

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISION DE INGENIERIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS



Evaluación de indicadores de calidad de agua y remoción de nitrógeno para optimizar la configuración de sistemas fitobioelectroquímicos con *Canna indica* en aguas residuales municipales.

Por:

ALMA YESELI GARZA RABAGO

TESIS

Presentada como requisito para obtener el título de:

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

Saltillo, Coahuila, México.

Junio 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISION DE INGENIERIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS

Evaluación de indicadores de calidad de agua y remoción de nitrógeno para optimizar la configuración de sistemas fitobioelectroquímicos con *Canna indica* en aguas residuales municipales.


Por:

ALMA YESELI GARZA RABAGO


Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

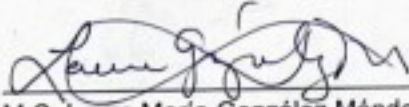
Aprobado por el Jurado Examinador



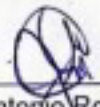
Dr. Pedro Pérez Rodríguez
Presidente



Dra. Silvia Yudith Martínez Amador
Vocal



M.C. Laura María González Méndez
Vocal



Dr. José Antonio Rodríguez de la Garza
Vocal




M.C. Sergio Sánchez Martínez
Coordinador de la División de Ingeniería

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISION DE INGENIERIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS

Evaluación de indicadores de calidad de agua y remoción de nitrógeno para optimizar la configuración de sistemas fitobioelectroquímicos con *Canna indica* en aguas residuales municipales.

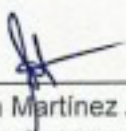
Por:

ALMA YESELI GARZA RABAGO


Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

Aprobado por el Comité de Asesoría



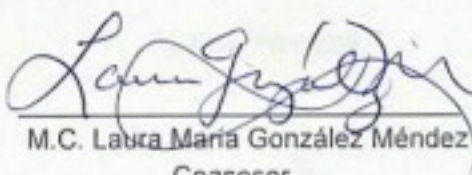
Dra. Silvia Yudith Martínez Amador
Asesor principal interno



Dr. José Antonio Rodríguez de la Garza
Asesor principal externo



Dr. Pedro Pérez Rodríguez
Coasesor



M.C. Laura María González Méndez
Coasesor

Saltillo, Coahuila, México
Junio 2025

DECLARACIÓN NO PLAGIO

Todo material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos, y pertenece al autor principal quien es el responsable directo y 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 citar; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, 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 el respectivo titular de los Derechos de Autor. Por lo anterior nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo no ha sido previamente presentado en ninguna otra institución educativa, organizacional, medio público o privado.

Autor principal	Asesor Principal
<u>Alma Garza</u>	<u>Dra. Silvia Ydith Martínez Aunador</u>
Nombre y Firma	Nombre y Firma

DEDICATORIA

A Dios por darme la oportunidad de tener una carrera, de cumplir mis sueños, y por permitirme contar con una familia que, a pesar de todas las dificultades, siempre estuvo ahí para impulsarme.

A mi mamá, le debo un agradecimiento eterno. Su sacrificio, su trabajo incansable, y su dedicación diaria para que yo pudiera seguir adelante son invaluable. Gracias, mami, por poner la vida y un poco más, por salir todos los días a trabajar y vender para que yo pueda estar en donde estoy. Sin ti, nada de esto sería posible.

A mis hermanos, Andrea y Gilberto, les agradezco por apoyarme a su manera, por ser ese motor que me dio fuerzas para seguir adelante siempre, sin importar las circunstancias.

A mi novio Emiliano, gracias por tu apoyo incondicional, por ser una constante fuente de fortaleza en este camino. Te agradezco profundamente por todo el amor que me brindaste a lo largo de este camino. No solo me diste fuerzas para seguir luchando por mis sueños, sino que también me ayudaste a sentirme en casa, aun cuando estaba lejos de mi familia.

A mi familia, por creer en mí y por brindarme su amor incondicional. Su presencia en mi vida ha sido el motor que me ha impulsado a superar cada obstáculo y a luchar por mis sueños, porque siempre estuvieron ahí, dándome la confianza y el cariño necesarios para nunca rendirme.

