró  $14.83 \text{ mg L}^{-1}$  (Figura 25).

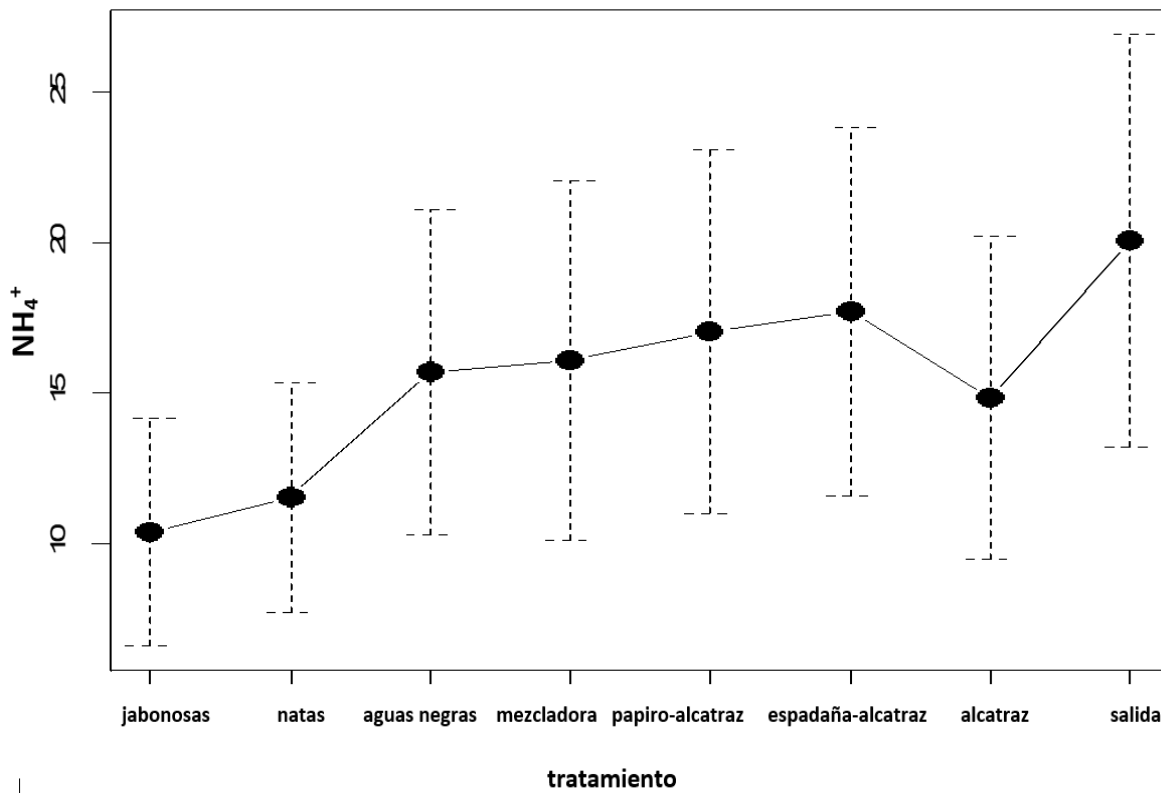


Figura 25. Concentración promedio del amonio en el SUTRANE.

Con el análisis de varianza de ANOVA con 90% de confianza no hubo diferencias significativas en los compartimentos del sistema ( $F_{(7,34)} P=0.93$ ).

#### 11.10.4. Nitritos

No se detectaron concentraciones de nitritos en el humedal, así como en ninguno de los compartimentos del SUTRANE

#### 11.10.5. Nitratos

La concentración promedio más alta en el sistema se registró en el depósito de mezcladora  $19.5 \text{ mg L}^{-1}$ , entre los tratamientos el tratamiento de papiro-alcatraz y el testigo tuvieron un promedio de la concentración de  $8.12 \text{ mg L}^{-1}$ , el tratamiento de espadaña-alcatraz registró  $14.4 \text{ mg L}^{-1}$  (Figura 26). El análisis estadístico de ANOVA ( $F_{(7,23)} P=0.928$ ) demostró que no hay diferencias significativas entre los compartimentos del SUTRANE ( $\alpha=0.10$ )



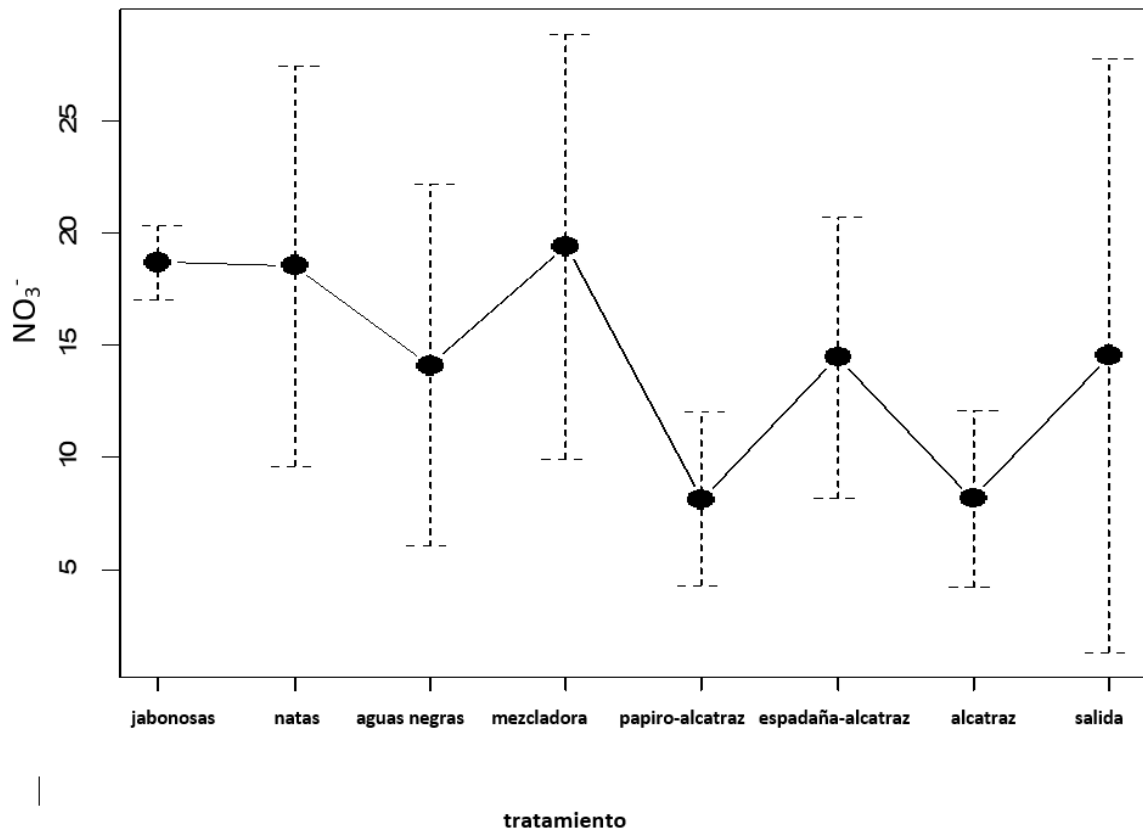


Figura 26. Concentración promedio de nitratos en el SUTRANE.

El porcentaje de remoción más alto se dio en el testigo con 58 % con respecto a la entrada del humedal, el tratamiento de espadaña-alcatraz alcanzó el menor porcentaje de remoción 25.5 % (Figura 27).

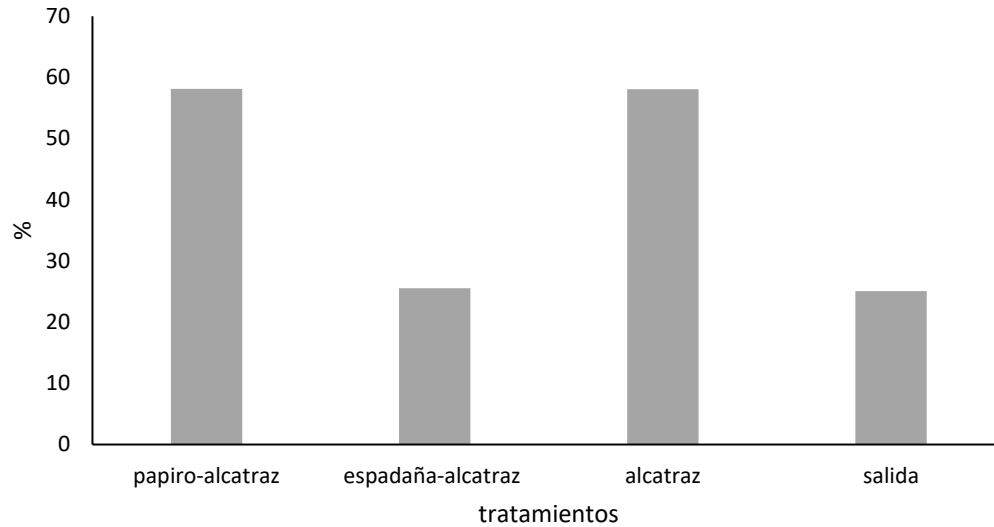


Figura 27. Porcentaje de remoción de nitratos en el humedal

El análisis estadístico de ANOVA demostró que no hay diferencias significativas entre los compartimentos del SUTRANE ( $\alpha=0.10$ )

#### **11.11. Coliformes totales y fecales**

El NMP de coliformes totales y fecales fue de 2400 NMP para todas las canaletas en todo el periodo de estudio por lo que no hubo diferencias significativas, ni remociones de esta prueba en el humedal artificial (Figura 28).

