

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA



Humedal con *Canna indica* como Tratamiento Terciario de Agua Residual del Rastro  
Tipo Inspección Federal 377

Presentado por:

**BRENDA ZULEMA MACIEL RODRIGUEZ**

TESIS

Presentada como requisito para obtener el título de:

**INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA**

Saltillo, Coahuila, México

Junio, 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA

“Humedal con *Canna indica* como Tratamiento Terciario de Agua Residual del Rastro  
Tipo Inspección Federal 377”

Por:

**BRENDA ZULEMA MACIEL RODRÍGUEZ**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA**

Aprobada por el Comité de Asesoría:

  
Dra. Silvia Yudith Martínez Amador

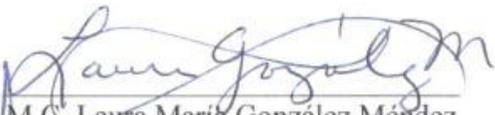
Asesor Principal Interno

  
Dr. José Antonio Rodríguez de la Garza

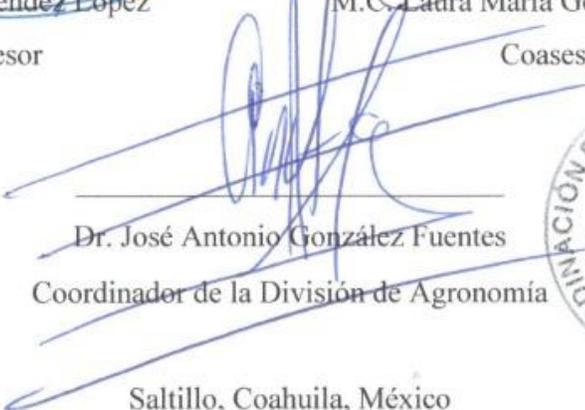
Asesor Principal Externo

  
Dr. Alonso Méndez López

Coasesor

  
M.C. Laura María González Méndez

Coasesor

  
Dr. José Antonio González Fuentes

Coordinador de la División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México

Junio, 2022



### **Declaración de no plagio**

El autor quien es el responsable directo, jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, graficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente, así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por las autoridades correspondientes.

Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo es original.

Pasante



---

Brenda Zulema Maciel Rodríguez

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mi Alma Mater, **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, por brindarme un espacio en el que se me proporcionaron las herramientas necesarias para adquirir sabiduría y experiencia en mi camino a formarme como profesionalista. Así mismo al personal docente que labora en la universidad, que nos facilita y proporciona la adquisición de conocimientos en nuestro camino de formación académica.

A Don **Antonio Narro Rodríguez** y su hermana **Trinidad Narro Rodríguez**, por contribuir y donar sus propiedades para la creación de tan prestigiosa universidad.

Al **Programa de Becas Académicas** de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por el apoyo económico brindado en el tiempo que me mantuve como estudiante.

A la Dra. **Silvia Yudith Martínez Amador** por haber contribuido en mi formación académica compartiéndome mucho de su conocimiento, por la confianza depositada, por sus consejos, paciencia, empatía y por haber sido una gran fuente de inspiración para seguir con mis estudios.

Al **Departamento de Botánica** por brindarme el acceso a un espacio de trabajo, a materiales y equipo con los cuales se pudo llevar a cabo este proyecto de investigación.

A **Alexandra Elbakyan** por facilitarme a mí al igual que a otros estudiantes e investigadores el acceso gratuito al conocimiento científico, necesario para llevar a cabo indagación e investigación científica más profunda.

## **DEDICATORIAS**

A mi madre **Bertha Marina Rodríguez Leija** por creer y nunca haber perdido la fe en mí, por su apoyo y amor incondicional, por las palabras de aliento y por cuidar de mí siempre.

A mi hermana **Marina Joselyn** por ser una fuente de inspiración para seguir creciendo, por ser mi sunshine siempre que lo necesité a lo largo de este camino.

A mi hermana **Giovanna Elizabeth** por enseñarme a ser fuerte y perseverante en la vida, por demostrarme que todo es posible de alcanzar mientras te lo propongas.

A mi sobrina **Eimy (Yolotzin)** por regalarnos a mi familia y a mí los momentos de alegría que en repetidas ocasiones nos llenan de felicidad, permitiendo así que veamos la motivación y alegría de cada día al igual que lo ve un niño.

A mi abuela **Josefina Leija Flores** por apoyarme siempre y protegerme, por ser una fuente de inspiración a la tolerancia y paciencia que se debe tener en la vida.

A mi tío **Gerardo Rodríguez** por recordarme siempre ser fiel a mis principios.

A mis amigos cercanos **Gabriel Azael, Karla, Flor y Rodolfo** quienes han sido una fuente de inspiración a alcanzar mis logros, a siempre ver el lado positivo de las situaciones y a recordarme que soy valiosa para muchos de los que me rodean.

A mi compañero y amigo **Santiago Márquez Segundo**, por todo el apoyo brindado a lo largo de este camino, por su sabiduría y por compartirme su tiempo, por las risas y las experiencias vividas.

A mis **compañeros de generación y de carrera**, de los cuales muchos plasmaron en mí una parte de su sabiduría de vida, por las risas y por haber hecho más ámenos los días de estudio.

A todos **mis maestros** que uno a uno dejo a su manera conocimientos importantes para mis próximas experiencias laborales.

A mi padre **Joaquín Maciel Ortiz** por su apoyo económico y moral en este trayecto.

A **Dios** por no abandonarme en los peores momentos.

## ÍNDICE

INDICE DE FIGURAS.....	VIII
RESUMEN.....	IX
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. OBJETIVO GENERAL .....	3
3. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	3
4. HIPOTESIS.....	4
5. JUSTIFICACIÓN .....	4
6. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	5
6.1 Rastro TIF.....	5
6.2 El Agua.....	5
6.3 Agua residual del rastro.....	5
6.4 Agua residual del rastro implicaciones ambientales .....	6
6.5 Pretratamiento .....	7
6.7 Humedales artificiales .....	9
6.8 Funcionamiento de un humedal.....	10
6.9 Uso de humedales artificiales como tratamiento terciario para agua residual del rastro.....	11
6.10 <i>Canna indica</i> .....	11
7. MATERIALES Y METODOS .....	13
7.1 Ubicación del experimento.....	13
7.2 Descripción del sistema de tratamiento humedal .....	13
7.3 Establecimiento del experimento .....	13
7.4 Muestreos y parámetros evaluados.....	14
7.5 Métodos analíticos.....	15
7.5.1 Potencial de hidrogeno (pH).....	15
7.5.2 Conductividad.....	15
7.5.3 Salinidad .....	16
7.5.4 Determinación de la demanda química de oxígeno .....	16
7.5.5 Material y equipo .....	17
8. DISCUSIÓN Y RESULTADOS .....	19
8.1 DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO .....	19
8.2 pH .....	22

8.3 SALINIDAD Y CONDUCTIVIDAD.....	24
9. CONCLUSIÓN.....	29
10. BIBLIOGRAFÍA .....	30

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Clasificación de sistemas de humedales artificiales. ....	9
<b>Figura 2.</b> <i>Canna indica</i> L. ....	12
<b>Figura 3.</b> Construcción de humedal artificial. ....	13
<b>Figura 4.</b> Humedal establecido.....	14
<b>Figura 5.</b> Toma de pH en muestra de efluente .....	15
<b>Figura 6.</b> Toma de salinidad y conductividad en la muestra.....	16
<b>Figura 7.</b> Comportamiento de la DQO en el influente y efluentes (biofiltro y humedal). .....	20
<b>Figura 8.</b> Porcentaje de eficiencia de remoción de la DQO en el sistema de tratamiento secundario (biofiltros anaerobios) y en el humedal. ....	21
<b>Figura 9.</b> Porcentaje de eficiencia de remoción de la DQO en el humedal. ....	22
<b>Figura 10.</b> Comportamiento del pH en el influente (biofiltro) y efluente (humedal). ....	24
<b>Figura 11.</b> Comportamiento de la salinidad en el influente y efluentes (biofiltro y humedal).....	25
<b>Figura 12.</b> Comportamiento de la conductividad eléctrica en el influente y efluentes (biofiltro y humedal). ....	27
<b>Figura 13.</b> Agua residual del rastro municipal TIF 377 sin tratamiento (a), efluente de tratamiento secundario con biofiltros (b) y efluente del tratamiento terciario con humedal artificial (c).....	28

## RESUMEN

La escases de agua potable que se ha ido acelerando en los últimos años, aunado al incremento poblacional, ha hecho necesario el uso de tecnologías para la remediación de aguas residuales, poniendo especial atención a las tecnologías autosustentables; los rastros TIF son establecimientos dedicados al sacrificio de animales para el consumo humano, siendo el control de higiene y calidad su objetivo más importante, para lo que es necesario el uso de grandes volúmenes de agua para llevar a cabo todo el proceso de manufactura, siendo desechados posteriormente como aguas residuales con alta carga orgánica y características fisicoquímicas que representan un foco de contaminación para el medio ambiente y los ecosistemas al ser vertidas en el alcantarillado o derramadas en suelos sin un previo tratamiento. El uso de humedales artificiales se ha visto como una solución prometedora, esto debido a ventajas como: bajo costo para su construcción, requiere de una inversión baja de energía externa, es eficiente como depurador, visualmente agradable y fácil de operar. Este estudio evaluó la eficiencia en la remoción de DQO, salinidad, conductividad eléctrica y comportamiento del pH en un humedal construido, usando *Canna indica* como especie fitodepuradora. El experimento consto de un módulo de plástico rectangular, con un volumen de trabajo de 16.2 litros, con piedra volcánica como soporte y plantas de *Canna indica*. Se alimentó el humedal con agua procedente de un biorreactor tratamiento secundario, el humedal estuvo bajo aireación controlada. El humedal fue operado con alimentación continua a un TRH de 4 días. Las muestras de agua residual (influyente y efluente) se colectaron diariamente durante 100 días para determinar la concentración de DQO, salinidad, CE y pH. Obteniendo una remoción de hasta el 99.55% para DQO, para salinidad se presentó como valor máximo 3.488 ppt y un valor mínimo de 0.361 ppt, la CE obtuvo un alcance del 19.48% de remoción y el pH presentó una ligera alcalinidad de entre 7.7 a 8.9 a lo largo del tratamiento. Concluyendo en que el humedal construido, utilizando la especie macrófita *Canna indica* es eficiente para el tratamiento terciario de agua residual de rastro municipal TIF 377, debido a su capacidad de aumentar la reducción de los parámetros contaminantes mencionados.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los rastros Tipo Inspección Federal (TIF) son establecimientos en los que se realizan sacrificios de animales para consumo humano, tienen instalaciones reguladas por organismos públicos para el monitoreo de prácticas adecuadas y para el cumplimiento de las normas de higiene obligatorias, es por ello que estos sitios utilizan grandes volúmenes de agua en cada etapa de procesamiento, para la limpieza de instrumentos y aseo del lugar, lo que resulta en un alto porcentaje de descargas de aguas residuales al ambiente (OCDE, 2018; Porchietto, 2006; Procuraduría Federal del Consumidor, 2019).

El agua resultante en el procesamiento por cada animal sacrificado tiene gran cantidad de carga orgánica, compuestos nitrógenados, sales, plaguicidas, residuos de detergentes y desinfectantes; en la mayoría de los casos estos desechos son vertidos en el drenaje municipal pasando únicamente por un pretratamiento, en el que se retiran sólidos que pudiesen obstruir tuberías, pero se le resta valor a los tratamientos en que otros desechos de importancia pueden ser reducidos o eliminados; generando graves problemas ambientales en que los efluentes propician la contaminación de fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano, eutrofización y alteraciones en los ecosistemas acuáticos (Porchietto, 2006 ; Ruiz-Dávila, 2011; Signorini, 2008).

Un tratamiento terciario es utilizado cuando se necesita obtener agua residual con mayor grado de calidad ya sea para reutilizar o para verterla en aguas superficiales; con esto se evita que gran parte de materia orgánica remanente y nutrientes como el fosforo y nitrógeno lleguen a sitios en donde pueden ocasionar alteraciones; los sistemas naturales propuestos para este tipo de tratamiento han mostrado alta efectividad en remoción de distintos componentes, además resultan económicos para su construcción y mantenimiento (Aguilar, 2009; Gerba, 2017; Monográficos Agua en Centroamérica, 2008).

A partir de observar los beneficios propiciados por los humedales que se encuentran en la naturaleza el hombre recreó e implemento estos espacios como fitodepuradores para su uso en aguas residuales; en estos se proveen las características adecuadas de suelo, agua, luz y aire para el mantenimiento y desarrollo de algunas plantas acuáticas que interactúan con los microorganismos y su entorno, generando procesos biológicos, físicos y químicos

capaces de degradar, absorber, filtrar y sedimentar gran parte del material que se requiere eliminar de los efluentes (Carvajal-Rowan *et al.*, 2018; Choudhary *et al.*, 2011; Mburu, 2016).