A mi tía Marytoña, te agradezco por tus sabios consejos y por estar siempre ahí, incluso a la distancia, ayudándome a mantenerme firme y enfocada en mis logros. Y a mi tío Russo, gracias por apoyar a mi familia y a mí en cada paso de este camino para alcanzar este sueño.

No puedo olvidar a mis fieles compañeros, mis perritos Bobby, Topo, y mi Angel Manchis. Gracias por estar siempre a mi lado en esos momentos de desvelo, acompañándome en cada tarea y proyectos. Su compañía y amor me dieron la fuerza para seguir adelante.

A todos ustedes, les debo este logro. Sin su amor, apoyo y presencia, nada de esto sería posible.

IV. AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por permitirme seguir adelante, por darme la fortaleza en los momentos difíciles y por acompañarme en cada paso de este camino. A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, mi segunda casa, le doy las gracias por toda la sabiduría y las enseñanzas que me ha dejado. Esta institución no solo me ha brindado una carrera, sino también el impulso para continuar luchando y superar cada obstáculo que se me presente. Aquí he encontrado un espacio que me ha formado y me ha dado las herramientas para seguir adelante.

Agradezco a mi mamá, no tengo palabras suficientes para agradecerte todo lo que has hecho por mí. Desde siempre, has puesto todo lo que estaba en tus manos y más para que yo pudiera cumplir nuestros sueños. Gracias por tu dedicación, tu sacrificio y por luchar incansablemente para que nada me faltara. Has sido mi mayor ejemplo de fuerza y amor incondicional, y cada paso que he dado en este camino ha sido posible gracias a ti.

Tu esfuerzo, tus desvelos y tu trabajo diario me han dado la oportunidad de llegar hasta aquí, y todo lo que he logrado te lo debo a ti. No solo me diste lo necesario para salir adelante, sino también el amor y el apoyo que me hicieron fuerte para no rendirme. Gracias, mami, por creer en mí, por estar siempre a mi lado y por convertir mis sueños en los nuestros. Todo lo que soy, lo soy gracias a ti.

Quiero agradecer a la QFB. Brenda Verónica Borrego Limón por su apoyo en el laboratorio, en todos los procesos técnicos y en su enseñanza para el correcto manejo de equipo en el laboratorio para que el proyecto siempre tuviera los mejores resultados. Por crear un ambiente donde el aprendizaje siempre fue una experiencia emocionante. Tu acompañamiento hizo que cada día tuviera el deseo de aprender más.

Un agradecimiento especial a la Doctora Silvia, gracias por compartirme su conocimiento y por su ayuda en los momentos en que sentí que no podía. Por brindarme siempre una enseñanza de todo, no solo fue mi asesora, sino también una amiga que siempre supo darme los consejos que necesitaba escuchar. Por todo esto, le agradezco de corazón.

V. CONTENIDO

I.	Jurado y Comité de Asesoría.....	2
II.	Declaración de no plagio.....	4
III.	Dedicatoria.....	5
IV.	Agradecimientos.....	6
V.	Contenido	7
VI.	Abreviaturas.....	8
VII.	Resumen.....	9
VIII.	Introducción.....	10
IX.	Revisión de Literatura.....	13
	10.1. Humedales construidos.....	13
	10.2. Sistemas fitobioelectroquímicos.....	14
	10.3. Nitrógeno.....	14
X.	Justificación.....	16
XI.	Objetivos.....	17
XII.	Hipótesis.....	17
XIII.	Material y Métodos.....	18
	15.1. Materiales.....	18
	15.2. Procedimiento experimental.....	19
	15.3. Técnicas analíticas.....	19
	15.4. Diseño experimental.....	23
XIV.	Resultados y Discusión.....	24
	16.1. Remoción de nitrógeno.....	24
	16.2. Evaluación de tratamientos.....	24
	16.3. Tabla de resultados.....	26
XV.	Conclusiones.....	27
XVI.	Bibliografía.....	28