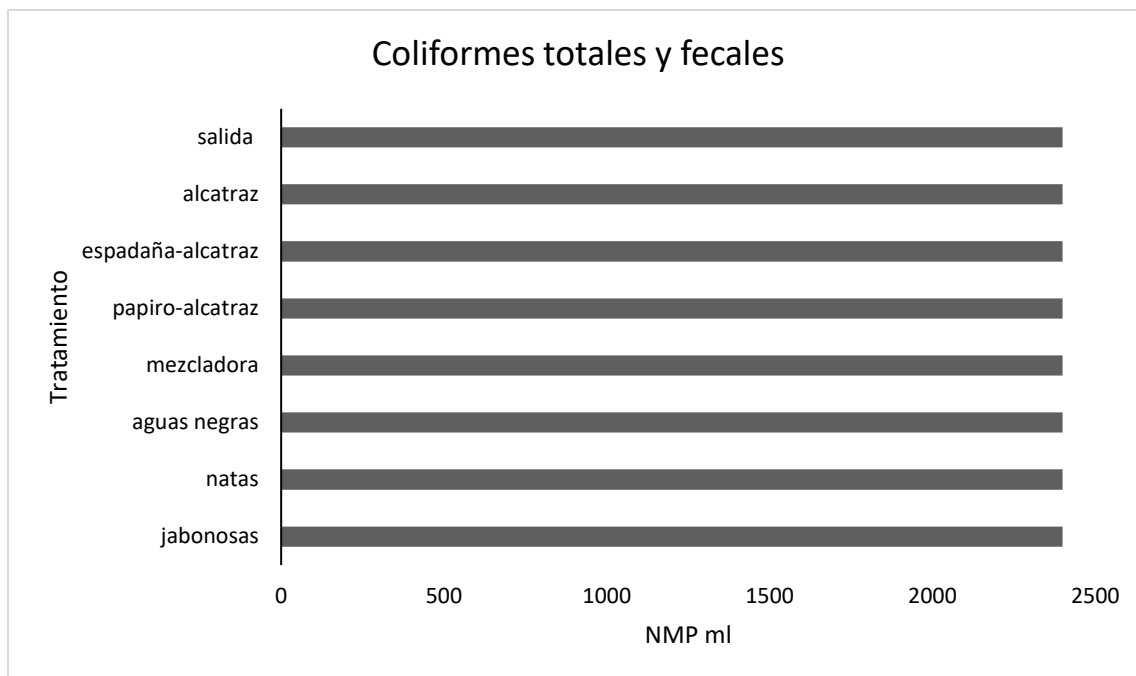


Figura 28. NMP de coliformes totales y fecales en el SUTRANE.

## 12. Discusión de resultados

### 12.1. Tiempo de retención hidráulica

El tiempo en el cual los contaminantes están en contacto con el sustrato y la rizosfera de la planta es bien conocido como un factor crucial para la eficiencia de la eliminación de contaminantes (Stottmeister *et al.*, 2003).

El tiempo de retención hidráulica (TRH) calculado para el humedal de flujo subsuperficial de la Asociación fue de 7.9 días, el cual se puede considerar adecuado para el tratamiento de aguas residuales de la comunidad, sin embargo, al estimar el valor teórico no se tomó en cuenta a las personas que visitan la comunidad, por lo que el TRH puede cambiar a un mayor número de 4 días. De acuerdo con Crites and Tchobanoglous (1998) el TRH es un estimador para la construcción de humedales y va de 3 a 4 días donde la calidad de agua esperada es para DBO y SST < 20 mg L<sup>-1</sup>, para el nitrógeno total (NT) < 10 mg L<sup>-1</sup> y para el fósforo total < 5 mg L<sup>-1</sup>. Romero *et al.* (2009), señalan que de acuerdo que en humedales con *Typha domingensis* no se encuentran datos del TRH. Sin embargo, en sistemas donde es utilizada *Typha latifolia* perteneciente a la misma familia se encontraron TRH de 7 días con la literatura no hay datos de tiempo de retención hidráulica para la *Typha domingensis*. En un trabajo realizado por Marín en el 2002 se estima un TRH de 7 días para *Typha latifolia* que es del mismo género que la espadaña. Arias y Brix (2003) por otra parte proponen un tiempo de retención hidráulica menor a 5 días para el diseño de humedales artificiales de flujo subsuperficial con una relación largo ancho 3:1 y con una profundidad mayor a 0.60 m, el humedal de la asociación cuenta con estas características en las canaletas donde se llevó a cabo el diseño experimental. Crites *et al.* (2006), señalan que para un humedal de este tipo el tiempo de retención hidráulica varía en un intervalo de 4 a 20 días.

## 12.2. Temperatura

La temperatura promedio más alta que se registró en el estudio es de 18°C para todos los tratamientos siendo el mes de abril el que presentó las temperaturas más altas para el humedal (18.3 y 18.2 °C), esta pudo ser influenciada por la temperatura ambiente para la zona de estudio, ya que para el mismo mes se reporta una temperatura de 26.6°C como temperatura máxima (Climate-data.org, 2016). Además, la temperatura alta en el humedal de flujo subsuperficial es modificada debido a que este se encuentra dentro de un sistema de invernadero, el cual ayuda a conservar la temperatura y la humedad. Otro factor que tomar en cuenta es la hora del día en que fue tomada la temperatura, entre las 12:00 y las 15:00 horas, (y que las cisternas en donde se realizó la medición se encuentran ubicadas en fondo de las canaletas además de estar cerradas). Según De Pascale y Paradiso (2006) el alcatraz es una planta que prefiere temperaturas de 15 a 28°C, por lo cual estas temperaturas son buenas para ellas. Aunque se esperaba que en la fosa de aguas negras tuviera la mayor temperatura ya que se encuentra totalmente cerrada sin ser afectado por la temperatura ambiental, se obtuvo la menor cantidad de este (17.5 °C) siendo este mismo valor para el depósito de salida, de este último se esperaba la temperatura más baja del sistema debido a que no se encuentra dentro del invernadero que cubre al humedal, (al estar expuesta a los cambios de clima atmosféricos, presentando valores desde 19 a 24°C) Las aguas grises y la fosa de trampa de natas tienen un invernadero pequeño asociado, por lo que se ven más afectadas por la irradiación solar teniendo 18.05°C para las aguas jabonosas y 17.9 °C para la trampa de natas.

La Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, no determina un intervalo de temperatura para el reúso agrícola de aguas tratadas; sin embargo la norma establece que 40°C de temperatura es el promedio para que las aguas residuales puedan ser depositadas a cuerpos de agua o bienes nacionales; por lo cual la temperatura del agua tratada es aceptable, encontrándose por debajo del valor establecido. Un trabajo realizado por Solís *et al* (2016), en el estado de Tabasco donde el clima es cálido húmedo

según la clasificación de Köppen, el valor máximo de la temperatura del agua fue de 22°C y se obtuvieron remociones arriba del 90% con *Typha domingensis*.

### **12.3. Oxígeno disuelto**

Para el oxígeno disuelto (OD) la concentración más baja fue en el depósito de aguas negras, debido a que su diseño está hecho para ser un sedimentador anaerobio y la poca concentración se debe a que el ducto donde se toma la muestra tiene contacto directo con el aire atmosférico, teniendo un intercambio de gases. Por otra parte, el depósito de aguas jabonosas presentó la concentración más alta, gracias a la oxigenación presente, dada por una caída libre de agua de un metro que llega de los lavaderos. El incremento de oxígeno disuelto en el humedal está asociado con la presencia de macrofitas, los tratamientos de papiro-alcatraz y espadaña-alcatraz, las cuales incrementan el nivel oxígeno a través de la rizósfera y sistema radicular por el transporte que hay desde el tallo de las macrofitas, lo cual es benéfico para remoción de la contaminación, incrementando la microbiota que se encarga de su degradación (Moshiri, 1993; Rehman et al., 2016).

A pesar de esto Langergrabel *et al.* (2007), mencionan que los humedales de flujo horizontal tienen como limitante al oxígeno disuelto, debido a que las plantas no son capaces de suministrar oxígeno a la velocidad requerida por las cargas orgánicas. Como la difusión del oxígeno en el agua es lenta, el suelo se vuelve anaerobio, provocando que muchas especies de plantas no tengan su óptimo desarrollo, sin embargo, las macrófitas emergentes toman el oxígeno atmosférico a través de los tallos y hojas transportándolo hacia la raíz.

### **12.4. pH**

El pH del agua jabonosa y natada se clasificó como neutra (promedio de 7.1 para cada uno). El resto del agua del sistema se clasificaron como aguas débilmente básicas, concordando con lo que menciona Mendocça (2000), que las aguas residuales domésticas presentan valores alrededor de la neutralidad. La NOM-001-SEMARNAT-1996 indica que los límites máximos permisibles de pH para que aguas residuales puedan ser tratadas es en un rango de 5 a 10; el agua de la salida del sistema puede ser descargada. Los límites máximos permisibles de la NOM-CCA-

032-ECOL/1993 son en un rango de 6 a 9 para descargar en sistemas de drenaje y alcantarillado urbano y municipal entonces el agua del sistema también puede ser descargada de esta manera. De acuerdo con el pH registrado para el agua del humedal las se pueden encontrar bacterias como *Clostridium perfringes*, *Methanococcus sp*, *Methanobacterium sp*, *Propionibacterium acidipropionici*, (Corrales *et al.*, 2015). ya que son clasificadas como neutrofilas y van en un intervalo de 5.5 a 8 de pH, además de para que las bacterias mantengan un metabolismo óptimo el pH va de 6.5 a 7.5 (Corrales *et al.*, 2015) lo que favorecen a la digestión anaerobia de la materia orgánica; por lo que los valores del tratamiento papiro-alcatraz y el testigo están por encima de del 7.5 siendo que pueden presentar problemas en el metabolismo de las comunidades bacterianas, como cambios de los grupos hidrolizables y alteración de compuestos no enzimáticos del sistema (Acosta y Abreu, 2005).

El incremento de pH en el humedal con respecto a las aguas jabonosas y las aguas natadas, se debe al incremento de la carga de materia orgánica que es acarreada por el sedimentador de aguas negras donde el pH también fue mayor con respecto a estos dos depósitos.

#### **12.5. Conductividad eléctrica**

La conductividad eléctrica funciona como un índice para medir el total de sólidos disueltos del agua, esta depende de la solubilidad de iones presentes. Para aguas residuales esta es utilizada como indicador de materia orgánica. En el sistema, el depósito de aguas negras presentó el valor más alto  $1.933 \mu\text{S cm}^{-1}$ , la conductividad eléctrica tiende a aumentar 2 a 3%, por cada grado Celsius que aumenta la temperatura (Smart-fertilizer, 2012), para las aguas SUTRANE no fue así siendo que en esta fosa se obtuvo la menor temperatura en el sistema, debido a que está diseñada para el agua residual proveniente de los excusados por lo cual acarrea mayor cantidad de materia orgánica y la descomposición de esta solo es de forma anaerobia, por otro lado en el tratamiento de espadaña-alcatraz tuvo la menor concentración de carga orgánica siendo el tratamiento con mayor disminución de este parámetro. La Norma Oficial Mexicana NOM-CCA/032-ECOL/1993, que

establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las aguas residuales de origen urbano o municipal para su disposición mediante riego agrícola, establece que el límite máximo permisible (LMP) para la conductividad pueda ser reutilizada es de  $2000 \mu\text{S cm}^{-1}$ , por lo que el agua tratada si puede ser usada para agricultura registrando la salida  $1665.3 \mu\text{S cm}^{-1}$ .