*Canna indica* es una planta superior macrófita adaptable al medio acuático, que ha demostrado funcionalidad para humedales dirigidos a remoción de contaminantes, al tener una notable generación de biomasa radicular proporciona una mayor superficie para el crecimiento de microorganismos que mantienen un nivel de oxígeno adecuado en el agua, apoyan en la descomposición de la materia orgánica y promueven la nitrificación, aunado a los procesos fisiológicos propios de la planta se promueve la mineralización de elementos presentes en el agua (Carvajal-Rowan *et al.*, 2018; Hernández, 2017).

## **2. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el desempeño de un humedal de *Canna indica* en el tratamiento terciario de agua residual del rastro TIF 377.

## **3. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- 1) Determinar el comportamiento de la Demanda Química de Oxígeno del tratamiento terciario de agua residual del rastro TIF 377.
- 2) Determinar el comportamiento del pH del tratamiento terciario de agua residual del rastro TIF 377.
- 3) Determinar el comportamiento de la conductividad del tratamiento terciario de agua residual del rastro TIF 377.

#### **4. HIPOTESIS**

el uso de *Canna indica* en un humedal como tratamiento terciario de agua residual del rastro TIF 377 aumentará la remoción de materia orgánica, esto gracias a los procesos biológicos, físicos y químicos presentes en el sistema humedal y a las asociaciones mutualistas entre las plantas y microorganismos.

#### **5. JUSTIFICACIÓN**

La investigación sobre del funcionamiento de *Canna indica* en un humedal para apoyar el proceso de descomposición de materia orgánica resultantes del agua del rastro con previo tratamiento secundario puede brindar una alternativa para el tratamiento de aguas residuales, en la que se minimice el uso de agentes químicos. Los humedales requieren un mínimo gasto de energía, espacio y mantenimiento, además de aumentar los beneficios estéticos y ambientales al disminuir significativamente los contaminantes vertidos a los canales de agua, también aumenta las posibilidades de obtener un efluente con parámetros favorables para su reutilización.

## **6. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

### **6.1 Rastro TIF**

Los rastros Tipo Inspección Federal (TIF) son lugares que se encargan del sacrificio de animales para consumo humano, del proceso, industrialización, comercialización e incluso exportación de alimentos cárnicos y los productos derivados; estos sitios son regulados por leyes y normas de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) para asegurar el cumplimiento de los estándares de calidad, sanidad e inocuidad obligados. En México existen más de 450 establecimientos registrados en el sistema TIF (Estudillo-Mendoza, 2014; García-Ramos, 2016; Servicio Nacional de Sanidad, 2020).

### **6.2 El Agua**

En México como en el mundo existe un creciente requerimiento de agua limpia, debido al aumento de la población, al crecimiento industrial y la urbanización; la demanda del líquido vital que cada sector requiere para proceder con sus actividades diarias va inherente al incremento del número de habitantes, de la misma forma el volumen de efluentes domésticos e industriales que son desechados asciende cada día; esto hace necesaria la búsqueda de alternativas funcionales y de bajo costo, que permitan el avance hacia el desarrollo sustentable de las poblaciones; que como punto principal, aceleren la recuperación de agua que pueda tratarse y reutilizarse para el abastecimiento de ciertas actividades económicas, como se hace en la agricultura o la actividad industrial, reduciendo el porcentaje de agua potable desperdiciada normalmente por estos sectores, permitiendo así, hacer frente a problemas como la escases de agua y a la contaminación producida por el vertido de efluentes al medio ambiente (Blazquez, 2010; Escalante *et al.*, 2003; Reyes-Vidal *et al.*, 2012).

### **6.3 Agua residual del rastro**

Un rastro genera grandes volúmenes de aguas residuales proveniente de cada una de las etapas de manufactura; antes, durante y posterior al sacrificio, en los procesos de bañado del animal, de los corrales de reposo, del sacrificio, manufactura de los productos, incluso

de la limpieza del lugar y utensilios, por lo que resulta cargada de distintos tipos de residuos: materia orgánica, sangre, pelo, grasa, aceite, detergente, desinfectante, antibióticos, metales pesados, nitratos, nitritos, fosfatos y patógenos (particularmente coliformes fecales y parásitos), los cuales representan una problemática de salud pública y de contaminación para el medio ambiente (Giner-Santoja *et al.*, 2017; Signorini-Porchietto *et al.*, 2006).

#### **6.4 Agua residual del rastro implicaciones ambientales**

Del agua utilizada en un rastro se desecha de un 80 a un 95%, es decir, la proporción de agua usada y desechada está directamente relacionada, el efluente está compuesto por altas concentraciones de sangre, grasas, sólidos, sales biliares, hidratos de carbono, detergentes y desinfectantes; siendo las principales fuentes las provenientes de los procesos de lavado, del desangrado y evisceración, por esto contiene una alta cantidad de materia orgánica; es decir, la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda biológica de oxígeno (DBO) en el efluente se encuentran en valores altos. Así mismo este tipo de desechos genera altas temperaturas y favorece las condiciones necesarias para la proliferación y desarrollo de microorganismos patógenos (*Salmonella spp.*, *Shigella spp.*), parásitos, huevos de parásitos y helmintos (Andrade-Balao, 2008; Arreguín-Cortés *et al.*, 1997; Gerba, 2017; Lozano *et al.*, 2013; Salas & Condorhuamán, 2008).

Un efluente que tiene alta demanda de oxígeno disuelto (DBO/DQO), así como presencia de organismos patógenos representa una fuente importante de contaminación ambiental y un foco de infección para la población; al ser vertido en el alcantarillado o derramado en el suelo se incorpora a los ecosistemas, ocasionando alteraciones negativas en su composición y funcionamiento. Cuando agua residual con dichas características se infiltra a cuerpos de agua superficiales o subterráneos provoca un ambiente anóxico, debido a que elimina altas cantidades del oxígeno disponible, lo que priva a los demás organismos de este elemento y provoca su muerte, igualmente el alto contenido de microorganismos patógenos se pueden reincorporar a la cadena trófica por medio del aire o filtrarse en cuerpos de agua utilizados por poblaciones adyacentes; si este efluente se derrama en el suelo altera la composición microbiológica del lugar, afecta su pH y proporciona condiciones adecuadas para el desarrollo de microorganismos no autóctonos-patógenos

(Adesemoye, 2006; Fransen *et al.*, 1996; Astorga-Márquez 2007; Moreno-García, 2006; Nieto-Ugarte, & Huaman-Lustre, 2019; Salas & Condorhuamán, 2008).

## **6.5 Pretratamiento**

El sistema de tratamiento de aguas residuales en los mataderos es muy deficiente debido a los altos costos que llega a tener adquirir un sistema adecuado para su depuración. Es por ello que muchos de los establecimientos solo se interesan en disminuir DBO y los sólidos suspendidos con el objetivo de alcanzar los parámetros y límites máximos permisibles de contaminantes, para la descarga de agua residual al alcantarillado o drenaje municipal; muchos lugares solo aplican un tratamiento preliminar que consta en el uso de rejillas para cribar sólidos gruesos, aunque esto no logra tener grandes efectos sobre la disminución de DBO o sólidos suspendidos. Además de las rejillas de cribado se utiliza el sistema trampa de grasas, que consiste en la reducción de la alta concentración de grasas que poseen los residuos de un matadero, con este pretratamiento se eliminan hasta en un 90%, lo que evita en gran medida el bloqueo de tuberías o sistemas de bombeo y un estancamiento posterior que genere malos olores o complicaciones (Buborg-Morales, 2010; Carvajal-Rowan *et al.*, 2018; Gómez-González *et al.*, 2000; Moreno-García, 2006; Naranjo-Santa, 2014; Ruíz-Dávila, 2011).

### 6.6 Etapas o pasos del tratamiento de aguas residuales

El tipo de tratamiento a implementar para aguas residuales dependerá de la calidad del efluente que busquemos obtener, estos se dividen en tres etapas:

El tratamiento primario es posterior al cribado o tamizado de los sólidos gruesos; consiste en la remoción de los sólidos suspendidos, de la materia orgánica e inorgánica; por medio del uso de tanques de sedimentación, se utiliza la fuerza de gravedad como principio para llevar al fondo los sólidos de mayor peso mediante el fenómeno de asentamiento, para posteriormente removerlos, en estos tanques se puede utilizar floculante para facilitar el proceso de sedimentación, también se utilizan tanques de flotación: su tecnología consiste en añadir gas al tanque para hacer subir las partículas sólidas a la superficie y así eliminarlas con ayuda de rascadores. El tratamiento primario es capaz de remover entre el 50 y 70 % de sólidos suspendidos, 30% de la Demanda Bioquímica de Oxígeno, 60% de

sebos, grasa y aceites, además de especies biológicas dañinas para la salud, como lo son los quistes de protozoarios y huevos de helmintos (Cisneros *et al.*, 2001; Juárez-Chota, 2018; López-Navajas, 2015; Muñoz -Muñoz, 2005; Sonune & Ghate., 2004).

El tratamiento secundario se centra en la degradación o reducción de la materia orgánica coloidal y solidos disueltos mediante procesos biológicos aerobios, anaerobios, anóxicos o combinados, entre los tratamientos más utilizados se encuentran las lagunas estabilizadoras y el de lodos activados. Algunos tipos de organismos y microorganismos como: bacterias, algas, hongos, metazoos, protozoos y nematodos resultan de gran importancia para el funcionamiento de estos sistemas, debido a que según las condiciones físico químicas en los reactores donde se desarrollen, metabolizan la materia orgánica y la transforman en inorgánica o solidos sedimentables floculentos, lo que facilita su eliminación del influente; estos procesos ofrecen una reducción de DBO mayor del 80%, disminución de solidos suspendidos de entre un 65 a un 92% , eliminan una parte de fosforo y dependiendo de la operación y el proceso se puede llegar a una nitrificación parcial, alcanzando valores de remoción de hasta un 30%, además, pueden contribuir a la eliminación de helmintos, protozoos y bacterias que representan un peligro para la salud humana ( Cisneros *et al.*, 2001; Juárez-Chota, 2018; López del Pino & Martín-Calderón, 2015; López-Navajas, 2015; Moreno-García, 2006; Wen *et al.*, 2009).

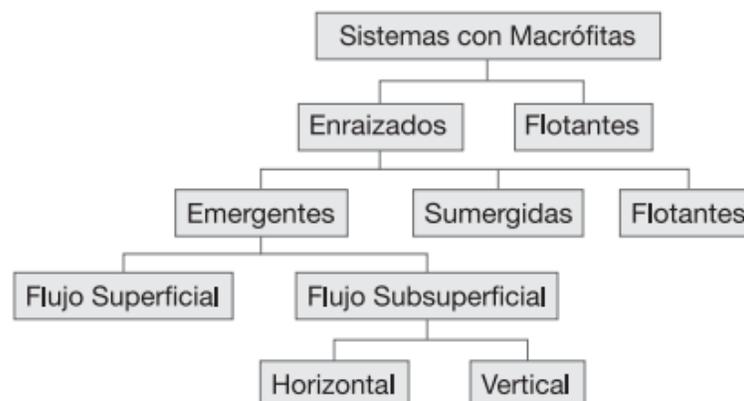
Finalmente, los tratamientos avanzados, también llamados tratamientos terciarios pueden ser biológicos o fisicoquímicos y tienen como objetivo remover materia que quedase remanente en el efluente obtenido de los procesos anteriores, es decir, se encarga de alcanzar altas condiciones de calidad para el agua resultante con el objetivo de darle reúso. Estos tratamientos son capaces de reducir la presencia de nitrógeno, fosforo y algunos metales pesados, también se encarga de eliminar gran parte de organismos patógenos que pudiesen sobrevivir a otros procesos, tales como helmintos y parásitos protozoarios, los cuales alcanzan tasas de reducción de entre un 95 y un 99.9 % , así como una remoción de 99% de coliformes, entre estos tratamientos podemos encontrar: tratamientos de sedimentación, filtración, adsorción en carbón activo, de intercambio iónico, destilación, osmosis inversa, cloración u ozonación, entre otros más, este tipo de tratamientos son del tipo fisicoquímico, existen además los tratamientos biológicos que

son sistemas construidos por el hombre para imitar los sistemas de depuración de la naturaleza, entre ellos: lagunares, sistemas de infiltración en el terreno y humedales artificiales (Gerba, 2017; Noyola *et al.*, 2013; Rojas, 2002).