VI. ABREVIATURAS

ARM: Agua residual municipal

EDAR: Estación depuradora de agua residual

PTAR: Planta de tratamiento de aguas residuales

SBE: Sistema bioelectroquímico

DBO: Demanda biológica de oxígeno

SFBE: Sistemas fitobioelectroquímicos

TRH: Tiempo de retención hidráulica

VII. RESUMEN

Dar un tratamiento a las aguas residuales es de suma importancia por el impacto que tienen estas en el medio ambiente, uno de los contaminantes más problemáticos es el nitrógeno, por eso su remoción en los tratamientos es clave para dar protección a los ecosistemas, una alternativa para la remoción es el tratamiento biológico, como por ejemplo el humedal y los sistemas bioelectroquímico. La unión de estos tratamientos son los sistemas fitobioelectroquímicos donde se combina el potencial de los humedales construidos con las celdas de combustible microbianas, las cuales aprovechan la capacidad que tienen las bacterias electroactivas para la oxidación de compuestos orgánicos y generan energía eléctrica como un subproducto en el tratamiento. El experimento tuvo como objetivo la evaluación de la eficiencia de sistemas fitobioelectroquímicos y su utilidad para remoción de nitrógeno en las aguas residuales municipales, incluyendo la planta *Canna indica*. Se establecieron 9 tratamientos y 2 controles sistemas de tratamiento con plántulas de *Canna Indica* y se utilizaron tres tipos de sustrato (zeolita, tepojal y tezontle) y cada uno se dividió en tres tamaños diferentes (6,9,13 mm) para después combinarse con tres tipos de inóculo los cuales fueron composta, humus líquido y humus sólido. Además de controles sin plantas, ni sustrato, ni fotoperiodo, después los sistemas fueron sometidos a tres fotoperiodos diferentes de 8,12 y 16 horas para así observar si la luz tiene alguna influencia en el desempeño del tratamiento. Se instalaron electrodos de fieltro de grafito para la captación del flujo de electrones generados por las bacterias electrogénicas. Se midieron las diferentes formas de nitrógeno mediante métodos estandarizados como lo son el método Kjeldahl, espectrofotometría y determinación de nitritos y nitratos. Los resultados muestran que los tratamientos T3, T6 y T9 especialmente los utilizaron como sustrato zeolita obtuvieron eficiencia en la remoción de nitrógeno con niveles superiores al 90%, ya que estos tratamientos presentaron nitrógeno en muy bajas concentraciones, lo que indica que este elemento fue usado para asimilación o bien fue desasimilado como nitrógeno molecular, esto en contraste a los controles sin planta ni electrodo los cuales apenas alcanzaron una remoción del 30% de eficiencia. Se concluye que los sistemas fitobioelectroquímicos con *Canna Indica* representan una alternativa con eficacia además de sostenible para el tratamiento de aguas residuales, gracias a su capacidad para reducir significativamente compuestos tóxicos como el nitrógeno, además de tener un bajo costo, facilidad en el mantenimiento y posibilidad de generación de energía los convierte en una solución viable, especialmente en las zonas de más bajos recursos.

VIII. INTRODUCCIÓN

La gran extensión del alcance de las actividades humanas, ha provocado una alteración muy significativa en los procesos naturales de nuestros sistemas acuáticos, esto dando como resultado un mayor impacto en el cambio climático, de una manera negativa, como lo es la mala calidad del agua a nivel global (Oliveira-Filhno *et al.*, 2012). En México la mayor problemática en la contaminación de aguas se realiza gracias a prácticas como la agrícola, la ganadera, los residuos que se generan de las industrias y las aguas residuales urbanas que todos utilizamos día a día. Este acontecimiento se ha ido incrementando con el paso de los años y la extensión que se ha hecho en la población en los últimos años, provocando una preocupación en el tema de los recursos energéticos e hídricos (PNUD, 2015).