## **12.6. Demanda Bioquímica de Oxígeno**

En los humedales artificiales de flujo subsuperficial la materia orgánica puede ser descompuesta por dos vías microbiológicas: en condiciones aerobias y anaerobias dos maneras, que son procesos bióticos y abióticos microbianos, así como procesos físicos: sedimentación y filtración. Las cargas altas de materia orgánica que ingresan a estas unidades de tratamiento generan condiciones anóxicas en la mayor parte del sistema, quedando restringidas las zonas oxícas hacia los rizomas y raíces de las macrofitas del humedal (Vymazal, 2009). Las concentraciones en los tratamientos de la  $\text{DBO}_5$  fueron  $274.27 \text{ mg L}^{-1}$  para papiro-alcatraz,  $255.11 \text{ mg L}^{-1}$  para espadaña alcatraz y  $251 \text{ mg L}^{-1}$  por lo que están arriba de los límites máximos permisibles de contaminantes básicos de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-1996, la cual considera una concentración como LMP de  $150 \text{ mg L}^{-1}$  de promedio mensual para descargas de aguas residuales hacia ríos y  $75 \text{ mg L}^{-1}$  para verter aguas residuales a embalses, ya que para descarga hacia suelo no aplica para este parámetro, sin embargo, en esta norma no se aplica la demanda bioquímica de oxígeno para descarga al suelo. El Índice de Calidad del Agua establecido por CONAGUA (2008), establece que concentraciones de este parámetro por arriba de  $120 \text{ mg L}^{-1}$  son consideradas como agua fuertemente contaminada, por lo que tomando en cuenta las concentraciones de la DBO posterior a los tratamientos entran dentro de este rango y el agua no se encuentra en buenas condiciones.

Las aguas negras al ser el depósito receptor del agua proveniente de los sanitarios la cual acarrea la mayor carga orgánica, presentó la concentración más alta de DBO ( $498.08 \text{ mg L}^{-1}$ ), cabe señalar que este depósito es un sedimentador anaerobio, el cual es carente de oxígeno, limitando la mineralización de la materia orgánica, aunque la materia orgánica también puede tener remoción por procesos físicos



como la sedimentación (Kolb, 1998 en Delgadillo, 2010), también se debe tener en cuenta que el sistema tiene 24 años en operación, por lo que la oxidación de la materia orgánica es reducida generando , limitando el tiempo en el que el agua debe estar en el sedimentador, proceso que ocurre en este depósito. El sedimentador de aguas negras del SUTRANE que, por medio de la degradación anaerobia de la materia orgánica para la producción de metano, lo cual se consigue a través de dos fases: una no metanogénica y otra metogénica. La primera fase de la degradación anaerobia, consiste en hidrolizar polímeros orgánicos (polisacáridos, lípidos y proteínas) (Nuria, 2006) a moléculas como aminoácidos, azúcares, alcoholes y ácidos grasos de cadena larga (Diaz *et al.*, 2002 en Corrales *et al.*, 2015), por medio de microorganismos hidrolíticos, como pueden ser *Clostridium*, *Micrococcus*, *Bacteroides*, *Propionibacterium* entre otras (Mejia, 1996 en Corrales *et al.*, 2015). Posteriormente estos productos son fermentados por bacterias acidogénicas para formar ácidos grasos de cadena corta, alcoholes, hidrógeno y dióxido de carbono; Los primeros por medio de microorganismos acetogénicos son transformados en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono, de los cuales finalmente a través de bacterias metanogénicas (*Methanobacterium*, *Methanococcus* *Methanobevribacter*, *Methanomicrobium*) se obtiene como producto final metano y dióxido de carbono (Nuria, 2006).

La degradación de la materia orgánica dentro del humedal se da por la acción de microorganismos aerobios que se encuentran en la parte superior de la columna de agua y en la rizosfera de las plantas, por debajo de la biopelícula existe degradación anaerobia, lo cual funciona como mecanismo de remoción de la DBO (Delgadillo, 2010). Estudios previos han demostrado la eficiencia de estas especies de plantas en la remoción de la DBO, por ejemplo Solís *et al.* (2016) citan un trabajo realizado por Chaparro y Ospina (2005) donde obtuvieron 37% de remoción con *Cyperus papyrus* en un humedal de flujo subsuperficial utilizando arena y cuarzo como sustrato donde el tamaño de la partícula cambia con respecto al tezontle que se encuentra en el humedal de la asociación (6 a 12 mm para tezontle y 0.2 a 2 mm para la arena de acuerdo con Romero *et al.* (2009) teniendo al primero de estos con mayor capacidad adsorción y superficie de contacto. Bedoya *et al.* (2014) realizaron

una investigación en Colombia donde se midió la remoción de DBO en un humedal de flujo libre utilizando la misma macrofita donde se obtuvo 43% de remoción teniendo como diferencia abiótica la zona geográfica donde se ubican los países, siendo que Colombia se encuentra en una región tropical cálida, lo cual favorece la eficiencia de los humedales artificiales el incremento en el metabolismo de las bacterias según Moshiri (1993). Además de que los humedales de flujo libre tienen mayor concentración de oxígeno disuelto con respecto a los humedales de flujo subsuperficial, favoreciendo la oxidación aerobia de la materia orgánica.

Zurita *et al.* (2009) realizaron un trabajo con el mismo tipo de humedal utilizando *Zantedeschia aethiopica* comparandola con otras especies de macrofitas ornamentales donde se obtuvo 78.96% de remoción de DBO, cabe señalar que este estudio se llevó a cabo como un proceso de depuración natural posterior a que el agua municipal fuera procesada por una planta tratadora en Ocotlán Jalisco, zona donde se encuentran los mismos factores ambientales que en Puebla.

Hadad *et al.* (2006) realizaron un estudio en Argentina, donde utilizó un humedal de flujo horizontal superficial para el tratamiento de agua de una planta de metalurgia, donde la macrofita empleada fue *Typha domingensis*, la cual tuvo remociones del 76% respecto a este parámetro, provocando una caída de pH y el oxígeno disuelto en el sistema, lo cual se contrasta con lo encontrado en este estudio ya que el pH se mantuvo constante. La concentración de oxígeno en sistemas donde la DBO es alta tiende a ser poca o nula, esto también tiene que ver con el tipo de sistema de humedal que se utilice, ya que en los de flujo subsuperficial la anoxia también es debida al poco contacto de la biopelícula con la atmosfera (Tanner *et al.*, 1995).

La remoción del tratamiento con espadaña-alcatraz fue mayor que con papiro-alcatraz (36.7 % y 31.8 respectivamente), provocado a que la *Typha domingensis* presenta un desarrollo más denso en los rizomas, con lo cual se tiene un mayor transporte de oxígeno hacia la zona radicular provocando una mayor oxidación del agua tratada, además que por el tipo de rizoma permite el desarrollo de varias comunidades de microorganismos, los cuales oxidan la materia orgánica biodegradable (Cooper *et al.*, 1996).

### 12.7. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Esta es la cantidad de oxígeno que se precisaría para la oxidación de la materia orgánica y algunos compuestos inorgánicos (Sainz, 2005); donde el agente oxidante debe ser fuerte, en un medio ácido y a una alta temperatura. La reacción principal es la materia orgánica que es oxidada por el dicromato de potasio (Ecuación 1) (Marín y Correa, 2010)

En el SUTRANE la concentración mayor de DQO fue en la mezcladora (entrada del humedal) con  $976.42 \text{ mg L}^{-1}$ , se tuvieron remociones del 72.3% a 65.8% en los tratamientos, donde la mayor de estas se dio en el tratamiento de espadaña-alcatraz. Estas remociones son bajas comparadas con Escamilla y Morgado (2014), quienes encontraron remociones de 87% para alcatraz, donde la diferencia es que en dicho trabajo las macrofitas fueron inoculadas antes de ser sembradas en el humedal. Vymazal (2009) señala que las remociones de DQO oscilan entre 64% y 82% en humedales artificiales de flujo subsuperficial al redor de todo el mundo. Dentro de los tipos de agua residual la de tipo municipal en un tratamiento secundario alcanza 63% de depuración de este parámetro (Vymazal, 2009), por lo que las remociones obtenidas en este estudio fueron intermedias, considerando que antes de la entrada del humedal se tienen fosas de tratamientos primarios como lo es el sedimentador de aguas negras y la trampa de grasas por lirio acuático que se da en el compartimento de aguas natadas.

Metcalf y Eddy Inc. (1991, en Belmont *et al.*, 2004) reportan que concentraciones de  $250 \text{ mg L}^{-1}$  a  $500 \text{ mg L}^{-1}$ , corresponden a agua residual medianamente contaminada, correspondiendo dentro de este intervalo las concentraciones obtenidas en el SUTRANE. Sin embargo, el Índice de Calidad de Agua establece que por arriba de  $200 \text{ mg L}^{-1}$  de concentración para DQO es agua fuertemente contaminada.

Por otra parte, la alta concentración de DQO en las aguas grises ( $732.58 \text{ mg L}^{-1}$ ) (jabonosas) se debe a que el tipo de detergente que es utilizado en la A. C. para el lavado de ropa y trastes de cocina son de la marca Roma, foca y Blancanieves los cuales contienen como tensoactivo el sulfonato de alquilbenceno lineal que

corresponde los llamados tensoactivos blandos (UC-Pedraza y Delgado-Blas, 2012); los tensoactivos contienen moléculas surfactantes, las cuales están compuestas por moléculas anfifílicas que poseen un extremo hidrofílico soluble en agua con un grupo carboxilo y uno hidrófobo que es una larga cola hidrocarbonatada que es insoluble al agua, haciendo que incremente la materia inorgánica insoluble en el depósito.