### 6.7 Humedales artificiales

Los humedales artificiales representan una buena alternativa para el tratamiento de aguas residuales, esto debido a ventajas como: bajo costo para su construcción, requiere de una inversión baja de energía externa, es eficiente como depurador, visualmente agradable y fácil de operar; estos humedales son sistemas depuradores de agua que utilizan fenómenos físicos, microbiológicos, biológicos y químicos que ocurren normalmente en la naturaleza; son lugares construidos por el hombre que pueden ser áreas o lechos inundados, como: lagunas, canales o estanques, en los que se establecen monocultivos o policultivos de plantas macrófitas acuáticas o con capacidad de soportar lugares inundados, con esto, se busca imitar las funciones que se dan en los humedales naturales, pero controlando el influente que reciben, los tiempos de tratamiento, la ubicación del humedal y adecuándolo al clima y el espacio que se tiene para instalarlo (Alarcón-Herrera *et al.*, 2018; CONAGUA, 2019; Hoffmann *et al.*, 2011; Peña-Varón *et al.*, 2003; Sierra-Pech & López-Ocaña, 2013; Torrens-Armengol, 2016).

Existen diferentes tipos de humedales según su modo de funcionamiento y sus componentes, Delgadillo *et al.* (2010) menciona la siguiente clasificación de sistemas de humedales artificiales que trabajan con ayuda de macrófitas:



**Figura 1.** Clasificación de sistemas de humedales artificiales (Delgadillo *et al.*, 2010).

## 6.8 Funcionamiento de un humedal

Un humedal artificial es un sistema que funciona en conjunto; sus principales componentes son el agua residual para tratar, el sustrato y el cultivo de plantas macrófitas, estos mantienen interacciones con microorganismos y componentes de la atmosfera; cada uno cumple un objetivo importante en el funcionamiento del humedal y en la eliminación de los residuos. El sustrato funciona en ciertos casos como soporte para las raíces de las plantas, filtra los sólidos disueltos y suspendidos, y además en él se forma película microbiana; las plantas macrófitas transfieren el oxígeno de la atmosfera hacia sus raíces y con ello permite la transformación de la materia orgánica por medio de oxidación y la acción de microorganismos aerobios, utiliza los nutrientes asimilables y los transforma en parte de su biomasa, pueden exudar compuestos con efecto alelopático ante microorganismos patógenos y además el sistema radicular funciona como sostén para desarrollar biopelícula; en estos sistemas los microorganismos que se fijan y desarrollan en el sustrato o raíces de las plantas son principalmente aerobios o facultativos que efectúan funciones complejas con las que degradan la materia orgánica e inorgánica en compuestos más simples. En el proceso también se eliminan nitratos y fosfatos por asimilación vegetal, nitrificación, desnitrificación, filtración o sedimentación; los organismos patógenos y coliformes fecales son removidos del sistema por mecanismos como el antagonismo microbiano, volatilización, irradiación UV y la sedimentación, sin embargo, el agua residual que recibe un humedal debe haber pasado por algún tratamiento en el que su carga orgánica se haya disminuido significativamente y los sólidos suspendidos de gran tamaño se hayan eliminado, para que pueda trabajar adecuadamente y degradar los contaminantes restantes en la mayor cantidad posible, ya que al utilizarse como tratamiento terciario solo se encarga del pulimiento final de residuos en el efluente (Alarcón-Herrera *et al.*, 2018; Fernández-González, 2002; Greenway, 2005; Jiang *et al.*, 2016; Pérez-López, 2009; Romero-Aguilar *et al.*, 2009; Torrens-Armengol, 2016; Valderrama *et al.*, 1987).

## **6.9 Uso de humedales artificiales como tratamiento terciario para agua residual del rastro**

Los humedales artificiales utilizados como tratamiento terciario o secundario en aguas residuales de la industria cárnica han demostrado ser buena opción debido a su alta capacidad para pulir la carga orgánica y los nutrientes presentes en efluentes obtenidos de tratamientos principales, presentan una remoción favorable de DBO, SDT, SST, organismos patógenos, coliformes fecales, metales pesados, nitratos, fosfatos y materia inorgánica; son sistemas viables por su bajo costo de instalación, no representan un impacto negativo para el ecosistema y optimizan la calidad del agua obtenida, la cual al final logra cumplir con los parámetros adecuados para su reúso, por ejemplo en riego agrícola o para su vertido final a cuerpos de aguas continentales, es decir : deja de representar un riesgo ambiental y social (Arias-Martinez *et al.*, 2010; Bustillo-Lecompte & Mehrvar, 2017; Keerthana & Thivyatharsan, 2018; Okoye *et al.*, 2018; Wu *et al.*, 2015).

## **6.10 *Canna indica***

Ya que no existe un estándar para la construcción de un humedal, se debe elegir la especie o especies de plantas a utilizar en el mismo, las plantas macrófitas cumplen funciones importantes en los humedales, su sistema radicular representa un espacio de importancia para la formación de biopelícula y cada especie posee diferente capacidad de generar biomasa radicular, igualmente difieren en sus capacidades ya sea de remoción de contaminantes o para absorber y asimilar nutrientes, algunas incluso poseen la capacidad de secretar sustancias alelopáticas, es por ello que se debe considerar su eficiencia en estos aspectos; además deben adecuarse a los lugares en donde estén adaptadas, es decir, se deben tomar en cuenta las especies nativas o no invasoras, que puedan alcanzar su óptimo desarrollo con las condiciones físicas que le brinda la ubicación del sistema (Pérez-López, 2009; Morales *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2007).

La implementación del uso de especies ornamentales en humedales construidos se muestra como una opción favorable, por la estética que brindan al entorno y porque pueden representar una entrada monetaria en caso de querer explotarse como flores de corte para comercialización; *Canna indica* es una planta herbácea con amplia distribución en los

trópicos y subtropicos, ha sido cultivada como especie ornamental, mide aproximadamente de entre 1.5 hasta 3 metros de altura, posee hojas prolongadas, su rizoma es corto y robusto y sus flores varían de un color amarillo, anaranjado hasta rojo intenso, su crecimiento está ligado a lugares con mucha humedad y terrenos cenagosos, esta especie ha demostrado ser eficiente en la remoción de contaminantes tanto para aguas residuales domesticas como para agua proveniente del rastro (Alarcón-Herrera *et al.*, 2018; Calderón de Rzedowski, 1998; de las Mercedes Ciciarelli & Rolleri, 2008; Hernández-Vásquez, 2017; Morales *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2007).



**Figura 2.** *Canna indica* L. (Lindley, 1829).

## 7. MATERIALES Y METODOS

### 7.1 Ubicación del experimento

Esta investigación se realizó en el Laboratorio de Biología del Departamento de Botánica de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Saltillo. Los experimentos se llevaron a cabo en los meses de marzo a julio del año 2021, a temperatura ambiente y el agua residual del rastro utilizada en estos experimentos fue colectada del rastro TIF 377 ubicado en la carretera a Zacatecas km 8.

### 7.2 Descripción del sistema de tratamiento humedal

El humedal consistió en un módulo de plástico rectangular, con un volumen de 27 litros (75 cm largo x 45 cm ancho x 35 cm alto), con piedra volcánica como soporte y plantas de *Canna indica*. Las plantas utilizadas en el humedal fueron obtenidas de una planta de tratamiento destinado a tratar agua residual de un estanque con peces. El volumen de trabajo del reactor fue de 16.2 l.

### 7.3 Establecimiento del experimento

El día 4 de febrero del 2021 se rellenó el módulo de plástico con piedra volcánica a una altura de 16 cm, se sembraron especies de *Canna indica* y posteriormente se agregaron 19 litros de agua potable con el objetivo de proveer a las plantas para facilitar su establecimiento y propagación.



**Figura 3.** Construcción de humedal artificial.

El día 19 de marzo del 2021 se comenzó a alimentar el humedal con agua procedente de un biorreactor tratamiento secundario, el humedal estuvo bajo aireación controlada y se colocó un recipiente con capacidad de 20 litros para captar el efluente en la salida de este sistema terciario. El humedal fue operado con alimentación continua a un TRH de 4 días.



**Figura 4.** Humedal establecido.

#### **7.4 Muestras y parámetros evaluados**

Se realizó colecta periódica de agua proveniente del rastro TIF 377 en garrafones de 20 L, se muestreo el agua para determinar su pH, DQO, conductividad eléctrica y salinidad, posteriormente el agua no utilizada fue refrigerada. El ARR fue utilizada para alimentar un sistema de tratamiento secundario anaerobio (biofiltros) con ayuda de una bomba peristáltica.

Se muestreo agua del influente (agua residual del rastro previamente tratada por un sistema secundario) y del efluente (humedal) con el fin de determinar los siguientes parámetros: DQO, pH, conductividad y salinidad.

## 7.5 Métodos analíticos

Se llevó a cabo periódicamente el análisis de los parámetros: pH, conductividad, salinidad y DQO (NMX-AA030/2-SCFI-2011) determinados del influente y efluente del humedal artificial.

### 7.5.1 Potencial de hidrogeno (pH)

El pH es una medida de la acidez o naturaleza básica (alcalina) de una solución. La escala normal varía de 1 a 14, y la lectura neutra es de un valor de 7. Valores bajo 7 indican condiciones ácidas y valores superiores a este indican condiciones básicas. El pH se determinó utilizando un potenciómetro de la marca Thermo Scientific, Modelo Orion Star A215 equipado con un electrodo de ORION 8302BN. En algunas ocasiones también se utilizaron tiras indicadoras para medición de pH con finalidad de corroborar datos (Abarca, 2007; Madrid, 2009).



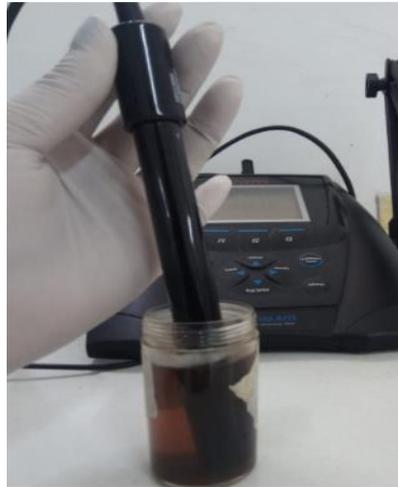
**Figura 5.** Toma de pH en muestra de efluente

### 7.5.2 Conductividad

Es la capacidad del agua de conducir corriente eléctrica. Está dada por la cantidad de iones disueltos en el agua: a mayor cantidad de iones mayor conductividad (Morales, 2000). La conductividad se determinó utilizando un potenciómetro de la marca Thermo Scientific, Modelo Orion Star A215 equipado con un electrodo de ORION 013005MD.

### 7.5.3 Salinidad

Parámetro que proporciona información sobre el contenido de sales disueltas en el agua (Díaz, 2019). La salinidad se determinó utilizando un potenciómetro de la marca Thermo Scientific, Modelo Orion Star A215 equipado con un electrodo de ORION 013005MD.



**Figura 6.** Toma de salinidad y conductividad en la muestra.

### 7.5.4 Determinación de la demanda química de oxígeno

Es la cantidad de oxígeno necesario para la oxidación de la materia orgánica e inorgánica presentes en una muestra de agua. Se entiende por demanda química de oxígeno (DQO) como la cantidad de materia orgánica e inorgánica en un cuerpo de agua, susceptible de ser oxidada por un oxidante fuerte. Se expresa en mg/l de oxígeno. La materia orgánica es oxidada por el dicromato de potasio en un medio fuertemente ácido en presencia del catalizador ( $\text{Ag}_2\text{SO}_4$  y  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). La coloración pasa de un color amarillo a verde-azul y se lee a una absorbancia de 620 nanómetros en un espectrofotómetro. Ésta es la base de las mediciones de los reactores anaerobios las condiciones de los parámetros de operación para los tratamientos de efluentes industriales y urbanos (Norma Mexicana NMX-AA-030-SCFI-2012).

### 7.5.5 Material y equipo

- Digestor termorregulador HACH DRB/200
- Tubos Hach con tapón de rosca
- Espectrofotómetro HACH Modelo DR 5000
- Micropipetas LABMATE SOFT (1/5000) (100/1000) ml
- Centrifuga SOLBAT J600
- Frascos ámbar de 1 litro
- Matraces de aforación de 1 litro
- Dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ )
- Sulfato de mercurio ( $HgSO_4$ )
- Ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ )
- Sulfato de plata ( $Ag_2SO_4$ )
- Biftalato de potasio ( $C_6H_4COOHCOOK$ )

#### Solución de dicromato de potasio

Solución digestora para altas concentraciones (mayores a 75 mg DQO/L). Secar durante 2 horas a 103 °C, 20 gramos de dicromato de potasio. Enfriar en un desecador y pesar 10.216 gramos de dicromato, pasar este dicromato a un matraz de aforación de un litro y añadirle 500 ml de agua destilada, adicionar 33.3 gramos de sulfato mercúrico ( $HgSO_4$ ), adicionar 167 ml de ácido sulfúrico concentrado lentamente por ser una reacción exotérmica en baño de hielo, por último aforar a un litro con agua destilada cuando la mezcla se haya enfriado, en el caso de que no todas las partículas se hayan disuelto, se mezcla con agitación magnética, para después pasar esta mezcla a un frasco ámbar, ya que puede sufrir una descomposición por la luz.