En el norte de México, la mala distribución de agua ha llevado a una necesidad constante de este recurso, acompañado con la sobreexplotación que representa una gran amenaza en la alteración del equilibrio del ciclo hídrico (CONAGUA, 2009). Para afrontar la problemática del agua se sugiere tratar y reusar. Existen diferentes tratamientos entre los de tipo biológico como los sistemas fitobioelectroquímicos (SBE), que es una tecnología que combina los humedales construidos con celdas de combustible microbianas (sistemas fitobioelectroquímicos). Estos últimos ayudan generando electricidad para tratar los contaminantes que se encuentran en el agua, mientras aprovechan de los procesos naturales que las plantas llevan a cabo como la fotosíntesis y la respiración microbiana. Estos sistemas representan una alternativa innovadora y sostenible para el tratamiento de agua residual. Funcionan mediante la actividad de las bacterias electrogénicas capaces de oxidar la materia orgánica que se encuentre presente en el agua residual y al mismo tiempo transfiere electrones a un ánodo, lo que permite que se genere energía o algunos compuestos útiles como el hidrógeno o metano. En este tipo de tratamiento se combinan los principios químicos, electroquímicos y se puede aplicar en la remoción de los contaminantes convencionales, así como en la remoción de los compuestos más tóxicos además se pueden usar para complementar tratamientos ya existentes, optimizando los y reduciendo un impacto ambiental (Bustos-Murillo *et al.*, 2023).

Los humedales construidos (HC) se han posicionado como una tecnología nueva y sostenible para el tratamiento de las aguas residuales, estos consisten en imitar los procesos de purificación de los humedales naturales y en ellos se combinan materiales como el sustrato y la vegetación acuática y todo trabaja en conjunto para poder eliminar los contaminantes del agua residual la literatura señala que el uso de HC tiende a un aumento debido a su eficiencia, ya que tiene un carácter de solución basado a un proceso que se lleva a cabo en la naturaleza y en este se identifican cuatro áreas clave para mejorar su uso, el uso de las plantas nativas para que ya estén adaptadas al clima, la potenciación de sus beneficios en el ecosistema y una innovación en el diseño

para optimizar su rendimiento, además se pueden integrar a otros sistemas para así hacerlos más eficientes (Perez *et al.*, 2022). Se resalta que los HC son adecuados para tratar diferentes tipos aguas residuales, algunas de estas son; las aguas municipales o las domésticas que son las que utilizamos diariamente en nuestro hogar y de los centros urbanos a los que estamos acostumbrados, las aguas industriales tienen muchas ventajas como el bajo costo, la fácil operación su gran capacidad de integración entre otras. Hay diferentes tipos de plantas con capacidad de remoción de contaminantes algunas de ellas son *Typha spp.* (eneas o espadañas), *Phragmites australis* (carrizo común) *Cyperus papyrus* (papiro) aunque todas estas son excelentes plantas para la absorción de nitrógeno la utilizada en el proyecto fue la *Canna indica*, por su eficacia en humedales construidos, aparte de ser una planta de gran adaptabilidad que ha demostrado que es muy efectiva, no solo en el nitrógeno sino en diferentes nutrientes y metales pesado, su gran capacidad de crecimiento en diferentes tipos de clima y su gran eficiencia en los humedales, esto la convierte en una opción muy viable ya que también es considerada una planta de la región por lo que ya está adaptada a los tipos de clima que se utilizaron en el lugar del experimento, *Canna indica* es una planta comúnmente utilizada para este tipo de sistemas ya que esta especie tiene una muy buena capacidad de degradar los contaminantes que están presentes en las aguas residuales, convirtiendo a esta en una excelente opción para el sistema fitobioelectroquímico porque es una planta fitoacumuladora y fitodegradadora (Ciria *et al.*, 2005).

La combinación de los HC con los SBE (CCM) actualmente son tecnologías innovadoras, unen dos enfoques que son un sustento, el tratamiento biológico natural que hay en los humedales y la productividad de energía que hay en la actividad microbiana, estos sistemas están constituidos por sustratos como en este caso que usamos tres tipos diferentes de sustratos (tepojal, zeolita y tezontle) que estos actúan como un soporte para las plantas y como una barrera física también para retener los sólidos y contaminantes de mayor tamaño, contiene un ánodo en la zona anóxica del sustrato, un cátodo colocado en la zona más oxigenada que en este caso fue el que se colocó arriba, este recibe los electrones a través de un circuito, cerrando así el flujo eléctrico, microorganismos electroactivos, que metabolizan la materia orgánica que hay en el agua con los residuos y este transfiere electrones al ánodo y así se genera una electricidad como el subproducto (Doherty *et al.*, 2015). Estos sistemas son muy eficientes para remover los diversos contaminantes que se encuentren presentes tales como: nitrógeno, nitrógeno amoniacal, nitrato y nitritos (Villaseñor *et al.* 2013).