### **12.8. Alcalinidad**

En el agua del sistema no se encontraron concentraciones de alcalinidad por carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), ya que, por el sistema de amortiguamiento del agua, el cual se estableció que a un pH de 7 a 8.34 la alcalinidad se encuentra establecida por iones de bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ) (Gómez *et al.*, 2014), tal como se encontró en el SUTRANE donde el pH fue de 7.5 a 7.8 para todos los depósitos del sistema y para el humedal artificial. De acuerdo con Acosta (2006), la alcalinidad dada por bicarbonatos es aproximadamente igual a la alcalinidad total para aguas residuales cuando se presentan bajas concentraciones de ácidos grasos volátiles. Kevern (1989 en Barco y Méndez, 2010) señala que los rangos de alcalinidad mayores  $150 \text{ mg L}^{-1}$  es alta, por lo que la alcalinidad del sistema es alta según estos rangos ya que la concentración más baja de bicarbonatos fue  $467.14 \text{ mg L}^{-1}$  para las aguas jabonosas. De acuerdo con la entrada del humedal, en los tratamientos hubo remociones del 13% al 16% siendo el testigo el que tuvo la mayor remoción de bicarbonatos. Otro caso de consumo puede ser por la liberación de ácidos grasos como producto del metabolismo de bacterias (Castro *et al.*, 2008).

Tebbutt (2001) señala que la alcalinidad alta para el tratamiento de aguas es útil porque proporciona un amortiguamiento que impide caídas drásticas en el pH del agua los cuales se originan por la liberación de ácidos volátiles cuando existe remoción de sólidos suspendidos.

### **12.9. Dureza**

La dureza total está dada por los iones de calcio y magnesio expresadas en  $\text{CaCO}_3$ . En el SUTRANE la dureza del agua se vio más influenciada por el ion magnesio que por el calcio (Gráfica 25). Roldán y Ramírez (2008) estos dos son los cationes más

abundantes en aguas dulces, en donde los carbonatos de calcio predominan sobre los carbonatos de magnesio 48% y 14% respectivamente de todos los cationes presentes. Ya que la dureza se presentó menor que la alcalinidad, Lanza-Espino y Arredondo (1990) mencionan que la dureza está dada solo por carbonatos, por lo que en el sistema no hay presencia de cloruros o sulfatos en el agua.

Jairo (2002), hace una clasificación del agua de acuerdo con su dureza (Cuadro 7).

Cuadro 7. Clasificación del agua de acuerdo con la dureza (Jairo, 2002)

Concentración (Ca+Mg)	Características
0-75 mg L <sup>-1</sup>	Blanda
75-200 mg L <sup>-1</sup>	Moderadamente dura
200-300 mg L <sup>-1</sup>	Dura
>300 mg L <sup>-1</sup>	Muy dura

Por lo que el agua del SUTRANE para los depósitos de aguas jabonosas y la entrada del humedal se clasifica como agua dura (243.9 y 283.17 respectivamente), mientras que para el humedal de flujo subsuperficial de acuerdo con esta clasificación son aguas muy duras (335.21 a 390.24 mg L<sup>-1</sup>).

## 12.10. Nutrimientos

### 12.10.1. Fósforo soluble reactivo

Dentro del SUTRANE a lo largo del periodo de estudio para los ortofosfatos como también es conocido el FSR (fósforo soluble reactivo) el depósito de aguas negras fue el que tuvo la mayor concentración 28.07 mg L<sup>-1</sup>, por la carga orgánica que se tiene procedente de los baños, además de que el flujo de este siempre se vio limitado o nulo, existiendo una acumulación de materia orgánica; coincidiendo con la conductividad más alta. En las aguas jabonosas procedentes de los lavaderos se tuvo la menor concentración del nutriente (10.3 mg L<sup>-1</sup>), debido a que se usan detergentes libres de fosfatos.

Las concentraciones de  $\text{PO}_4^{3-}$  entre los tratamientos variaron de 12.24 mg L<sup>-1</sup> para el cultivo de papiro-alcatraz, 15.55 mg L<sup>-1</sup> para espadaña-alcatraz y 15.07 en el cultivo de alcatraz; estas concentraciones se encontraron por arriba de los límites máximos permisibles que considera la EPA (1986 en Chen *et al.*, 2009) para aguas dulces donde establecen como máximo 0.05 mg L<sup>-1</sup> el contenido de este nutriente.

Se tuvieron 49.46%, 35.81% y 37.8% de este nutriente en los tratamientos y el testigo (papiro-alcatraz, espadaña-alcatraz y alcatraz respectivamente) ya que las macrofitas acuáticas y emergentes además de microorganismos y algas tienen como efecto la eliminación de los fosfatos en fase acuosa, tomándolos como una fuente de alimento (García, 2012).

### **12.10.2. Fósforo total**

Las formas más comunes de fósforo en soluciones acuosas son los ortofosfatos, polifosfatos y el fósforo orgánico (Metcalf y Harrison, 1981)

Con respecto al influente del humedal (57.41 mg L<sup>-1</sup>) se tuvieron remociones de 49.46% para el tratamiento de papiro-alcatraz, siendo este el mayor de los tres (35.81% tratamiento espadaña-alcatraz y 37.8% para el testigo). Estas reducciones se deben a factores como la adsorción del suelo por medio de movimiento de formas solubles inorgánicas de fósforo del agua hasta el suelo donde este se acumula (Vymazal, 2007), este proceso incrementa cuando el suelo o sustrato es alto en arcillas y en componentes minerales (Rhue y Harris, 1995). Dentro de los procesos biológicos es el consumo microbiano del fósforo, la cual es rápida por las tasas altas de crecimiento (Vymazal, 2007). Otro proceso biológico importante es la translocación de fósforo por las plantas, el nutriente es absorbido por las raíces es transportado hacia las hojas o brotes de las plantas especialmente en periodo de crecimiento (Vymazal Y Köpfelová, 2008). Para macrofitas emergentes la tasa de retención de fósforo tiende a ser menor que en plantas acuáticas, por esto en el depósito de aguas natadas se encuentra la menor concentración de este (22.84 mg L<sup>-1</sup>), porque el lirio acuático no solo absorbe el fósforo desde las raíces, sino que también lo puede hacer desde las hojas (Vymazal, 2007). Para el efluente la concentración incrementó a 37.63 mg L<sup>-1</sup>, esto porque el agua no fue bombeada al

debido tiempo dejándola 3 días más de los establecidos por el TRH, por lo que hubo más aporte de este nutrimento al aumentarse la carga hidráulica en esta cisterna.

### 12.10.3. Amonio

En los humedales artificiales el nitrógeno es removido principalmente por procesos de adsorción, asimilación de plantas y actividad de microorganismos (Lu, 2013).

El nitrógeno amoniacal es una forma de nitrógeno inorgánica el cual es producida por desechos de consumidores debido a esto y por el tipo de agua del depósito de aguas negras debió tener la mayor concentración de este nutriente, sin embargo, el agua en la entrada del humedal fue la que tuvo la concentración más alta (16.07 mg L<sup>-1</sup>), a pesar de que hubo una dilución del nutriente al mezclarse las aguas negras con las aguas natadas donde se encontraron las concentraciones más bajas (11.53 mg L<sup>-1</sup>). Dentro del humedal de flujo subsuperficial las concentraciones aumentaron con respecto a la entrada, a pesar de que la concentración de oxígeno disuelto incrementa por la por el transporte de oxógeno hacia la raíz, además que se está favoreciendo el proceso de amonificación, donde el nitrógeno orgánico (N) es reducido hasta amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) (Vymazal, 1995), siendo que este proceso ocurre más rápido que la nitrificación. Otro proceso que ocurre es la oxidación anaerobia del amonio (por sus siglas en inglés (ANAMOX) dado por Planctomycetes (Fuerst, 1995; Strous et al., 1999 en Castillo, 2008) donde el amonio es oxidado en condiciones anaerobias utilizando a los nitritos como aceptores de electrones para producir nitrógeno molecular, desarrollado este proceso por bacterias quimiolitioautotróficas (Strous, 1995; Jetten *et al.*, Strous, 2004, en Castillo, 2008). Siegrist *et al.*, (1998) afirman que estas bacterias se encuentran en grandes cantidades en sistemas de tratamiento de aguas residuales. Por otra parte, Reedy y Patrick (1984 en Vymazal, 2007) y Vymazal (1995), afirman que la amonificación depende de pH (6.5 a 8.5), temperatura 40 a 60 °C), la relación de carbón nitrógeno así como la textura del suelo; el pH del sistema se encuentra dentro de este intervalo (7.1 a 7.5), mientras que el intervalo de temperatura en el agua del humedal se encuentra por debajo de este rango (17.5 a 18 °C) lo que afecta a que se lleve a cabo esta parte del ciclo del nitrógeno.

#### 12.10.4. Nitritos

Dentro de las aguas residuales domésticas las especies de nitrógeno inorgánico más comunes son nitritos, nitratos, amonio, nitrógeno atmosférico, y el óxido nitroso (Vymazal y Kröpefelová, 2008). Contario a esto, en todo el periodo de estudio no se registraron nitritos en el sistema, por dos razones; uno el proceso de nitrificación donde el amonio se oxida a nitritos por medio de bacterias conocidas como BOA (bacterias oxidativas del nitrógeno) es intermedio para la formación de nitratos y este proceso ocurre de manera rápida, y la segunda es que las zonas de oxidación en el sistema están restringidas a los rizomas y raíces de las plantas (Vymazal, 2009).

#### 12.10.5. Nitratos

La nitrificación es un proceso por el cual el amonio es oxidado biológicamente a nitratos, donde las bacterias quimioautotróficas tienen el rol más importante para que este proceso suceda, usando al CO<sub>2</sub> como fuente de carbono para la síntesis de nuevas células (Vymazal, 2007)

Los nitratos en la mezcladora tuvieron la mayor concentración durante el estudio (19.4 mg L<sup>-1</sup>), debido a que había fitoplancton las cuales favorecían al proceso de la nitrificación por la producción de oxígeno, estas microalgas en temporada de verano presentaron un aumento en su abundancia que se observó por un color verde más intenso en el agua.