### Solución de ácido sulfúrico plata

Pesar con precisión 15 gramos de sulfato de plata, pasar este compuesto a un matraz de aforación de un litro, aforar a 1 litro con ácido sulfúrico concentrado, dejarlo reposar durante dos días en un lugar seco y oscuro para su completa disolución. Después pasar esta solución a un frasco ámbar. Procedimiento

1. En un tubo HACH añadir 3.5 ml de la solución de ácido plata y 1.5 ml de la solución de dicromato de potasio.
2. Agregar 2.5 ml de la muestra problema, cerrar bien con el tapón de rosca; es necesario realizar un blanco de referencia (agua destilada).
3. Agitar lentamente por inversión. Colocar los tubos en el Digestor durante 2 horas a 150°C.
4. Sacar los tubos y dejar enfriar a temperatura ambiente. Leer las absorbancias en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 620 nm.
5. Calcular la concentración de la DQO con la curva estándar.

Esta técnica fue realizada de acuerdo con la NMX-AA030/2-SCFI-2011.

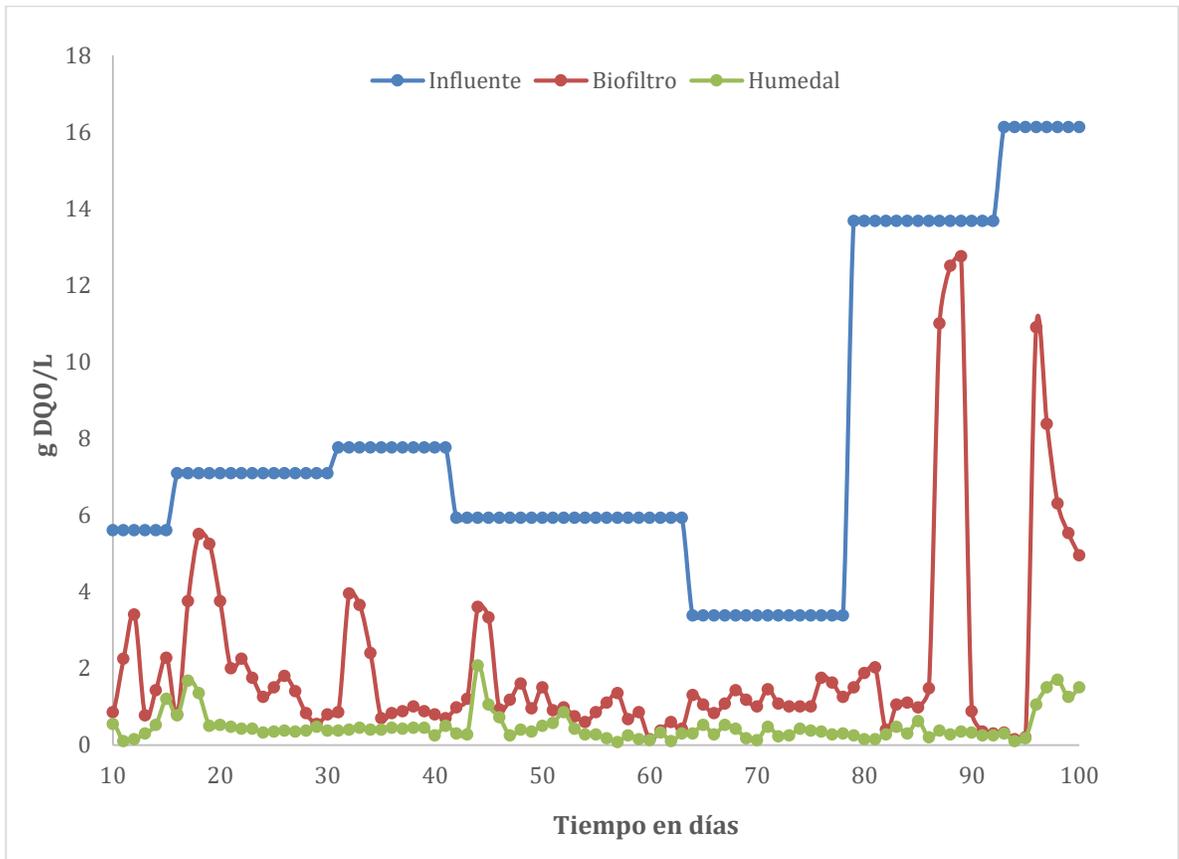
## 8. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

### 8.1 DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO

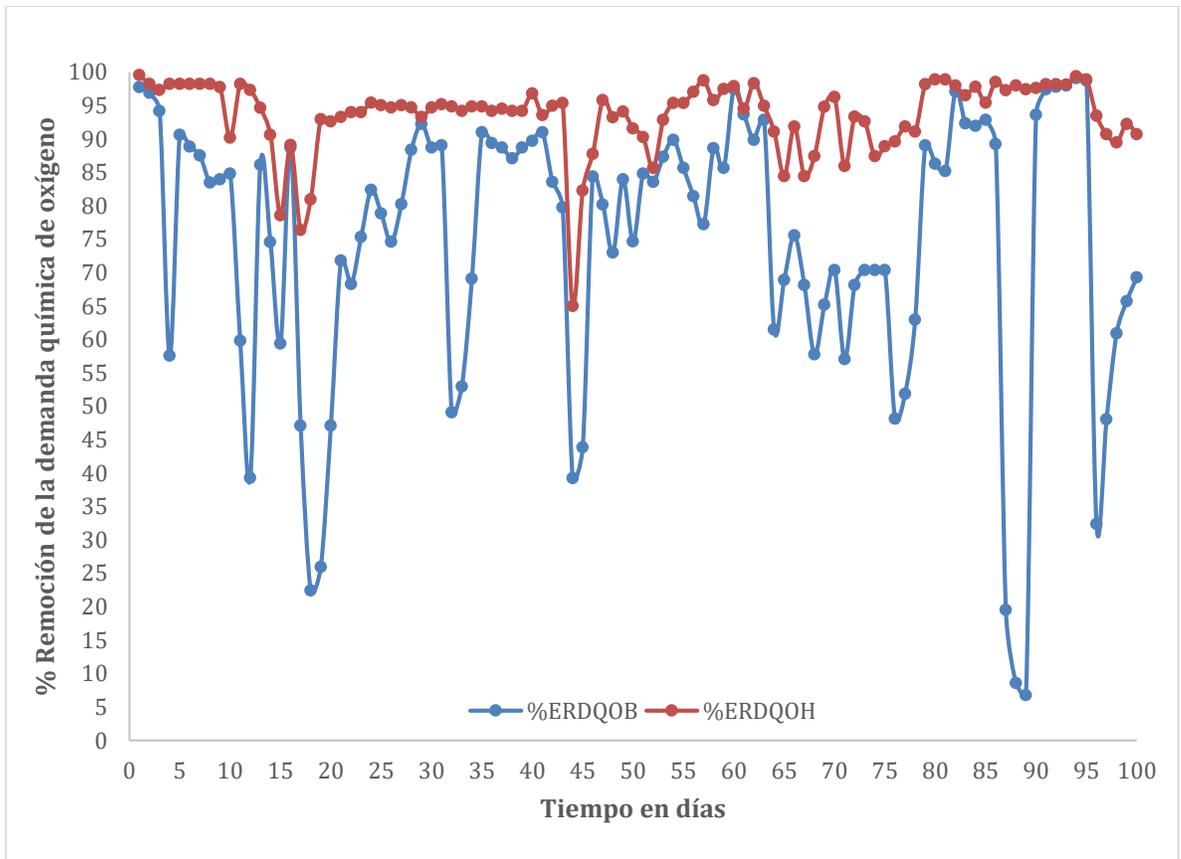
En la (Figura 7) se presenta el comportamiento de la DQO del agua residual del rastro municipal TIF 377 (influyente), se observa una variación de la DQO en cada colecta de agua. Durante los primeros dos meses el agua muestreada presentó una variación de entre 5.6 y 7.76 g/L DQO, posteriormente entre los 65 y 75 días la DQO descendió a 3.37 g/L DQO y posteriormente se llegó a alcanzar hasta 16.12 g/L DQO, las causas de estas variaciones pueden ser diversas; Signorini- Porchietto *et al.* (2006), mencionan en su investigación que esto ocurre debido a que la composición del agua residual de un rastro cambia según la especie animal sacrificada y procesada, siendo esto de importancia para analizar el comportamiento de remoción de los tratamientos subsecuentes.

Los muestreos del agua con tratamiento secundario presentaron una disminución considerable que va desde los 0.125 g/L DQO como mínima a una máxima de 12.75 g/DQO por litro, al comparar con el efluente obtenido del tratamiento terciario con un humedal artificial se puede observar como el tratamiento aumentó la remoción de la DQO en el cual la DQO se mantuvo en rangos de entre 0.025 y 2.075 g/L DQO, lo cual en porcentaje representan una remoción mayor al 64.97% llegando a alcanzar el 99.55%. Gutiérrez-Sarabia *et al.* (2004), obtuvieron una eficiencia de remoción de la DQO del 89% para efluentes de matadero tratados con tanque de sedimentación, una laguna anaerobia y un humedal construido como tratamiento terciario, de ese porcentaje el humedal obtuvo una eficiencia de remoción de 73.97%. Odong *et al.*, (2015), detectaron una remoción del 60% de la DQO mediante un humedal con *Cyperus papyrus*. como tratamiento terciario para agua residual de matadero a un TRH de 1.16 días. Bizarra-Aramburu *et al.* (2021), evaluaron la eficiencia de un humedal artificial con plantas fitodepuradoras de la especie *Scirpus californicus* para el tratamiento de aguas residuales de un matadero municipal, reportaron una remoción del 85.2% en DQO. Respecto al uso de *Canna indica* para el tratamiento de aguas residuales, Hernández-Vázquez (2017) obtuvo una remoción de la DQO del 91.92% utilizando *Canna indica* en un humedal para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la zona urbana del distrito de Chalamarca y De la Cruz-Ferrer (2020), detectó una eficiencia de remoción de la DQO del 91.39% a un TRH de 1.53 días

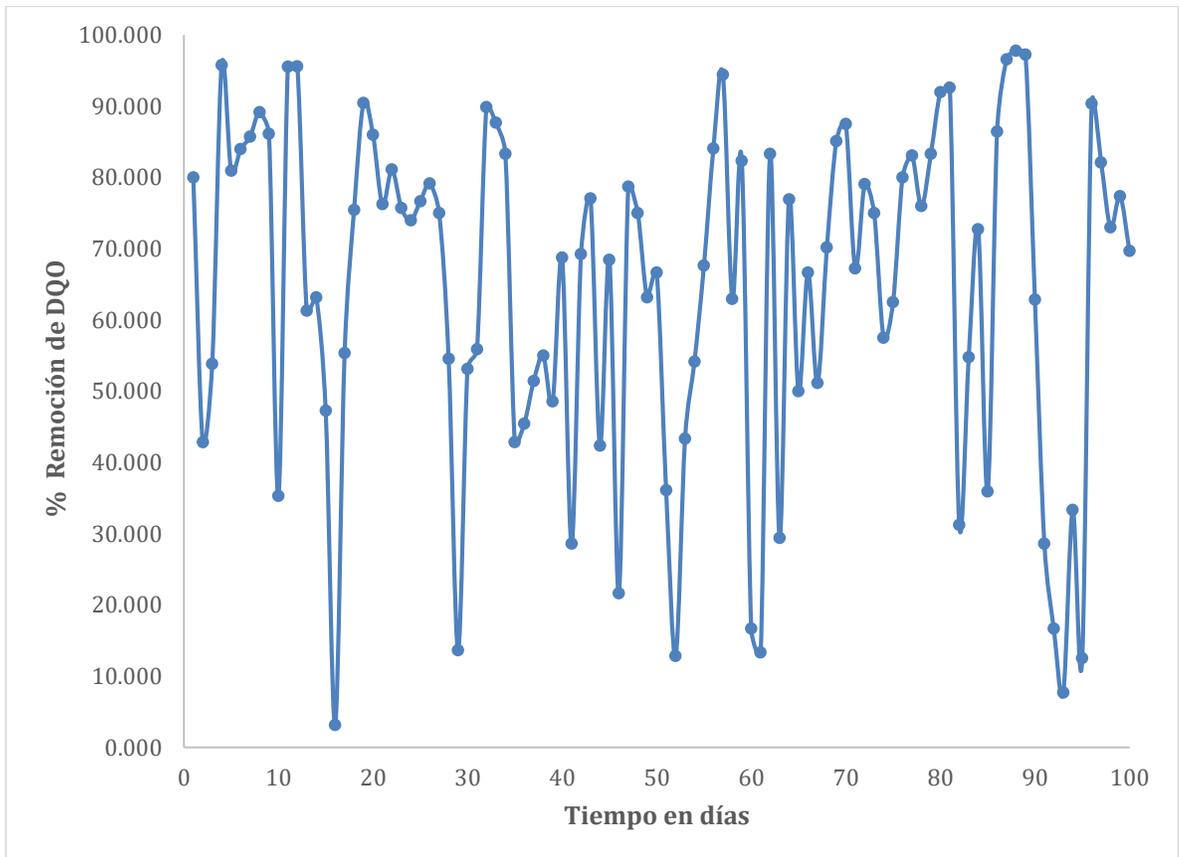
en la depuración de aguas residuales domésticas al emplear *Canna indica*. *Canna indica* es una planta macrófita que representa una buena opción para el tratamiento terciario de agua residual doméstica, urbana y de acuerdo con esta investigación también para agua residual del rastro.