La importancia de la remoción del nitrógeno en aguas residuales es porque el nitrógeno especialmente en formas como el nitrógeno amoniacal representa un problema fuerte para la salud pública al igual que para el ambiente, ayuda a evitar problemas como la eutrofización de cuerpos de agua superficiales que contribuye al crecimiento de algas lo que hace que se disminuya el oxígeno disuelto y afecta de una forma muy

significativa a la vida acuática, eliminar el nitrógeno del agua residual hace que su toxicidad se minimice, el nitrógeno amoniacal puede convertirse en nitratos, que son peligrosos para su consumo en humanos ya que pueden causar enfermedades como la metahemoglobinemia o síndrome del bebe azul, su remoción promueve la calidad del influente que se ha sometido al tratamiento del agua para su uso (Benítez-Díaz *et al.*, 2015).

IX. REVISIÓN DE LITERATURA

Humedales construidos

Los humedales construidos son una estrategia muy innovadora y efectiva para el tratamiento de agua residual en zonas urbanas para el agua residual municipal con un enfoque hacia un proceso que ya es elaborado naturalmente, debido a que se basan en estas para poder lograr su proceso y así cumplir funciones de saneamiento a costos muy bajo para que sea accesible para las zonas más rurales y con un impacto ambiental muy bajo, estos se definen como sistemas artificiales que son diseñados para imitar las formas físicas, químicas y biológicas de los humedales naturales, utilizando elementos clave como lo son las plantas acuáticas en este caso la planta *Canna indica* sustratos como lo son la zeolita el tezontle y tepojal y microorganismos para tratar aguas residual, estos sistemas pueden funcionar sin tener la necesidad de usar grandes cantidades de energía o de muchos reactivos químicos que en algunos casos son muy costosos lo cual lo hace una alternativa muy sostenible para la población en general que quiera poder darle un uso al agua residual que ellos mismos desechan Hay diferentes tipos de HC los principales son los humedales de flujo superficial donde el agua va circulando sobre un lecho, y hay más variedad de este mismo tipo donde el agua va corriendo por debajo del sustrato, los de flujo horizontal o vertical dependiendo de la dirección del paso del agua, cada uno cuenta con sus ventajas por ejemplo las del flujo superficial vertical es mucho más fácil que se oxigenen de una manera correcta y esto hace que hay una mejor eliminación de nitrógeno amoniacal y materia orgánica, sin embargo en los horizontales mantienen condiciones anóxicas mucho más adecuadas para una desnitrificación, una de las principales conclusiones que podemos observar es que los HC han demostrado una alta eficiencia para la remoción de los contaminantes como podrían ser DQO, DBO, nitrógeno, fosforo, metales pesados y algunos patógenos, esta capacidad los hace útiles tanto en los tratamientos primarios como lo es en los proceso terciarios, y su aplicación se va extendiendo, ya que no solo puede usarse en aguas residuales municipales sino también al grado ya de aguas industriales y agrícolas, algunos autores destacan muchas ventajas como lo es que tienen un diseño muy flexible y adaptable a diferentes escalas es decir así como se puede realizar a nivel industria, puede realizarse en un vivienda o en comunidades completas, sin embargo también se encuentran desafíos ya que como son un sistema con pocos estudios, se tiene que investigar su uso con especies nuevas y así poder optimizarlos diseños y poder garantizar una mayor confiabilidad y durabilidad de su vida útil. Los HC no sólo deben considerarse como una opción de bajo costo y eficaz si no como una infraestructura verde capaz de lograr un desarrollo sostenible en especial en ciudades que carecen se el servicio del agua (Pérez *et al.*, 2022).