Por su parte los tratamiento mostraron capacidad de remoción de este nutriente, donde el tratamiento de papiro-alcatraz tuvo 58.1% de asimilación de este nutriente, mientras que el cultivo de espadaña alcatraz tuvo 25.54% de remoción esto se sustenta por lo mencionado por Brix (1994), donde dice que en la rizosfera se crean zonas de oxidación debido a la liberación de oxígeno por parte de las macrofitas lo que permite la nitrificación del amonio proceso que es echo por bacterias como *Nitrosomoas* o *Nitrobacter*. Kadlec *et al.* (2000 en Lee *et al.*, 2009) señalan las plantas con mayor remoción de nitrógeno en humedales artificiales son *Phragmites australis*, *Typha spp.* y *Sciperus spp.* Kyambadde *et al.*, (2004), en un estudio



realizado con la misma especie de papiro contrarrestándolo con *Microbotryum violaceum* demostró que la primera de estas dos macrofitas tuvo la mayor remoción de nitrógeno en un humedal horizontal de flujo superficial al encontrar 69.5% disminución. Otro trabajo realizado por Senzia y colaboradores (2003), muestran reducción del 44% de nitrógeno por parte de *Typha domingensis*, lo cual tiene relación con que tiene raíces poco profundas, por lo cual tienden a tener menor filtración y sedimentación.

Por otra parte, Vymazal (1995), afirma que la nitrificación también depende de factores abióticos como la temperatura, el pH, la alcalinidad, la concentración de carbono inorgánico, dentro de estos criterios la temperatura ideal es de 25 a 35 °C, mientras que el pH debe estar en valores de 6.6 a 8 (Cooper *et al.*, 1996).

Otro proceso que se lleva a cabo dentro de los humedales es la desnitrificación, que es un proceso desasimilativo llevado a cabo por bacterias anaerobias facultativas. Así, las condiciones de microaerobia a anoxia presentes en el sistema, favorecen el proceso de respiración anaerobia de los nitratos los cuales son transformados a nitrógeno molecular, el cual puede escapar a la atmósfera. Las remociones de nitrógeno en estos sistemas pueden estar dadas por este proceso ya que Mitsch (2000) señala que ayuda a remover cerca del 60 al 70% mientras que por absorción o asimilación de las plantas es entre el 20 y el 30%. La reducción asimilatoria de los nitratos por las macrofitas es importante al generarse formas orgánicas de nitrógeno como proteínas.

La técnica del ácido difonil-disulfónico tiene interferencias por la materia orgánica y por esto las concentraciones de nitratos fueron muy elevadas al tener poca concentración de oxígeno disuelto.

### **13.11. Coliformes totales y fecales**

Las bacterias coliformes han sido utilizadas como indicadores de contaminación debido a que su detección es sencilla y rápida para realizarse en laboratorio (Craun *et al.*, 1997).

Dentro del SUTRANE no se tuvo remoción en ninguno de los tratamientos del humedal de flujo subsuperficial, donde 2400 NMP ml<sup>-1</sup> fue el número más probable de coliformes totales y fecales, esta concentración está por encima de los límites máximos permisibles (240 NMP cm<sup>3</sup>) de la Norma Oficial Mexicana NOM- 003-ECOL-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público, para servicio al público con contacto indirecto u ocasional, cabe señalar que a pesar de que esta norma no aplica para reúso agrícola se utilizó como criterio de evaluación, ya que habitantes de la A. C. llegan a tener contacto con el agua residual tratada de manera indirecta cuando se riega para la conservación de pastos, se hace limpieza del SUTRANE o se realiza la poda de macrofitas del humedal. Donde se esperaba tener el mayor número de coliformes era en el depósito de aguas negras, ya que los coliformes, especialmente los fecales (*E. Coli*), provienen de materia fecal tanto de animales como de humanos. Sin embargo, no solo son estos también existen *Enterobacter*, *Klebsiella* *Edwarsiella* y *Citrobacter* (Canosa, 1995) que son coliformes no fecales. Las concentraciones tan elevadas también se deben a que las muestras de agua se tomaron en la superficie del agua que se encuentra en la cisterna de salida de las canaletas donde los coliformes se encuentran en mayor abundancia, aunque también estas bacterias se encuentran atrapados en el fondo de los sedimentos (Munn, 2004 en Ramos *et al.*, 2008). Estas bacterias también son utilizadas para el tratamiento biológico de aguas residuales ya que ayudan a destruir materia orgánica (Ramos, *et al*, 2003)

Otra complicación que se tuvo para la detección de coliformes fue que no se evacuaba el agua del sitio final de depósito de manera regular lo que afectaba el tiempo de retención hidráulica dejando el agua estancada más días de los calculados por lo que estos organismos se reprodujeron y se acumularon en los tratamientos, además de que estas bacterias también son conocidas por su capacidad de soportar temperaturas altas (termotolerantes) ( Prescott, Harley y Klein, 1996 en Arcos *et al.*, 2005). Este parámetro no afecta su crecimiento por la zona de estudio por el tipo de clima que se presenta.

### 13. Conclusiones

- El tiempo de retención hidráulica de 8 días por canaleta resultó no ser eficiente para la reducción de coliformes fecales en el humedal artificial.
- La temperatura promedio del agua en el humedal fue baja ( $17.8 \pm 0.2$  °C) por encontrarse el sistema en un clima templado subhúmedo, de donde se infiere un bajo metabolismo de los microorganismos para los procesos degradativos.
- Los tratamientos con macrofitas incrementaron la concentración de oxígeno disuelto en el agua a condiciones que favorecen a las bacterias microaerofílicas ( $0.64 \text{ mg L}^{-1}$ ). Asimismo, el transporte de este gas de las hojas hacia la raíz favoreció en esta microzona la oxidación aerobia de la materia orgánica, amonificación, así como la oxidación del amonio (nitrificación).
- Las condiciones anaerobias y anóxicas que prevalecen en el SUTRANE favorecieron la desnitrificación y la oxidación anaerobia del amonio (ANAMMOX).
- El pH promedio del agua del humedal (7.7) se clasificó como débilmente básico, mientras que para las aguas jabonosas y natadas se clasificó como neutro. Este parámetro se encontró dentro de los LMP de la Normas Oficiales Mexicanas NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-CCA-032-ECOL/1993.
- El depósito de aguas negras con alta carga de materia orgánica estuvo sometida a una digestión anaerobia, donde ocurren los procesos de hidrólisis, acetogénesis y metanogénesis. Aunque la eficiencia de degradación de la materia orgánica en estas condiciones resultó ser baja, como se infiere por la elevada DBO obtenida en los diferentes muestreos.
- El agua del SUTRANE se clasificó como muy alcalina ( $640.68 \pm 107 \text{ mg L}^{-1}$ ), la cual estuvo dada solo por bicarbonatos, lo que se corroboró con los pH registrados. Para este parámetro no se encontraron diferencias significativas entre los diferentes compartimentos del sistema, siendo un parámetro conservativo.

- Por la dureza total el agua de los tratamientos se clasificó como muy dura ( $333.45 \pm 50.8 \text{ mg L}^{-1}$ ), donde la dureza estuvo dada principalmente por carbonatos de magnesio.
- La DBO y la DQO tuvieron mayor remoción en el tratamiento de espadaña-alcatraz (36.7% y 72.3% respectivamente). Para la DBO se encontraron diferencias significativas entre la entrada con el testigo y el tratamiento de espadaña-alcatraz.
- La DBO de la salida del sistema se encontró por encima de los LMP de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996.
- De acuerdo con el Índice de Calidad de Agua (CONAGUA, 2008) la DBO y la DQO se clasificaron como aguas fuertemente contaminadas en todo el sistema.
- El fósforo soluble reactivo y el fósforo total tuvieron mayor remoción en el tratamiento de papiro-alcatraz (49.46% y 44.77% respectivamente), a pesar de esto el fósforo total rebasó los LMP de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996.
- Para el nitrógeno, no hubo presencia de nitritos en el humedal, mientras que los nitratos tuvieron remociones similares para ambos cultivos de macrofitas (alrededor del 58 %).
- No existió disminución del NMP de coliformes totales y fecales, estando por encima de los LMP de la Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997.

## 14. Recomendaciones

De acuerdo con los resultados obtenidos con respecto a la DBO, DQO y coliformes fecales y totales obtenidos, se vio la pertinencia de hacer adecuaciones en las canaletas del humedal, que consisten en las siguientes modificaciones:

- 1) Se reconstruirán dos canaletas de 10 m de largo x 3 m de ancho para tener una proporción de 3:1 por canaleta de acuerdo con lo recomendado por la EPA (2000). Además de que la profundidad del humedal también será modificada a 0.6 m (Fig. 29). Se construirán tres pasillos, uno que divida ambas canaletas y dos en los extremos, los cuales servirán para aclareo de biomasa vegetal y la limpieza de las mismas.
- 2) Con estas adecuaciones estructurales, se modificará el tiempo de retención hidráulico teórico a 6.33 días por canaleta, lo que favorecerá la disminución de la concentración de la DBO, DQO y el NMP de coliformes.
- 3) Para el humedal artificial se tendrá un policultivo con las tres macrofitas (espadaña, papiro y alcatraz). La espadaña por presentar una mayor asimilación de materia orgánica, mientras el papiro y el alcatraz para la remoción de materia inorgánica del agua residual por asimilación de nutrimentos y para la comercializar de flor que produce este último.
- 4) Se aumentará el diámetro de la tubería a 2" de la mezcladora de aguas negras, jabonosas y natadas que alimentan a las canaletas del humedal, para evitar la acumulación de conglomerados orgánicos que obstruyen el flujo continuo a las mismas.
- 5) Se propone una reinoculación del biodigestor de aguas negras con lodos activados de una planta de tratamiento en operación.