**Figura 7.** Comportamiento de la DQO en el influente y efluentes (biofiltro y humedal).



**Figura 8.** Porcentaje de eficiencia de remoción de la DQO en el sistema de tratamiento secundario (biofiltros anaerobios) y en el humedal.



**Figura 9.** Porcentaje de eficiencia de remoción de la DQO en el humedal.

### 8.2 pH

En la (Figura 10) se muestra el comportamiento del pH en el influente proveniente del tratamiento secundario y el efluente del tratamiento terciario. Se observa que en el efluente del humedal artificial se obtuvieron valores de pH entre 7.7 siendo este el valor más bajo y 8.9 el valor más alto, lo que demuestra una tendencia hacia la alcalinidad, estos resultados son similares a los reportados por Yazdani *et al.*, (2019) en un estudio del tratamiento con dos humedales construidos para aguas residuales lácteas, utilizando plantas de la especie *Phragmites australis* y *Juncaceae spp.*, detectando un pH de entre 8.45 y 8.71 respectivamente en el efluente de cada humedal.

Vergeles *et al.*, (2015), evaluaron la eficiencia del tratamiento de nueve humedales construidos para aguas residuales urbanas en el Este de Ucrania, utilizaron plantas

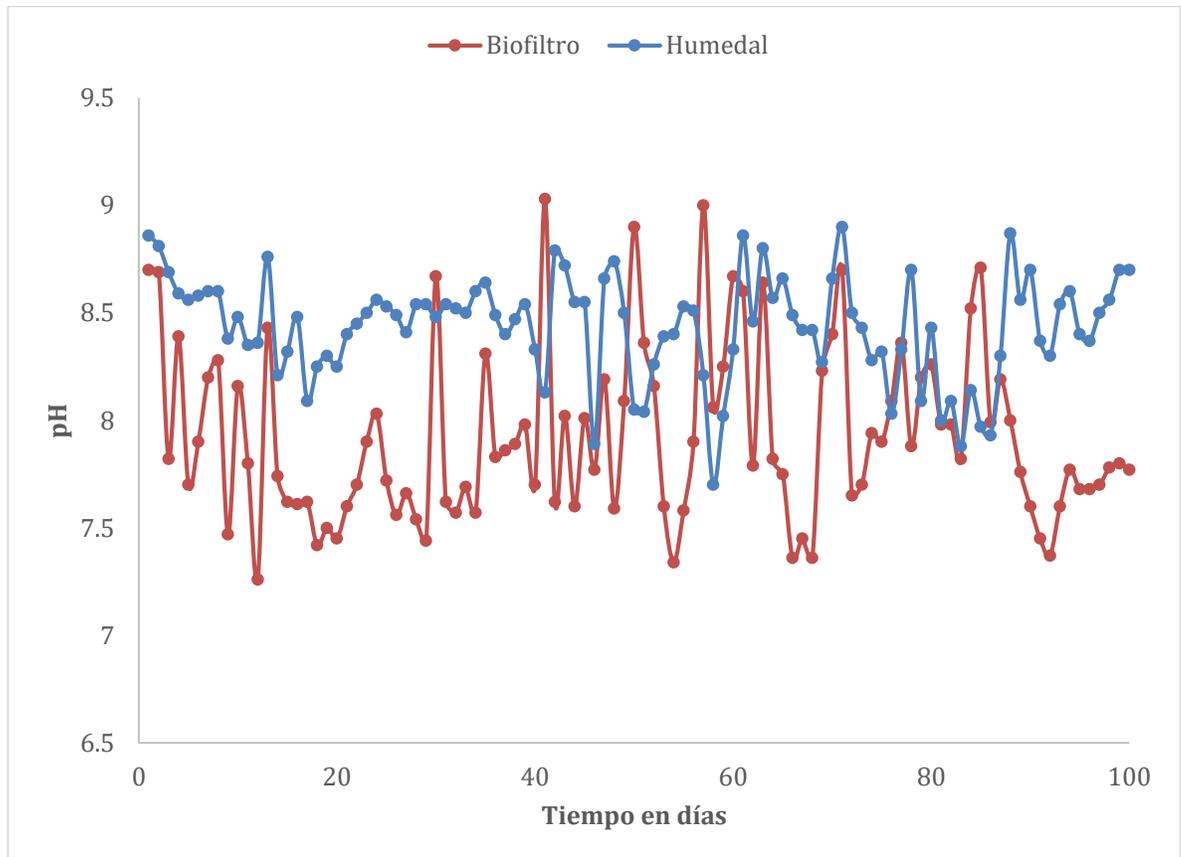
macrófitas de las especies *Phragmites australis*, *Scirpus sylvaticus* y *Tipha latifolia*, el pH obtenido en los muestreos del efluente de los humedales fue entre el 7.0 y 8.7, solo un humedal generó un pH neutral, mientras que los ocho restantes mostraron una ligera tendencia a la alcalinidad.

Mohammed *et al.*, (2020) realizaron un estudio de remediación de aguas residuales lácteas con humedales construidos y sembrados con *Canna indica*, con los cuales demostraron que esta planta macrófita es capaz de tolerar pH ácido de 4.5 y seguir su desarrollo, además al muestrear el efluente de los humedales se percataron que el pH aumentó, generando un ligero nivel de alcalinidad en el agua, adjudicándolo a los diferentes procesos biogeoquímicos, el TRH y las condiciones aeróbicas en la parte superior del humedal construido. Gutiérrez-Sarabia *et al.*, (2004) propusieron un sistema para efluentes de matadero tratados con un tanque de sedimentación, una laguna anaerobia y un de humedal construido para tratamiento terciario el cual en la etapa del humedal se detectó un pH de 7.07.

Odong *et al.*, (2015) estudiaron un sistema humedal como tratamiento terciario para agua residual de matadero, el cual contenía macrófitas de la especie *Cyperus papyrus* y sus resultados en cuanto a pH fueron cercano al valor neutro ( $7.65 \pm 0.04$ ).

En esta investigación el efluente del humedal resultó con un promedio de pH alcalino de 8.4, lo que podría llegar a ser benéfico, debido a que el pH alcalino guarda relación con la remoción de nitrógeno en el agua (Alarcón *et al.*, 2018; Babourina *et al.*, 2010; Curt, 2004; Yazdani *et al.*, 2019), además, los organismos acuáticos tienen un mejor desarrollo en un rango de pH de entre 5 y 9, (obteniendo una actividad biológica óptima en un intervalo entre 6.5 y 8.5), los microorganismos son de importancia para la remoción de materia orgánica, así como distintos ciclos biogeoquímicos que se llevan a cabo para la depuración del agua residual, por lo cual el pH obtenido a lo largo del muestreo resulta menos tóxico para la fuente de agua receptora de vertimiento (de Miguel Fernández, 2020; Delgadillo *et al.*, 2010; Martínez-Alfaro *et al.*, 2006; Ramalho, 1996; Urbina *et al.*, 2014). Los valores de pH obtenidos del efluente del humedal utilizado como tratamiento terciario para agua de rastro TIF 377, se encuentran dentro del rango de entre 5.5 y 10 permitido por la normatividad vigente la NOM-002-ECOL-1996, que establece los límites máximos

permisibles de contaminantes en la descarga de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.

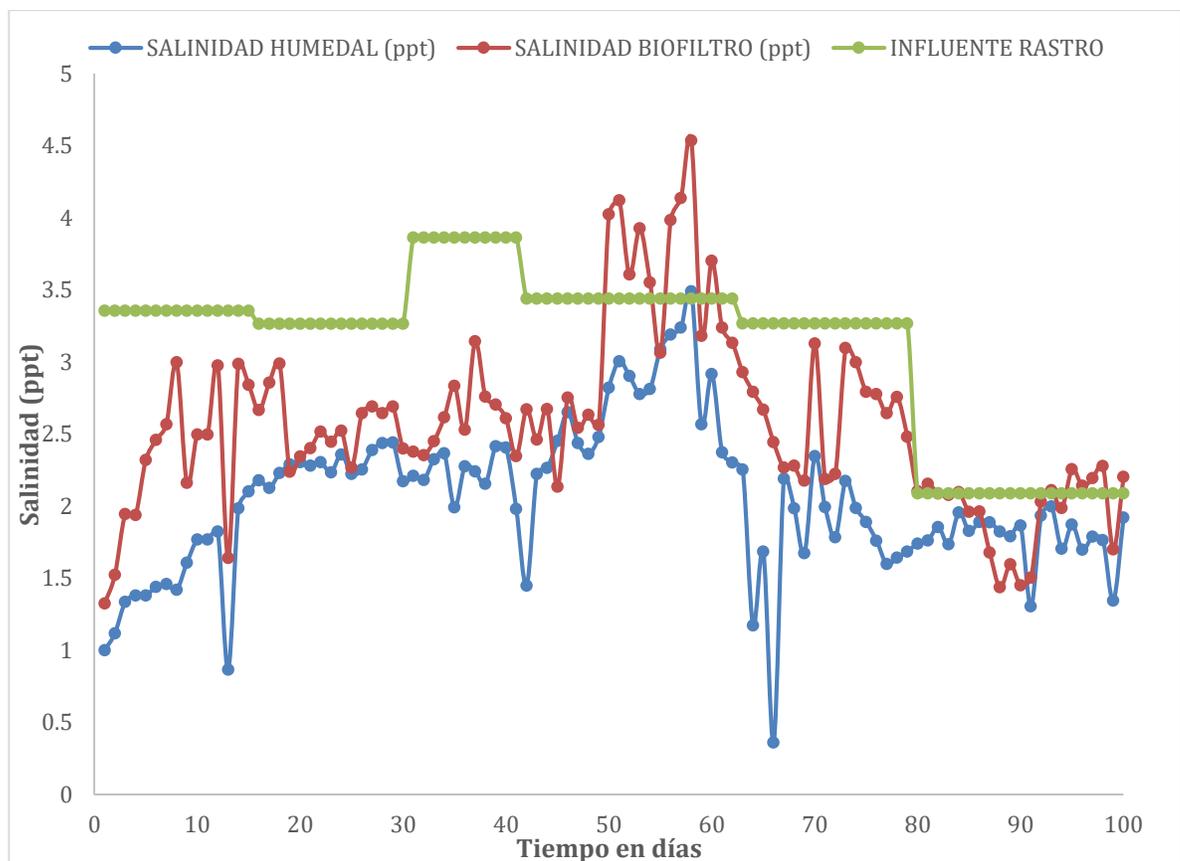


**Figura 10.** Comportamiento del pH en el influente (biofiltro) y efluente (humedal).

### 8.3 SALINIDAD Y CONDUCTIVIDAD

En la (Figura 11) se muestra el comportamiento de la salinidad en cada colecta del agua residual del rastro municipal TIF 377, la cual presentó una salinidad de 3.863 ppt como valor máximo y 2.087 (ppt) como mínimo, variación que se presenta por la composición del agua residual colectada, puesto a que la misma cambia en parámetros según el animal

sacrificado y los desechos generados en el proceso (Signorini-Porchietto *et al.*, 2006), el efluente del tratamiento secundario presentó un valor mínimo de 1.324 y máximo de 4.536 ppt. En el efluente del tratamiento con humedal artificial se presentó una variación en el comportamiento de la salinidad; entre los días 55 y 60 obtuvo como valor máximo 3.488 ppt y entre los días 65 y 70 se observó el valor mínimo de salinidad llegando a presentar 0.361 ppt, generando una reducción significativa de este parámetro en el agua residual. La salinidad llega a ser proporcional a la conductividad eléctrica ya que esta última es influenciada por la cantidad de sales disueltas en el agua (de Miguel Fernández, 2020; Muncharaz, 2013; Togores, 2010).