Sistemas fitobioelectroquímicos

Los sistemas fitobioelectroquímicos representan una alternativa muy innovadora con tecnología, son sustentables y también son multifuncionales para el tratamiento de las aguas residuales municipales para el tratamiento de agua residual esta es la tecnología que une los antes mencionados HC con las celdas de combustibles microbianos y estos combinan procesos electroquímicos con procesos naturales y así degradan contaminantes y al mismo tiempo se genera electricidad. La base de todo este proyecto son las plantas acuáticas y los microorganismos electroactivos que van trabajando en conjunto para la transformación de la materia orgánica que se contiene en las aguas residuales urbanas. Las bacterias oxidan los compuestos orgánicos y generan los electrones que son captados por los ánodos que este ya se encuentra en el lecho del sistema. Los electrones van fluyendo hacia el cátodo que se encuentra en un lugar más expuesto al oxígeno los componentes principales de un sistema fitobioelectroquímico son las plantas emergentes en nuestro caso la *Canna indica*, esta contribuye a la oxigenación además al mismo tiempo retienen y absorben los nutrientes. algunos beneficios del sistema es que remueven de manera muy eficiente los contaminantes, esto hace que los SFB sean una opción muy eficiente A diferencia de los tratamientos convencionales los sistemas fitobioelectroquímicos requieren una poca cantidad de energía externa, no necesitan de demasiados cuidados en cuanto al mantenimiento y se pueden construir con materiales locales sin embargo por ser un tratamiento de poco tiempo de ser tratado aún hay limitaciones en su eficiencia energética ya que la electricidad que producen sigue siendo baja, sin embargo ya se están desarrollando diferentes tipos de materiales electrodos y con configuraciones hídricas para poder hacer una mejora en este aspecto, los SBF son una solución muy amigable con el medio ambiente y al mismo tiempo con eficiencia, su carácter multifuncional y su sustentabilidad lo convierte en una herramienta clave y de gran valor para el desafío que se está viviendo actualmente con el agua (Bustos-Murillo *et al.*, 2023)

Nitrógeno

El nitrógeno es un elemento químico que se encuentra en la tabla periódica, es un elemento no metálico y pertenece al grupo 15 que es el grupo de nitrógenos de la tabla periódica, tiene un número atómico de 7 y en condiciones normales es un gas diatómico, es incoloro, inodoro e insípido que está presente en un 78% en el aire atmosférico. A pesar de su abundancia la mayoría de los organismos no lo pueden utilizar directamente y depende de formas químicas como el nitrato, nitrito o amonio que están presentes en el agua.

Aunque el nitrógeno es un elemento esencial para la vida, su presencia en exceso en las aguas residuales genera problemas ambientales y un riesgo mayor para la salud

humana. En diversos artículos como de Cardenas-Calvichi y Sanchez-Ortiz (2013) se menciona los efectos y mecanismos de la remoción de este elemento en los cuerpos de agua que se encuentran contaminados, el nitrógeno puede presentarse de diferentes maneras en el agua residual algunas de ellas son el amonio, nitrito, nitrato y algunos compuestos orgánicos nitrogenados, todas estas formas provienen del ser humano, de las actividades agrícolas, industriales, etc. La acumulación de todos estos contaminantes ha causado una huella ecológica muy grande en donde destaca la eutrofización en donde se van incrementando los nutrientes en las aguas lo que puede llegar a causar un crecimiento descontrolado en las algas y algunos organismos que se encuentran en esta. La eutrofización además de causar una alteración en el equilibrio ecológico, también causa una reducción en la concentración de oxígeno que se encuentra disuelto en el agua, lo cual tiene un impacto en peces y las demás formas de vida acuática, este efecto puede traer consecuencias graves para el ser humano ya que puede ocasionar mortandad masiva en la fauna acuática y cambios en la vida de este ecosistema como se le conoce. A su vez el exceso de nitrógeno puede generar cambios y daños para el agua potable que se utiliza día a día pues el consumo de nitratos en concentraciones altas puede ocasionar al ser humano problemas como la metahemoglobinemia infantil y síndromes como el síndrome del bebe azul que ocasiona una reducción en la capacidad de sangre para transformar el oxígeno. Existen muchos mecanismos de remoción de nitrógeno en aguas residuales, y hoy en día existen muchas tecnologías que facilitan el proceso, los que se consideran como los más eficaces son los biológicos además de ser una opción sostenible. dentro de este se encuentran los procesos de desnitrificación y nitrificación, lo que se lleva a cabo en este proceso es la conversión de amonio en nitritos y luego en nitratos para después pasar a transformarse en un gas nitrógeno el cual se libera a la atmósfera para así cerrar el ciclo. Este mecanismo está basado en bacterias especializadas para ambientes aeróbicos y anóxicos siendo estas esenciales para controlar las condiciones ambientales del reactor, pH, temperaturas, oxígeno disuelto y así asegurar una eficiencia.