15. Anexos

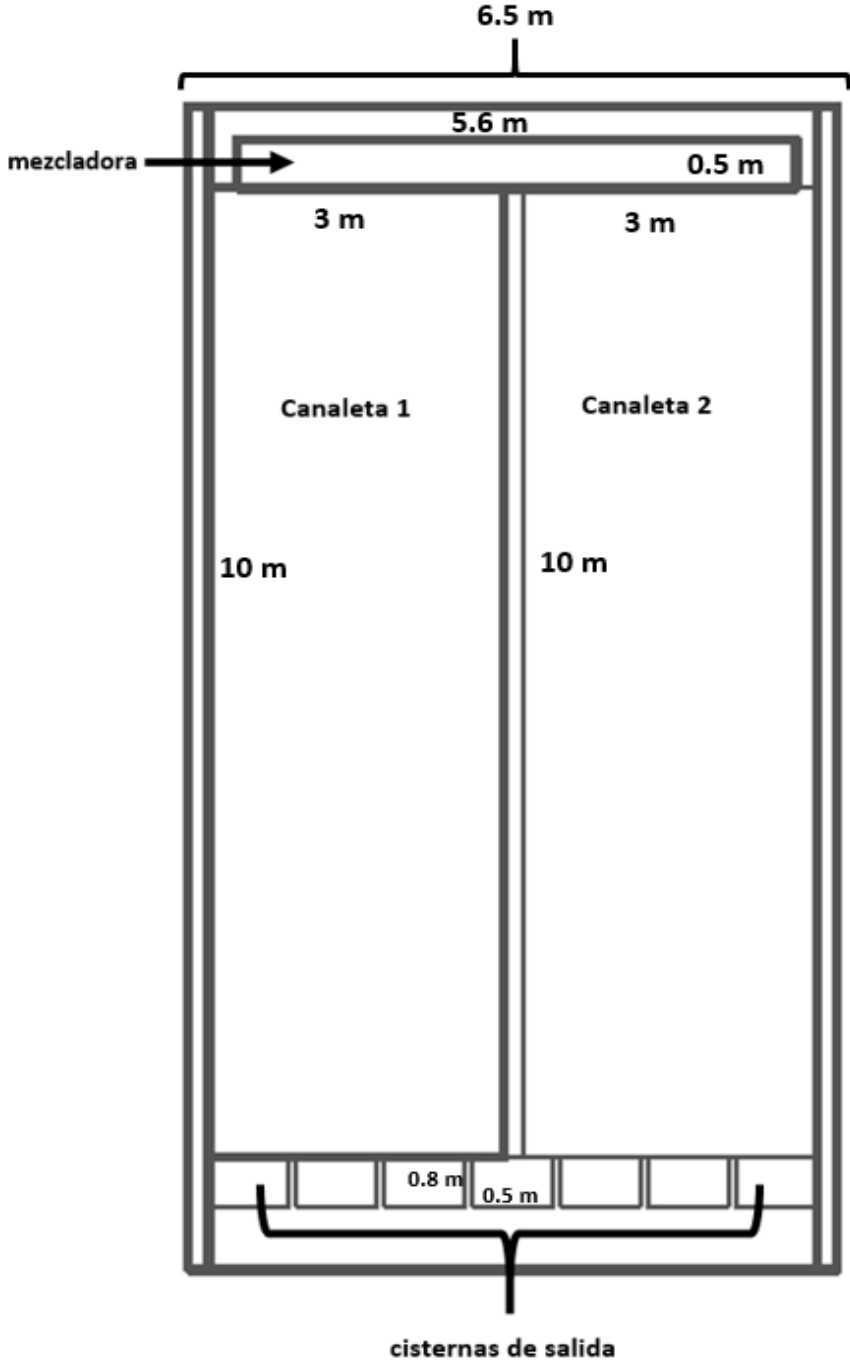


Figura 29. Diseño del humedal de flujo subsuperficial con las modificaciones

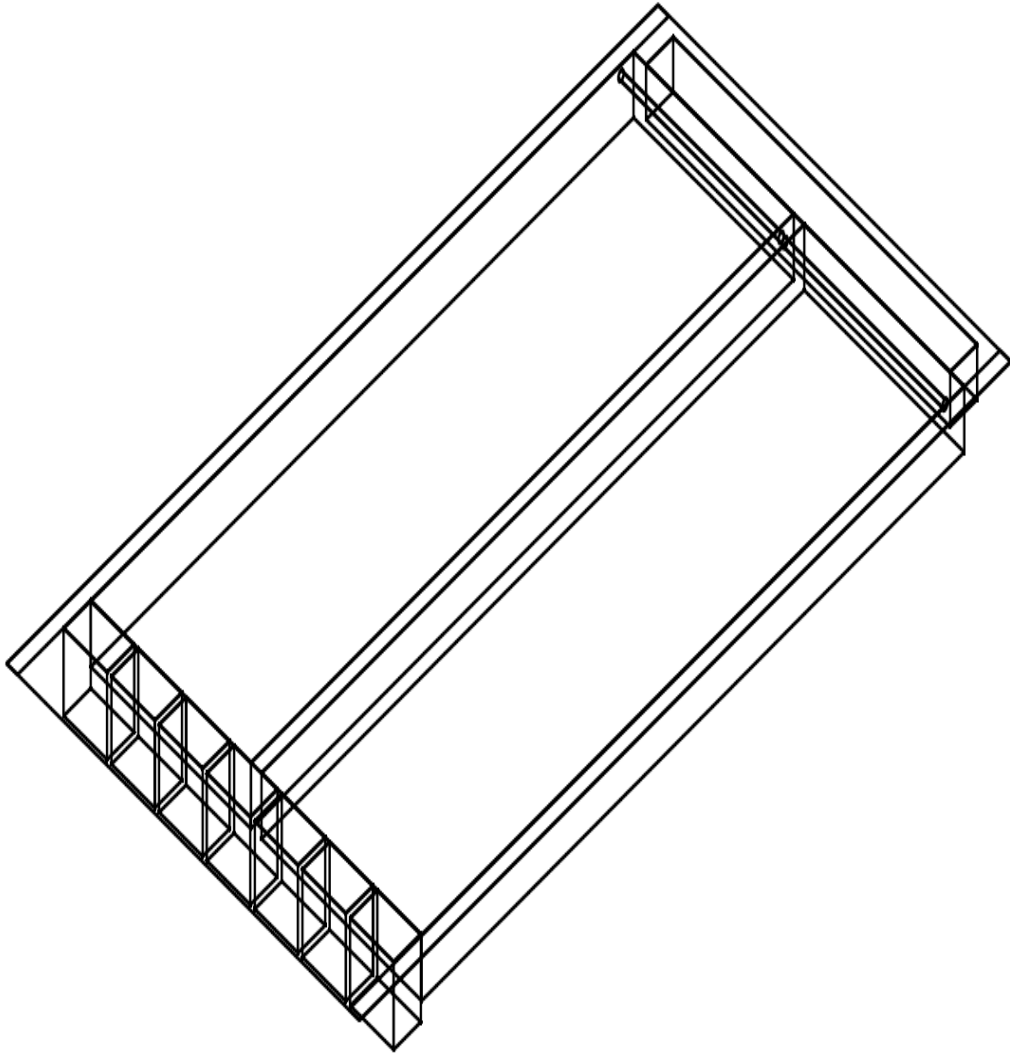


Figura 30. Humedal de flujo subsuperficial en vista 3D

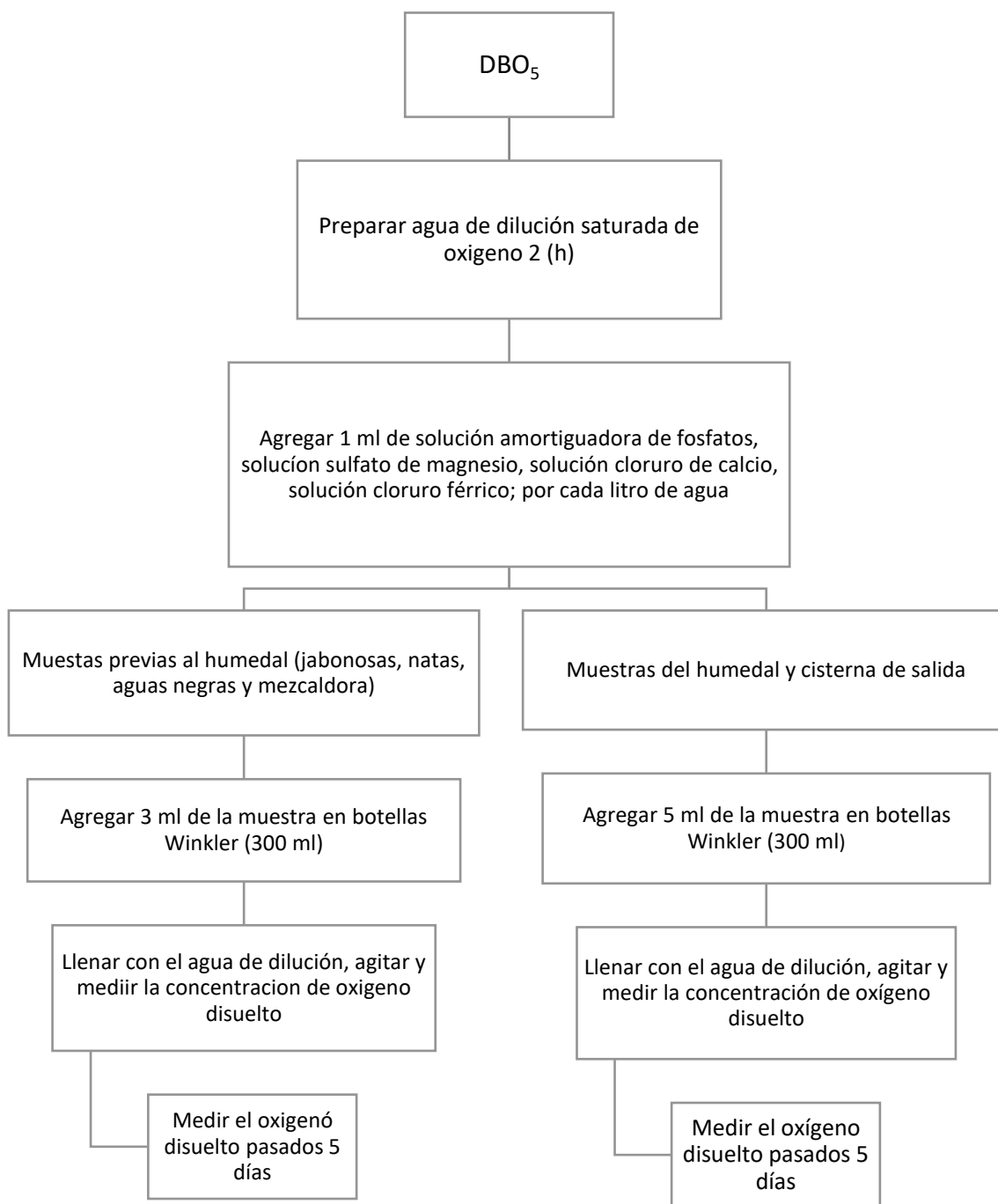


Figura 31. Diagrama de flujo para DBO



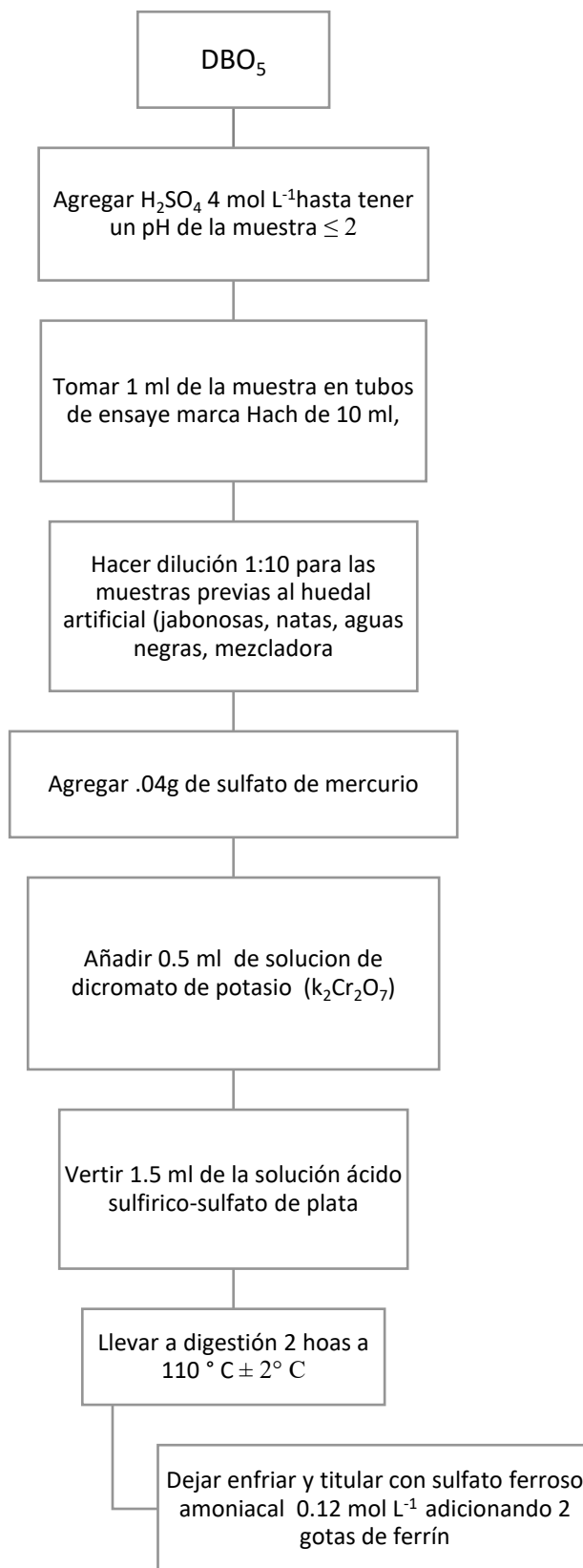


Figura 32. Procedimiento para DQO

## 16. Referencias bibliográficas

- A.P.H.A., AWWA., W.P.C.F., & W.E.F (2012). Standard Methods for the examination of water and wastewater, 22 ed American Public Health Association.
- Acosta, Y., Abreu, M. Cristina. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *ICIDCA*, 1, 35-48.
- Ahumada, B., Pelayo, M., y Arano, A. (2012). Sustentabilidad Ambiental, del concepto a la práctica. Una oportunidad para la evaluación ambiental estratégica en México. *Gestión y política pública*, 21, (2), 291-332.
- Alvarado, M. (2016). *Diseño de un humedal artificial en la granja didáctica "Dos puertas" Taxco el Viejo, Guerrero*. Tesis de licenciatura no publicada, FES Zaragoza, Ciudad de México, México.
- Arcos M.P., Ávila, S., Estupiñán, M., y Gómez, A., (2005). Indicadores microbiológicos de la contaminación en fuentes de agua. *NOVA-PUBLICACIÓN CIENTÍFICA*, 3 (4), 1-116.
- Arias, I., Carlos, A., y Brix, H. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 13, 17-24.
- Arreguín, F., Martínez, P., Trueba, V. (2004). En Academia Mexicana de Ciencias (ed.), *El agua en México. Una visión institucional*, (pp. 251-270) México: El agua en México vista desde la Academia.
- Aquaberri (2003). Humedales artificiales. Recuperado de: <http://aquaberri.com/Dispositivos/Humedales-Artificiales/>.
- Barco L. M., y Méndez M. (2010). *Caracterización de las características hidrológicas y sanitarias del lago de Sachagota y de fuentes de agua termonineral en el municipio de Paira, Boyacá*. Tesis de Ingeniería química. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Bedoya, J., Ardila, A., y Reyes J., (2004). Evaluación de un humedal del flujo subsuperficial en el tratamiento de aguas residuales generadas en la

institución Colegio Mayor de Antioquia, Colombia. *Revista Internacional Contaminación Ambiental.*, 30 (2), 275-283.

- Belmont, M. A., Cantellano, E., Thompson, S., Williamson, M., Sanches A., y Metcalfe, C. D. (2004). Treatment of domestic water in a pilot-scale natural treatment system in central Mexico. *Ecological Engineering*, 23, 299-311.
- Brix, H. (1994). Functions of macrophytes in constructed wetlands. *Wat. Sci. Tec.*, 4, 71-78.
- Canosa, A. (1995). Indicadores bacteriológicos de eutrofización en los embalses de Chuza, Neusa y Tominé, y en la laguna de Chingaza. Bogota, Colombia: Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Centro de Investigaciones Científicas.
- Calherios, C., Bessa, V., Mesquita, R., Brix, H., Rangel, A., y Castro, P. (2015). Constructed wetland with a polyculture of ornamental plants for wastewater treatment at a rural tourism facility. *Ecological Engineering*, 79, 1-7.
- Castro, F., Fernández, N. y Chavez M. (2008). Diminution of the COD in formation Waters using bacterial stocks. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*, 31 256-265.
- Cervantes, D., y Mora, A. (2013). *Evaluación de la calidad del agua tratada en un sistema de humedales de flujo subsuperficial, para uso recreativo*. Tesis de licenciatura no publicada, D.F., México.
- Chen, Y., Bracy, R. P., y Allen D. O. (2009). Nitrogen And Phosphorus Removal By Ornamental and Wetlands Plants in a Greenhouse Recirculation Reserch System. *HortScience*, 44 (6), 1704-1711.
- Cliate-data.org. (2016). Climate: Amozoc de Mota. Recuperado de <https://en.climate-data.org/location/216194/>
- CONAGUA (2010). Statistics on Water in México. 2010 Edition. SEMARNAT