**Figura 11.** Comportamiento de la salinidad en el influente y efluentes (biofiltro y humedal).

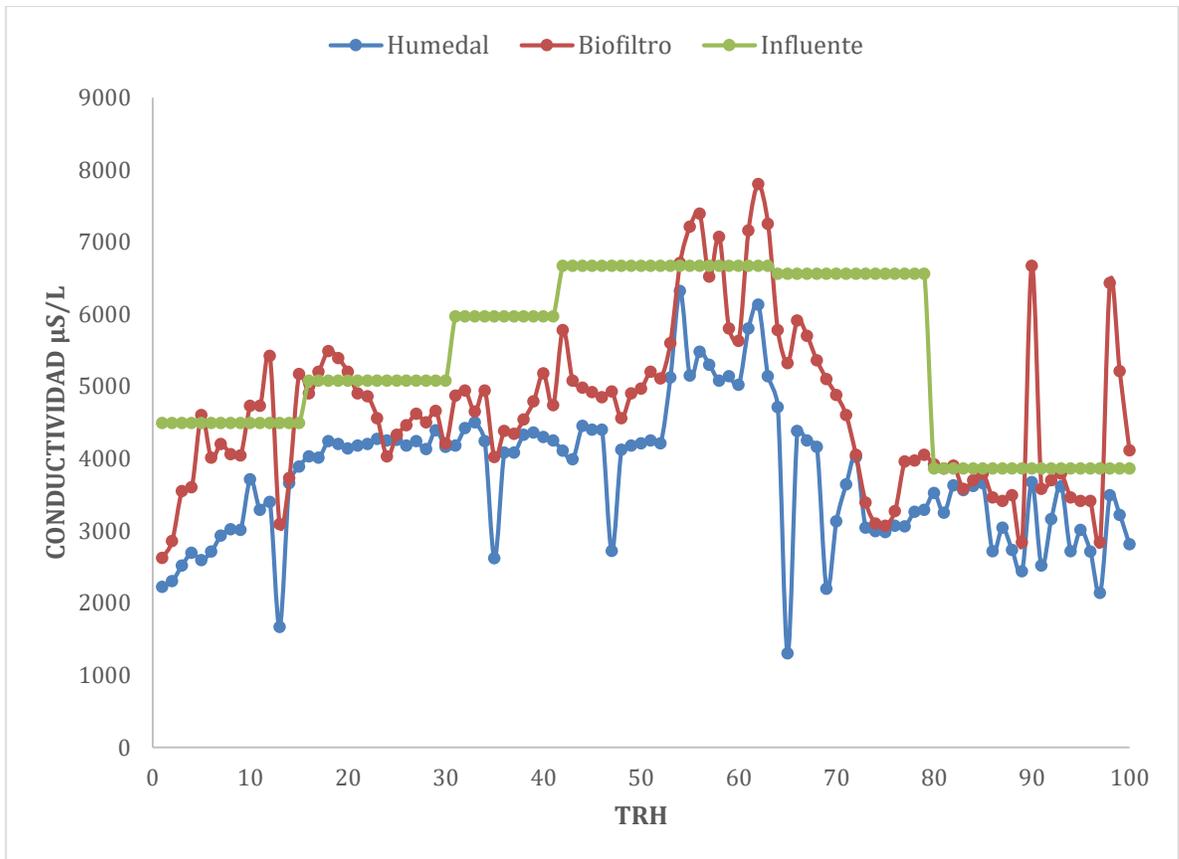
La conductividad eléctrica obtenida en cada colecta de agua residual del rastro TIF 377 presentó un valor máximo de 6670  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y un mínimo de 3860  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , posteriormente el efluente obtenido del tratamiento secundario generó un valor máximo de conductividad de 7800  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y un valor mínimo de 2625  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; de acuerdo a los valores mostrados en

la (Figura 12) se observan las variaciones de las muestras del efluente del humedal utilizado como tratamiento terciario, entre los días 50 y 55 se generó un valor máximo de 6130  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , llegando a bajar hasta 1299  $\mu\text{S}/\text{cm}$  entre los días 60 y 65, generando un promedio de 3749  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en el efluente durante el periodo de muestreo, lo que representa un alcance del 19.48% de remoción en la conductividad eléctrica. Estos resultados son similares a los obtenidos por Odong *et al.*, (2015), quienes redujeron la CE en un 24.86% mediante un humedal sembrado con *Cyperus papyrus* utilizado como tratamiento terciario para agua residual de matadero. De la Cruz-Ferrer (2020), detectó una eficiencia de remoción de la conductividad eléctrica en la depuración de aguas residuales domésticas, utilizando dos humedales y plantas de la especie *Typha domingensis* y *Canna indica* con un 18.50% y 16.16% respectivamente en cada humedal en un TRH de 1.53 días.

En un estudio realizado por Charris *et al.*, (2016) en donde se evalúa la eficiencia de eliminación de contaminantes del agua residual doméstica con humedales construidos experimentales plantados con *Cyperus ligularis* y *Echinochloa colonum* en promedio se registraron valores de remoción del 34.83% y 24.46% respectivamente para cada especie, sugieren que la eficiencia del tratamiento puede estar influenciada por el tipo de planta macrófita, las condiciones de experimentación y así mismo la conductividad eléctrica puede aumentar debido al nivel de evapotranspiración de la planta.

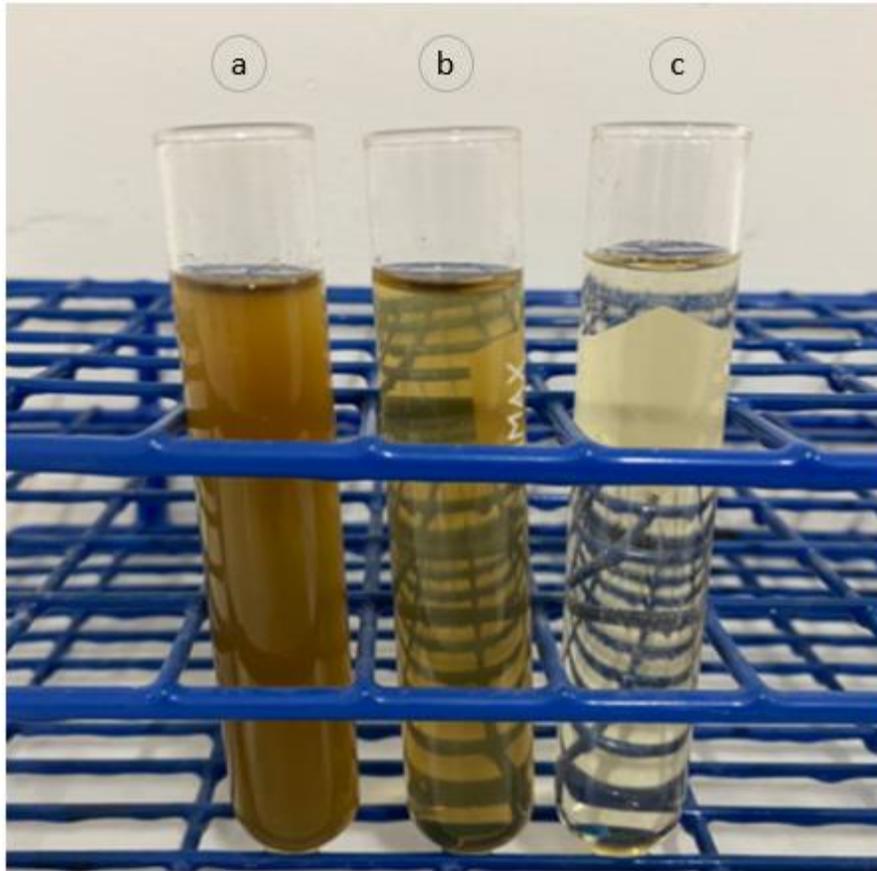
Borin *et al.*, (2013) realizaron el monitoreo a el agua residual de una granja de cerdos, así como al efluente obtenido posterior al tratamiento terciario con un humedal híbrido construido y sembrado con especies de *Canna indica* y *Symphytum officinale*; respecto a su eficiencia en remoción de conductividad eléctrica, al inicio del tratamiento registró en promedio 7952  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y posterior al tratamiento un promedio de 5073  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , lo que en porcentaje se muestra una proximidad de remoción del 36.2%.

Las aguas residuales con altos niveles de conductividad eléctrica no pueden ser utilizadas para realizar riego en sembradíos, debido a que puede aumentar la salinidad de los suelos y ocasionar bajas en la producción de los cultivos, se recomiendan niveles menores a 2500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para esta actividad; en el efluente de nuestro tratamiento la CE sigue siendo elevada para darle un uso en una actividad como lo es el riego (Escalante, 2008).



**Figura 12.** Comportamiento de la conductividad eléctrica en el influente y efluentes (biofiltro y humedal).

En la Figura 13 se puede observar que el agua residual del rastro (tubo izquierdo) presenta una mayor turbidez y color que va de tonos cafés a rojizos, posterior al tratamiento secundario de biofiltros (tubo del centro) se puede observar un gran cambio en la coloración y turbidez, el efluente obtenido posterior al tratamiento terciario con humedal artificial mejoro su aspecto significativamente.



**Figura 13.** Agua residual del rastro municipal TIF 377 sin tratamiento (a), efluente de tratamiento secundario con biofiltros (b) y efluente del tratamiento terciario con humedal artificial (c).

## **9. CONCLUSIÓN**

Este estudio permite inferir en que el humedal construido utilizando la especie macrófita *Canna indica* es eficiente para el tratamiento terciario de agua residual de rastro municipal TIF 377 por su capacidad para disminuir algunos parámetros de contaminación como lo fueron: DQO, salinidad y conductividad eléctrica, además de mantener el pH en un rango ligeramente alcalino, aceptable por la normatividad mexicana para agua residual; se comprueba que es un sistema que genera bajos costos para su implementación y resulta de fácil manejo, lo que lo hace aceptable como un tratamiento terciario para agua del matadero, permitiendo que el agua residual vertida al sistema de alcantarillado resulte menos perjudicial y contaminante para los ecosistemas con los que pudiera tener contacto posterior.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

1. Abarca, F. J. (2007). Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México. México: Instituto Nacional de Ecología.
2. Adesemoye, A. O., Opere, B. O., & Makinde, S. C. O. (2006). Microbial content of abattoir wastewater and its contaminated soil in Lagos, Nigeria. *African Journal of Biotechnology*, 5(20). pp.1963-1968. Disponible en: <https://www.ajol.info/index.php/ajb/article/view/55921>
3. Alarcón Herrera, M. T., Zurita Martínez, F., Hadad, H., García Pérez, A., Vidal, G., Maine, M. & Vera Puerto, I. L. (2018). Humedales de tratamiento: alternativa de tratamiento de saneamiento de aguas residuales aplicable en América Latina. pp.19-173. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10554/34519>
4. Andrade Balao, J. A. (2008). Los vertidos de los mataderos e industrias cárnicas. Tesis de Maestría. Escuela Organización industrial. pp.5-8. Disponible en: <https://www.eoi.es/es/savia/publicaciones/19962/los-vertidos-de-los-mataderos-e-industrias-carnicas>.
5. Arias Martínez, S. Betancur Toro, F. Gómez Rojas, G. Salazar Giraldo, J. Hernández Ángel, M. (2010). Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Informador Técnico*. (74). pp. 12-22. Disponible en: <https://hdl.handle.net/11404/3250>
6. Arreguín Cortés, F. I. Moeller Chávez, G. Escalante Estrada, V. & Rivas Hernández, A. R. (1997). El Reúso Del Agua En México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. pp.1-33. Disponible en: [https://sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/ARREGUÍN%20et%20al%201999.%20El%20reúso%20del%20agua%20en%20México.pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/ARREGUÍN%20et%20al%201999.%20El%20reúso%20del%20agua%20en%20México.pdf)
7. Astorga Márquez, R. (2007). Estrategias de prevención frente a enfermedades: la bioseguridad en la granja. *Anales de la Real Academia de Ciencias Veterinarias de Andalucía Oriental*, 20 (1). pp. 31-42. Disponible en: <https://helvia.uco.es/xmlui/bitstream/handle/10396/3962/02%2520anales%2520%2520rafael%2520astorga.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