- CONAGUA (2010). *El agua en México: causas y encauses*. D.F., México: Academia Mexicana de las Ciencias.

- CONAGUA (2015). Inventario Nacional de Plantas de Tratamiento Diciembre 2013. Comisión Nacional del Agua. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, D.F. México.
- Cooper, P. F., Job G. D., Green M. B. y Shutes R.B.E. (1996). *Reed beds and constructed wetlands for waste water treatment*. Marlow, UK.: Wrc Publications
- Cooper, P. (1999). A review of the design and performance of vertical-flow and hybrid reed bed treatment systems. *Water Sci. Technol.* 40(3), 1-9.
- Corrales, L., Antolinez, D., Bhórquez, J. y Corredor, A. (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sustentabilidad de la vida en el planeta. *NOVA*, 13 (23), 55-81
- Craun, G., Beger, P., y Calderon, R., (1997). Coliform bacteria and waterborne disease outbreaks. *Water Works Ass*, 89, 96-104.
- Crites, R., Middlebrooks, J. y Reed S. (2006). *Natural wastewater systems*. Estados Unidos: Taylor & Francis Group, LLC
- Crites, R., Tchobanglous, G. (1998). *Small and decentralized wastewater management systems*. Florida: McGraw-Hill
- De Pascale, S. y PARADISO, R. (2006). *Influencia del régimen térmico y del GA3 sobre Zantedeschia aethiopica L. 3er Congreso Argentino de Floricultura*. Libro de resúmenes. La Plata, Argentina, 21-24.
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., y Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Cochamba, Bolivia: Centro Andino para la gestión y uso del agua (Centro AGUA).
- Díaz, E., Alavarado, A., Camacho, K. (2012). El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México *Quivera*, 4, 1, 78-97.
- Duncan, D. (1996). Waste stabilization ponds: effluent quality requirements and implications for process design. *Water Sci. Tech*, 3, 7, 23-31.

- Enciclopedia de las Delegaciones y Municipios de Puebla (2015). tomado de <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM21puebla/municipios/21015a.html>
- Environmental Protection Agency (2000). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales humedales de flujo subsuperficial. 832-F-00-023.
- Escamilla, B., y Morgado, M. (2014). *Diseño experimental para la adecuación de un humedal de flujo subsuperficial*. Tesis de Licenciatura no publicada, FES Zaragoza, D.F., México.
- Espinosa, G. (2015). *Crecimiento y producción de la biomasa vegetal durante el establecimiento de un humedal construido*. Tesis de licenciatura. FES Zaragoza, D.F., México.
- Estrella, M., y Gonzáles, A. (2014). *Desarrollo sustentable. Un nuevo mañana*. México : Grupo Editorial Patria.
- Fenoglio, F. (2000). Bases de diseño para la construcción de un reactor biológico experimental basado en los sistemas de humedales artificiales de flujo vertical. Tesis para obtener el grado de ingeniero químico, Facultad de Química, D. F.
- Galván, V. (2011). *Remoción del nitrógeno amoniacal del lixiviado de basura por medio de un humedal artificial de flujo horizontal sub-superficial*. Tesis de Licenciatura ,Facultad de Química, D.F.
- García, E. (1988). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. México.
- Garcia, Z. M. (2012). *Comparación y evaluación de tres plantas acuáticas para determinar la eficiencia de remoción de nutrientes en el tratamiento de aguas residuales domésticas*. Tesis de ingeniero sanitario no publicada. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Gómez, J. L., Blancas, G., Constanzo, E., y Cervantes, A. (2014). *Análisis de la calidad de aguas naturales y residuales con aplicación a la microescala*. D.F., México: FES Zaragoza, UNAM.
- Gutierrez, J. (2003). Reusó de agua y nutrientes. Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente. Centro de información, gestión y educación

ambiental (Cigea). Recuperado: [www.medioambiente.cu/reivistama/articulo41.htm](http://www.medioambiente.cu/reivistama/articulo41.htm)