8. Babourina, O., & Rengel, Z. (2010). Nitrogen removal from eutrophicated water by aquatic plants. In *Eutrophication: causes, consequences and control* (pp. 355-372). Springer, Dordrecht. DOI: 10.1007/978-90-481-9625-8\_18
9. Bizarra Aramburu, C., & Portillo Huanhuayo, A. L. (2021). Uso de un humedal artificial vertical para el tratamiento de aguas residuales del camal municipal de Huancavelica. Disponible en: <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/4004>
10. Blazquez, P., & Montero, C. (2010). Reutilización de agua en Bahía Blanca Plata 3era Cuenca. Buenos Aires, Argentina. pp.18-28. Disponible en: [http://www.edutecne.utn.edu.ar/agua/agua\\_reutilizacion.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/agua/agua_reutilizacion.pdf)
11. Borin, M., Politeo, M., & De Stefani, G. (2013). Performance of a hybrid constructed wetland treating piggery wastewater. *Ecological Engineering*, 51, 229-236. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.12.064>
12. Buborg Morales, C. (2010). Propuesta de tratamiento de las aguas residuales y de su reutilización para un rastro de porcinos. Tesis de Maestría. Universidad de San Carlos de Guatemala, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos. pp. 4-5. Disponible en: [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0193\\_MT.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0193_MT.pdf)
13. Bustillo Lecompte, C., & Mehrvar, M. (2017). Slaughterhouse wastewater: treatment management and resource recovery. En R. Farooq, & Z. Ahmad, *Physico-Chemical Wastewater Treatment and Resource Recovery*. Croatia: intechOpen. pp.153-170. Disponible en: <https://www.intechopen.com/books/physico-chemical-wastewater-treatment-and-resource-recovery/slaughterhouse-wastewater-treatment-management-and-resource-recovery>
14. Calderón de Rzedowski, G. (1998). Flora del Bajío y de Regiones Adyacentes. Instituto de Ecología. pp.1-5. Disponible en: <http://www1.inecol.edu.mx/publicaciones/resumeness/FLOBA/Flora%2064.pdf>
15. Carvajal Rowan, A., Zapatini Irala, C., & Quintero Zamora, C. (2018). Humedales artificiales, una alternativa para la depuración de aguas residuales en el municipio de Mizque, Bolivia. *Diseño y Tecnología para el Desarrollo*, (5). pp.88-108. Disponible en: <http://polired.upm.es/index.php/distecd/article/view/3744/3830>

16. Charris, J. C., & Caselles-Osorio, A. (2016). Eficiencia de eliminación de contaminantes del agua residual doméstica con humedales construidos experimentales plantados con *Cyperus ligularis* (Cyperaceae) y *Echinochloa colonum* (Poaceae). *Tecnología y ciencias del agua*, 7(6), 93-103. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=353549830006>
17. Choudhary, A. K., Kumar, S., & Sharma, C. (2011). Constructed wetlands: an approach for wastewater treatment. *Elixir Pollut*, 37(8). pp. 3666-3672. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Ashutosh\\_Choudhary2/publication/215634574\\_Constructed\\_wetlands\\_An\\_approach\\_for\\_wastewater\\_treatment/links/0922b4f48786ec26bc000000/Constructed-wetlands-An-approach-for-wastewater-treatment.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Ashutosh_Choudhary2/publication/215634574_Constructed_wetlands_An_approach_for_wastewater_treatment/links/0922b4f48786ec26bc000000/Constructed-wetlands-An-approach-for-wastewater-treatment.pdf)
18. Cisneros, E., Gonzales, M., y Fuentes, R. (2001). Perspectiva de aprovechamiento de las aguas residuales en la agricultura. México. Semarnat, Conagua, IMTA. pp. 45-62. Disponible en: <http://cenca.imta.mx/pdf/43978Pri.pdf>
19. CONAGUA (2019) Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Introducción al Tratamiento de Aguas Residuales Municipales. Comisión Nacional del Agua. México. pp. 118-120. Disponible en: <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro25.pdf>
20. Curt, M. (2004). Fitodepuración en humedales: conceptos generales. Manual de fitodepuración: filtros de macrófitas en flotación. Páginas 73-75. Disponible en: [https://fundacionglobalnature.org/wp-content/uploads/2020/01/manual\\_fitodepuracion.pdf](https://fundacionglobalnature.org/wp-content/uploads/2020/01/manual_fitodepuracion.pdf)
21. De la Cruz Ferrer, H. (2020). Humedal artificial empleando especies fitodepuradoras nativas para el tratamiento de aguas residuales en el Distrito de San Antonio-Huarochirí-2020. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/59711>
22. de las Mercedes Ciciarelli, M., & Roller, C. H. (2008). Morfología, taxonomía y caracterización de siete especies neotropicales del género *Canna* (Cannaceae, Zingiberales). *Botánica Complutensis*, 32. pp.157-177. Disponible en:

[http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/40658/Documento\\_completo\\_\\_\\_%2032\\_157-184.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/40658/Documento_completo___%2032_157-184.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

23. De Miguel Fernández, C. (2020). Hidrogeología aplicada con aspectos ambientales. Editorial Universitaria (Cuba). Página 49. [https://books.google.com.mx/books?id=\\_331DwAAQBAJ&pg=PR2&dq=Hidrogeología+aplicada+con+aspectos+ambientales](https://books.google.com.mx/books?id=_331DwAAQBAJ&pg=PR2&dq=Hidrogeología+aplicada+con+aspectos+ambientales).
24. Delgadillo, O. Camacho, A. Pérez, L. Andrade, M. (2010) Depuración de Aguas Residuales por Medio de Humedales Artificiales. Nelson Antequera Durán. Bolivia. pp. 7-83. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/48017573.pdf>
25. Díaz, Fernández, j. (2019). Ecuaciones y cálculos para el tratamiento de aguas. Ediciones Paraninfo, SA. Disponible en: <https://books.google.com.mx/books?id=WUaCDwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Ecuaciones+y+cálculos+para+el+tratamiento+de+aguas>.
26. Escalante, E. F. (2008). La calidad de las aguas en función de su uso. Enrique Fernández Escalante. Página 85. Disponible en: <https://books.google.com.mx/books?id=NxyXBAAAQBAJ&pg=PA16&dq=La+calidad+de+las+aguas+en+función+de+su+uso>.
27. Escalante, V., Cardoso, L., Ramírez, E., Moeller, G., Mantilla, G., Montecillos, J., Servin, C. & Villavicencio, F. (2003). El reúso del agua residual tratada en México. Seminario internacional sobre métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. pp.230-236. Disponible en: [http://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-09-28\\_11-00-54111051.pdf](http://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-09-28_11-00-54111051.pdf)
28. Fernández González, J. (2002). Humedales artificiales para depuración. Manual de fitodepuración. Filtros de Macrófitas en Flotación, 79-89. Disponible en: [https://fundacionglobalnature.org/wp-content/uploads/2020/01/manual\\_fitodepuracion.pdf](https://fundacionglobalnature.org/wp-content/uploads/2020/01/manual_fitodepuracion.pdf)
29. Fransen, N. G., van den Elzen, A. M., Urlings, B. A., & Bijker, P. G. (1996). Pathogenic micro-organisms in slaughterhouse sludge—a survey. International journal of food microbiology, 33(2-3). pp.245-256. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0168160596011609>

30. García Ramos, G. O. (2016). La normatividad en materia de administración de rastros Tipo Inspección Federal (TIF). En el caso de Torreón, Coahuila. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. pp. 6-14. Disponible en: <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/8012>
31. Gerba, C. P. (2017). Eliminación de patógenos. En C. M. al, Tratamiento Biológico de Aguas Residuales: Principios, Modelación y Diseño. Reino Unido: IWA publishing. pp.247-263. Disponible en: <https://www.iwapublishing.com/books/9781780409139/tratamiento-biológico-de-aguas-residuales-principios-modelación-y-diseño>
32. Giner Santoja, G. Georgitzikis, K. Scalet, B. Montobbio, P. Rodier, S. Delgado Sancho, L. (2017). Best Available Techniques (BAT) reference document for the intensive rearing of Poultry or Pigs. European Comisión. España. pp. 30-39.
33. Gómez González, V., Drucker, A. G., Escalante Semerena, R., Rubio Leonel, O., Rosales Puc, E., Canul, V., & Magaña, A. (2000). Implicaciones económicas y ambientales de la normatividad ambiental aplicada al tratamiento de desechos en los rastros yucatecos. *Investigación Económica*, 60(231). pp. 182-199. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/ineco/v60n231/0185-1667-ineco-60-231-181.pdf>
34. Greenway, M. (2005). The role of constructed wetlands in secondary effluent treatment and water reuse in subtropical and arid Australia. *Ecological Engineering*, 25(5), 501-509. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857405001564>
35. Gutiérrez Sarabia, A., Fernández Villagómez, G., Martínez Pereda, P., Rinderknecht Seijas, N., & Poggi Varaldo, H. M. (2004). Slaughterhouse wastewater treatment in a full-scale system with constructed wetlands. *Water Environment Research*, 76(4), 334-343. <https://doi.org/10.2175/106143004X141924>
36. Hernández Vásquez, W. (2017). Tratamiento de aguas residuales empleando las especies achira (*canna indica*) y carrizo (*pragmites australis*) a través de humedales artificiales, chalamarca 2017. pp. 50-67. Disponible en: <http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/UCV/28154>

37. Hernández Vásquez, W. (2017). Tratamiento de Aguas Residuales Empleando las Especies Achira (*Canna Índica*) y Carrizo (*Pragmites Australis*) a través de Humedales Artificiales, Chalamarca 2017. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/28154>
38. Hoffmann, H., Platzer, C., Winker, M., & Von Muench, E. (2011). Revisión Técnica de Humedales Artificiales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises y aguas domésticas. Eschborn, Alemania: agencia de cooperación internacional de Alemania, giz programa de saneamiento sostenible ECOSAN. pp.8-19. Disponible en: <http://ecotec.unam.mx/ECotec/wp-content/uploads/Revision-Tecnica-de-Humedales-Artificiales.pdf>
39. Jiang, Y., Martinez-Guerra, E., Gnaneswar Gude, V., Magbanua, B., Truax, D. D., & Martin, J. L. (2016). Wetlands for wastewater treatment. *Water Environment Research*, 88(10). pp. 1160-1178. <https://doi.org/10.2175/106143016X14696400494650>
40. Juárez Chota, L. S. (2018). Evaluación del humedal artificial de lecho fluidizado ascendente con macrófita flotante, en la remoción de aguas residuales del matadero municipal de la ciudad de Moyobamba 2017. pp. 7-60. Disponible en: <http://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/2813>
41. Keerthana, K., & Thivyatharsan, R. (2018). Constructed wetland for slaughterhouse wastewater treatment. *AGRIEAST: Journal of Agricultural Sciences*, 12(1). pp. 7–15. <http://doi.org/10.4038/agri east.v12i1.47>
42. Lindley, J. (1829) Edwards's Botanical Register, vol. 15. pp. 1231. Disponible en: <https://archive.org/details/mobot31753002748272/page/n235/mode/2up?x=35&y=38>
43. López del Pino J. & Martín Calderón S. (2015). Depuración de Aguas Residuales. ELEARNING S. L. España. pp.119-295. Disponible en: <https://books.google.com.mx/books?id=9cJWDwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Depuración+de+Aguas+Residuales.+ELEARNING>
44. López Navajas, R. (2015). Diseño de un sistema de tratamiento de aguas en una industria cárnica. 2015. Tesis de Maestría. pp 10-69. Disponible en: <https://e->

archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/23473/PFC\_rafael\_lopez\_navajas\_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y

45. Lozano Elizalde, A., García de la Cruz, S.P., Ramos González, J. A. (2013). Viabilidad de los Rastros Municipales de la Zona Metropolitana de Guadalajara. Disponible en: <https://docplayer.es/58322128-Viabilidad-de-los-rastros-municipales-de-la-zona-metropolitana-de-guadalajara.html>Guadalajara: Consejo Económico y Social del Estado de Jalisco. pp.50-51
46. Madrid, A.J. (2019). Estudio del medio físico. Criterios y bases de la evaluación de impacto ambiental. España: Elearning S.L. Disponible en: <https://books.google.com.mx/books?id=5sflDwAAQBAJ&pg=PA2&dq=Estudio+del+medio+físico.+Criterios+y+bases+de+la+evaluación+de+impacto+ambiental>
47. Martínez Alfaro, P. E., Martínez Santos, P., & Castaño Castaño, S. (2006). Fundamentos de hidrogeología. Mundi-Prensa Libros. Página 170. Disponible en: [https://books.google.com.mx/books?id=wWcJAQAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Castaño+Castaño,+S.+\(2006\).+Fundamentos+de+hidrogeología.&hl=es-419&sa=X&redir\\_esc=y](https://books.google.com.mx/books?id=wWcJAQAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Castaño+Castaño,+S.+(2006).+Fundamentos+de+hidrogeología.&hl=es-419&sa=X&redir_esc=y)
48. Mburu, C. W. (2016). Mesocosm study on the potential use of vertical sub-surface flow constructed wetlands for removal of organic matter in slaughterhouse wastewater (Doctoral dissertation, Egerton University). pp. 28-32. Disponible en: <http://ir-library.egerton.ac.ke/handle/123456789/1624>
49. Monográficos Agua en Centroamérica. (2008). Manual de Depuración de Aguas Residuales Urbanas. España. Centa. pp. 28-38. Disponible en: <http://alianzaporelagua.org/documentos/MONOGRAFICO3.pdf>
50. Morales, G., López, D., Vera, I., & Vidal, G. (2013). Humedales construidos con plantas ornamentales para el tratamiento de materia orgánica y nutrientes contenidos en aguas servidas. *Theoria*, 22(1), 33-46. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/299/29936198004.pdf>
51. Morales, J. V. (2000). Cucunuba: modelo para un desarrollo sostenible. U. Jorge Tadeo Lozano. Disponible en:

[https://books.google.com.do/books?id=L0pB\\_Y6eKd4C&printsec=copyright&hl=es#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.do/books?id=L0pB_Y6eKd4C&printsec=copyright&hl=es#v=onepage&q&f=false)

52. Moreno García, B. (2006). Higiene e inspección de Carnes, Volumen 1. Ediciones Díaz de Santos. España. pp. 574-593. Disponible en: <https://books.google.com.cu/books?id=aOuMC7Dm59kC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>
53. Muncharaz Pou, M. (2013). Proyecto y diseño de áreas verdes. Mundi-Prensa Libros. Página 156. Disponible en: <https://books.google.com.mx/books?id=mftRAgAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Proyecto+y+diseño+de+áreas+verdes.+Mundi-Prensa+Libros.>
54. Muñoz Muñoz, D. (2005). Sistema de tratamiento de aguas residuales de matadero: para una población menor de 2000 habitantes. Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial: BSAA, 3(1). pp. 87-98. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6117975>
55. Naranjo Santa, K. (2014). Caracterización fisicoquímica y microbiológica según la normatividad mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996 de las aguas residuales provenientes del taller de tecnología de cárnicos del área de procesos alimentarios de la Universidad Tecnológica de Huejotzingo. Tesis de Doctorado. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías. Tecnología Química. pp.40-98. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/71398035.pdf>
56. Nieto Ugarte, R., & Huaman Lustre, J. J. (2019). Optimización de los parámetros operacionales del proceso de oxidación avanzada en el tratamiento de las aguas residuales provenientes de un matadero de porcinos (Ingeniero Químico). Universidad Nacional del Callao. pp. 43-61. Disponible en: <http://repositorio.unac.edu.pe/handle/UNAC/4495>
57. NORMA MEXICANA NMX-AA-012-SCFI-2001 Análisis de agua - Determinación de oxígeno disuelto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba (CANCELA A LA NMX-AA-012-1980). Secretaría de Economía. Diario Oficial de la Federación. 17 de abril del 2001. Disponible en: <http://transparencia.japac.gob.mx/wp-content/uploads/art95/fxvi/normas/NMX-AA-012-SCFI-2001.pdf>

58. NORMA MEXICANA NMX-AA-028-SCFI-2001 Análisis de agua - Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (dbo5) y residuales tratadas - Método de prueba (CANCELA A LA NMX-AA-028-1981). Secretaría de Economía. Diario Oficial de la Federación. 17 de abril del 2001. Disponible en: <http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2001/nmx-aa-028-scfi-2001.pdf>
59. NORMA MEXICANA NMX-AA-030/2-SCFI-2011 Análisis de Agua - Determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba - parte 2 - Determinación del índice de la demanda química de oxígeno – Método de tubo sellado a pequeña escala. Secretaría de Economía. Diario Oficial de la Federación. 27 de junio del 2013. Disponible en: <http://201.116.60.182/CONAGUA07/Noticias/NMX-AA-030-2-SCFI-2011.pdf>
60. NORMA MEXICANA NMX-AA-034-SCFI-2015. Análisis de agua - Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba. (CANCELA A LA NMX-AA-034-SCFI-2001). Secretaría de Economía. Diario Oficial de la Federación. 18 de abril del 2016. Disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166146/nmx-aa-034-scfi-2015.pdf>
61. NORMA MEXICANA NMX-AA-042-SCFI-2015 Análisis de agua - Enumeración de organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales (termotolerantes) y Escherichia coli – Método del número más probable en tubos múltiples (CANCELA A LA NMX-AA-42-1987). Secretaría de Economía. Disponible en: <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa042-2015.pdf>
62. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-002-ECOL-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 9 de enero de 1997. Disponible en: <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3295/1/nom-002-semarnat-1996.pdf>

63. Noyola, A., Morgan Sagastume, J. M. & Güereca, P. (2013). Selección de Tecnologías Para el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de ingeniería. México. pp.6-40. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/287975365\\_Seleccion\\_de\\_Tecnologias\\_para\\_el\\_Tratamiento\\_de\\_Aguas\\_Residuales\\_Municipales\\_guia\\_de\\_apoyo\\_para\\_ciudades\\_pequenas\\_y\\_medianas](https://www.researchgate.net/publication/287975365_Seleccion_de_Tecnologias_para_el_Tratamiento_de_Aguas_Residuales_Municipales_guia_de_apoyo_para_ciudades_pequenas_y_medianas)
64. OCDE (2018). Estudios de Evaluación de Competencia de la OCDE. México, Éditions OCDE. París. pp. 121-123.
65. Odong, R., Kansime, F., Omara, J., & Kyambadde, J. (2015). Tertiary treatment of abattoir wastewater in a horizontal subsurface flow-constructed wetland under tropical conditions. *International Journal of Environment and Waste Management*, 15(3), 257-270. Disponible en: <https://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJEW.2015.069160>
66. Okoye, N. M., Madubuike, C. N., Nwuba, I. U., & Orakwe, L. C. (2018). Growth and treatment performance of three macrophytes in a pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetland for slaughterhouse wastewater. *Archives of Current Research International*. 14(1). pp 1-7. Disponible en: <http://www.journalacri.com/index.php/ACRI/article/view/17386/32374>
67. Peña Varón, M. R., Van Ginneken, M., & Madera, C. A. (2003). Humedales de flujo subsuperficial: una alternativa natural para el tratamiento de aguas residuales domésticas en zonas tropicales. *Ingeniería y Competitividad*. 5(1).pp. 27-34. Disponible en: [http://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria\\_y\\_competitividad/article/view/2302/3052](http://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria_y_competitividad/article/view/2302/3052)
68. Pérez López, M. 2009. Selección de plantas acuáticas para establecer humedales en el estado de Durango. Tesis de Doctorado. Centro De Investigación De Materiales Avanzados, S.C. pp. 5-68. Disponible en: <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/597>

69. Procuraduría Federal del Consumidor. (07 de octubre de 2019). Gobierno de México. Obtenido de [gob.mx: https://www.gob.mx/profeco/articulos/certificacion-tif](https://www.gob.mx/profeco/articulos/certificacion-tif)
70. Ramalho, R. S. (1996). Tratamiento de aguas residuales. Reverté. Página 156. Disponible en: [https://books.google.com.mx/books?id=T9MfEAAAQBAJ&printsec=frontcover&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.mx/books?id=T9MfEAAAQBAJ&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)
71. Reyes Vidal, M. Y., Diez, Á. A., Martínez-Silva, A., & Asaff, A. (2012). Investigación, desarrollo tecnológico e innovación para el cuidado y reúso del agua. Estudios sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional, (2), pp. 203-216. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/417/41724972009.pdf>
72. Rojas, R. (2002). Sistemas de tratamiento de aguas residuales. Gestión integral de Tratamiento de Aguas Residuales, 1(1), 8-15. Disponible en: [https://control-ambiental5.webnode.com.co/\\_files/200000093-9097e9190c/GESTION%20INTEGRAL%20DEL%20TRATAMIENTO%20AR.pdf](https://control-ambiental5.webnode.com.co/_files/200000093-9097e9190c/GESTION%20INTEGRAL%20DEL%20TRATAMIENTO%20AR.pdf)
73. Romero Aguilar, M., Colín-Cruz, A., Sánchez-Salinas, E., & Ortiz-Hernández, M. A. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. 25(3). pp.157-166. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-)
74. Ruiz Dávila, S. D. (2011). Plan de gestión de residuos del camal del cantón Antonio Ante. Tesis de Ingeniería. Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental. pp. 59-77. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/3743/1/CD-3437.pdf>
75. Salas, G., & Condorhuamán, C. (2008). Tratamiento de las aguas residuales de un centro de beneficio o matadero de ganado. Revista Peruana de Química e Ingeniería Química, 11(1). pp.29-35. Disponible en: <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe>

76. Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (20 de marzo de 2020). SENASICA. Obtenido de GOBIERNO DE MÉXICO: <https://www.gob.mx/senasica/documentos/directorio-de-establecimientos-tif>
77. Sierra Pech O. M. & López Ocaña G. (2013). Tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales. *Kuxulkab*, 19(36). pp.41-53. Disponible en: <http://revistas.ujat.mx/index.php/kuxulkab/article/view/337/260>
78. Signorini Porchietto, M., Civit Gual, S., Bonilla Padilla, M., Cervantes Ramíre, M. E., Calderón Vázquez, M., Pérez Montecillo A., Espejel Maya M., Almanza Rodríguez, C., (2006). Evaluación de Riesgos de los Rastros y Mataderos Municipales. Comisión Federal para la Protección Contra Riesgos Sanitarios. pp.32-56. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/154388/Evaluacion\\_de\\_riesgos\\_de\\_los\\_rastros\\_y\\_mataderos\\_municipales.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/154388/Evaluacion_de_riesgos_de_los_rastros_y_mataderos_municipales.pdf)
79. Signorini, M. (2008). Rastros Municipales y su Impacto en la Salud Pública. *Nacameh*, 2(1). pp. 1-24. Disponible en: <http://cbs.izt.uam.mx/nacameh/>
80. Sonune, A. y Ghaté, R. (2004) Developpe in wastewater treatment methods. *Desalination*, 167. pp. 55-63. Disponible en: <http://www.minnwater.com/research/ce06015/2015/Lecture-9-reading-assignment-2.pdf>
81. Togados, J. H. (2010). Tratado de enología (Vol. 1). Mundi-Prensa Libros. Página 831. Disponible en: [https://books.google.com.mx/books?id=og-CDwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=\).+Tratado+de+enología+\(Vol.+1\).+Mundi-Prensa+Libros&hl=es-](https://books.google.com.mx/books?id=og-CDwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=).+Tratado+de+enología+(Vol.+1).+Mundi-Prensa+Libros&hl=es-)
82. Torrens Armengol, A. (2016). Subsurface flow constructed wetlands for the treatment of wastewater from different sources. Design and operation. Tesis Doctoral. Universitat de Barcelona. pp.29-158. Disponible en: <http://diposit.ub.edu/dspace/handle/2445/98464>
83. Urbina, G. B., & Vallejo, J. S. R. (2014). Proyectos ambientales en la industria. Grupo Editorial Patria. Página 32. Disponible en: <https://editorialpatria.com.mx/pdf/files/9789702410355.pdf>

84. Valderrama, L. T., Campos, C., Velandia, S., & Zapata, N. (1987). Evaluación del efecto del tratamiento con plantas acuáticas (*E. crassipes*, *Lemna sp.* y *L. Laevigatum*) en la remoción de indicadores de contaminación fecal en aguas residuales domésticas. Seminario internacional sobre métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales. Pp.193-201. Disponible en: [https://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-09-28\\_10-59-33111050.pdf](https://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-09-28_10-59-33111050.pdf)
85. Vergeles, Y., Vystavna, Y., Ishchenko, A., Rybalka, I., Marchand, L., & Stolberg, F. (2015). Assessment of treatment efficiency of constructed wetlands in East Ukraine. *Ecological Engineering*, 83, 159-168. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.06.020>
86. Wen, Q., Tutuka, C., Keegan, A., & Jin, B. (2009). Fate of pathogenic microorganisms and indicators in secondary activated sludge wastewater treatment plants. *Journal of Environmental Management*, 90(3). pp. 1442–1447. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030147970800279X?via%3Dihub>
87. Wu, S., Wallace, S., Brix, H., Kusch, P., Kirui, W. K., Masi, F., & Dong, R. (2015). Treatment of industrial effluents in constructed wetlands: challenges, operational strategies and overall performance. *Environmental Pollution*, 201. pp.107-120. Disponible en: <https://sci-hub.tw/https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749115001281>
88. Yazdani, V., & Golestani, H. A. (2019). Advanced treatment of dairy industrial wastewater using vertical flow constructed wetlands. *Desalin Water Treat*, 162, 149-155. doi: 10.5004/dwt.2019.24335
89. Zhang, Z., Rengel, Z., & Meney, K. (2007). Removal of nutrients from secondary-treated municipal wastewater in wetland microcosms using ornamental plant species. *International Journal of Environment and Waste Management*, 1(4), 363-375. [https://www.researchgate.net/profile/Kathy\\_Meney/publication/249922514\\_Removal\\_of\\_nutrients\\_from\\_secondary-](https://www.researchgate.net/profile/Kathy_Meney/publication/249922514_Removal_of_nutrients_from_secondary-)

treated\_municipal\_wastewater\_in\_wetland\_microcosms\_using\_ornamental\_plant\_species/ -in-wetland-microcosms-using-ornamental-plant-species.pdf