- Hadad, H., Maine, M., y Bonetto, C. (2006). Macrophytes growth in a pilot-scale constructed wetlands for industrial wastewater treatment. *Chemosphere*, 63, 1754-1763.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). VII, VIII, IX, X, XI, XII y XIII Censos Generales de Población y Vivienda. Resultados Definitivos. Estado de Puebla. Tomado de [www.inegi.gob.mx/prod\\_serv/contenidos](http://www.inegi.gob.mx/prod_serv/contenidos)
- Jairo, A. (2001). *Potabilización del agua*. Colombia: Alfaomega
- Jenssen, P., Maehlum, T., Krogstad, T. (1993). Potential use of constructed wetlands for wastewater treatment in northern environments. *Water Sci. Technol.* 28, 149–157.
- Jiménez, B., Torregrosa, Aboites., L. (2010). El agua en México: cauces y encauces. CONAGUA.
- Kyambadde, J., Kansiime, F., Gumaelius, L., Dalhammar, G., (2004). A comparative study of *Cyperus papyrus* and *Miscanthidium violaceum*-based constructed wetlands for wastewater treatment in a tropical climate. *Water Res.* 38, 475-485.
- Langergrabel, G., Prandtstetten, C., Pressl, A., Rohrhofer, R. y Haberl., R. (2007). "Optimization of Subsurface Vertical flow Constructed Wetlands for Wastewater Treatment". *Water Science and Technology*, 55, 72-78.
- Lanza-Espino, G. y Arredondo, J. L. (1990). *La acuicultura en México de los conceptos a la producción*. Instituto de Biología. UNAM: D.F., México.
- Lee, C., Fletcher, Tim., Sun, G. (2009). Nitrogen removal in constructed wetland system. *Eng. Life Sci.*, 9 (1), 11-22.
- Llagas, W., y Guadalupe, E. (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. *Revista del Instituto de Investigaciones FIIMMG*, 15 (17), 85-96.

- López, R. (2014). *Los servicios del agua potable y saneamiento en la ciudad de Puebla. Sujetos sociales, poder y modelo de gestión 1984-2010*. Puebla, México: Benemerita Universidad Autonoma de Puebla.
- Lorenzo, Y., Obaya, M. (2005). La digestión anaerobia: aspectos teóricos: Parte I. *ICIDCA*, 1, 35-48
- Lu, Xu-ji. (2013). Application of constructed wetlands for the nitrogen removal. *Civil & enviromental wetlands engineering*, 1, 1-6.
- Mancilla, R., Zuñiga, R., Salgado, E., Schippacasse, M. y Chamy R. (2013). Constructed wetlands for domestic wastewater treatment in a Mediterranean climate region in Chile. *Electronic Journal of Biotechnology*, 16 (4), 1-13.
- Martelo, J., y Lara, J. (2012). Macrofitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales: una revisión del estado de arte. *Ingería y Ciencia, ing. cin.*, 8 (15), 221-243.
- Marín, J., Correa, J. (2010). *Evaluación de contaminantes en aguas residuales en humedales artificiales utilizando Guadua aungustifolia Kunth*. Tesis de licenciatura, Universidad Tecnológica de Pereira Facultad de tecnología, Pereira, Colombia.
- Marín, S. (2002). *Tratamiento de aguas residuales mediante un sistema de humedales artificiales a nivel laboratorio*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Química. Universidad Autónoma del Estado de México, México.
- Mendoca, S. (2000). *Sistemas de lagunas de estabilización: cómo utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de regadíos*. Bogotá, Colombia: McGraw Hill.
- Metcalf, L., Y Harrison P.E. (1981). *Tratamiento y depuración de aguas residuales*. Barcelona, España: Labor SA.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2001). *Guía técnica para el desarrollo de proyectos de reusó de aguas residuales domesticas municipales*. Bogotá, Colombia
- Moshiri, G. (1993). *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. Estados Unidos: LEWIS PUBLISHERS.

- Moshir, G. (1993). Constructed wetlands for water quality improvement in R.P. Tettleton (Ed.) *Performance of a Constructed Marsh in the Tertiary Treatment of Bleach Kraft Pulp Mill Effluent: Results of a 2-year Pilot Project* (437-440) FL, Estados Unidos: Lewis Publishers
- Norma Oficial Mexicana NMX-AA-028-SCFI-2001. Análisis de agua - determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO<sub>5</sub>) y residuales tratadas.
- Norma Oficial Mexicana NMX-AA-030/1-SCFI-2012. Análisis de agua - medición de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.
- Norma Oficial Mexicana NMX-AA-42-1987. calidad del agua determinación del número más probable (NMP) de coliformes totales, coliformes fecales (termotolerantes) y *Escherichia coli*. presuntiva.
- NORMA Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público.
- Norma Oficial Mexicana NOM-CCA/032-ECOL/1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las aguas residuales de origen urbano o municipal para su disposición mediante riego agrícola.
- Ozalde, M. (2016). *Tratamiento y reutilización de aguas grises en un humedal artificial dentro de un invernadero en Iztapalapa, México, Distrito Federal*. Tesis de licenciatura no publicada, FES Zaragoza, Ciudad de México, México.
- Ramos, R., Sepúlveda, R., y Villalobos, F. (2003). *El agua en el medio ambiente. Muestreo y análisis*. D.F., México: Plaza y Valdes Editores.
- Reed S. C., Crites R. W., y Middlebrooks E. J. (1995). *Natural Systems for Waste Management and Treatment.*, New York, E.E.U.U.: McGraw Hill.
- Rehman, F., Perves, A., Nawab, B. y Ahmad, R. (2016). Constructed Wetlands: Perspectives of the Oxygen Released in the Rhizosphere of Macrophytes. *Clean Soil Air Water*, 47, 1-9.



- Romero, M., Colin, A., Sánchez, E., y Ortiz, M. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Rev. Int. Contam. Ambient*, 5 (3), 157-167.
- Roldan, G., y Ramírez, J. (2008). *Fundamentos de limnoecología neotropical*: Colombia: Editorial Universidad de Antioquía.
- Rhue, R. D., y Harris, R. G. (1995). Phosphorus sorption/Desorption Reactions in Soils and Sediments. En K. R. Reddy., G. A. O'Connor., y C. L. Schelske (Ed.), *Phosphorus Biochemistry in SUBTROPICAL ECOSYSTEMS* (187-206). Boca Raton, Florida: CRC Press LLC.
- Sainz, J. (2005). *Tecnologías para la sostenibilidad. Procesos y operaciones unitarias en la depuración de aguas residuales*. Madrid, España: Fundación EOI.
- Senzia, M.A., Mashauri, D.A., y Mayo, A.W. (2003). Suitability of constructed wetlands and waste stabilization ponds in wastewater treatment: nitrogen transformation and removal. *Phys. Chem. Earth* 28, 1117-1124.
- Shiklomanov, I. A. (2000). Appraisal and Assessment of World Water Resources. *Water International*, 25 (1), 11-32.
- Silva, J., Torres, P., Madera, C. (2008). Reusó de aguas residuales domésticas en agricultura. Una revisión. *Agronomía Colombiana*, 347-359.
- Solís, R., López, G., Bautista, R., Hernández J. y Romellón M. (2016). Evaluación de humedales de flujo libre y susuperficial en la remoción de contaminantes de aguas residuales utilizando diferentes especies de vegetación acuática. *INTERCIENCIA*, 41, 40-47.
- Spileres, D. J., y Mitch, W.J. (2000). The effects of season and hydrologic and chemical loading on nitrate retention in constructed wetlands. A comparision of low-hignutrient riverine systems. *Ecol. Eng.*, 4, 77-91.
- Stottmeister, U., Wiebner, A., Kusch, P., Kappelmeyer, U., Kästner, M., Bederski, O., Müller, R.A., y Moormann, H., (2003). Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnol. Adv.* 22, 93- 117

- Tanner, C., Clayton, J., y Upsdell, M. (1995). Effect of the loading rate and planting on treatment diary farm wastewaters in constructed wetlands-II. Removal of nitrogen and phosphorus. *Water research*, 29 (1), 27-34.
- Tebbutt, T. (2001). *Control de la calidad del agua*. Distrito Federal, México: Editorial Limusa
- Toledo, A. (2002). El agua en Mexico y en el mundo Gaceta Ecológica, 64. 9-18.
- UC-Pedraza, R. y Delgado-Blaz, V. (2012). determinación de la concentración letal media (cl50) de cuatro detergentes domésticos biodegradables en *Laeonereis culveri* (webster 1879) (polychaeta: annelida). *Revista Contam Ambie*, 28 (2), 137-144.
- Veliz, E., Llanes, J., Asela, L., Bataller, M. (2009). Reúso de aguas residuales domésticas para riego agrícola. Valoración crítica. *Revista CENIC Ciencias Biológicas*, 40, (1), 35-44.
- Vymazal, J. (1995). *Algae and element cycling in wetlands*. Chelsea Michigan: Lewish Publishers.
- Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the Total Enviroment*. 380, 48-65.
- Vymazal, J. (2011). Constructed wetlands for wastewater treatment: five decades of experience. *Environ. Sci. Technol*, 45, 61-69.
- Vymazal, J. (2008). Constructed wetlands for wastewater treatment: A review. *Segnupta*, 965-980
- Vymazal, J. Köpfelová, L. (2009). Removal of organics in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: A review of the field experience. *Science of the total enviroment*, 407, 3911, 3922.
- Vymazal, J., y Köpfelová, L. (2008). *Wastewater treatment in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow*. Republica Checa: Springer
- Wu, S., Kuschik, P., Brix, H., Vymazal, J., & Renjie, D. (2014). Development of constructed wetlands in performance intensifications for wastewater treatment: A nitrogen and organic matter targeted review. *water research*, 40-55.

- Zurita, F., De Anda, J., y Belmont, M. (2009). Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 35, 861-869.