El problema del nitrógeno en agua es un problema a conciencia a nivel mundial que requiere de su atención y corrección urgentemente debe de haber una conciencia en ecosistemas acuáticos y garantizar agua segura para la población humana, es indispensable integrar el conocimiento a la población humana, para así crear una conciencia y así obtener un mejor uso para el agua.

X. JUSTIFICACIÓN

Existe una necesidad urgente de aligerar los fuertes impactos ambientales y sanitarios que se derivan del exceso de compuestos contaminantes en los cuerpos de agua, el nitrógeno en altas concentraciones causa un desorden en crecimiento de la fauna marina y en exceso puede traer graves consecuencias para los seres humanos, por lo tanto este proyecto no solo contribuye a una mejora eficiente de los tratamientos de agua residuales que ya existen sino que también tiene un aporte al cumplimiento de las normativas ambientales, promueve una segunda vida al agua y se fomenta un buen uso de las nuevas tecnologías para una mejora en la huella ambiental. Este proyecto contribuye tanto ambientalmente como socialmente y puede ayudar a la escasez hídrica y la contaminación del agua.

XI. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el sistema fitobioelectroquímico integrado con *Canna indica*, para conocer la remoción de nitrógeno e indicadores de calidad del agua en tratamiento de agua residual municipal.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Obtener plántulas de *Canna indica* mediante su propagación.
2. Evaluar la remoción de nitrógeno en sus diferentes formas en los sistemas fitobioelectroquímicos.
3. Analizar los resultados obtenidos para determinar si los sistemas fitobioelectroquímicos son capaces de remover nitrógeno y elegir el mejor tratamiento con base en la remoción del mismo.

XII. HIPÓTESIS

La optimización de elementos (tipo de sustrato, tamaño de sustrato, fotoperiodo, inóculo) del sistema fitobioelectroquímico con *Canna indica* mejora significativamente la remoción del nitrógeno en sus diferentes formas (amoníaco, nitritos, nitratos y nitrógeno orgánico) contenido en aguas residuales municipales.

XIII. MATERIAL Y MÉTODOS

Materiales usados para la elaboración de los sistemas fitobioelectroquímicos

- 44 plantas de *Canna indica*, estandarizadas en tamaños y edades
- Tres diferentes tipos de sustrato los cuales fueron; Zeolita, Tepojal y Tezontle
- Tres diferentes tipos de inóculo los cuales fueron; Composta, Humus líquido y Humus sólido
- Sistemas fitobioelectroquímicos (SFBQ) de capacidad de 1.5 litros
- Equipo para el monitoreo de parámetros fisicoquímicos del agua (pH, ORP, CE, Salinidad)
- Dispositivos para controlar fotoperiodos

Procedimiento para la elaboración de los sistemas fitobioelectroquímicos

En el Laboratorio de Biología del Departamento de Botánica se realizó la extracción de plantas *Canna indica* del suelo para su propagación en humedales, los cuales estaban hechos de grava y plantas *Canna indica* y aireadores de pecera. Después de dos meses las plántulas están listas para iniciar el proyecto.

Una de las variables del proyecto eran los tipos sustrato, por lo cual se utilizaron tres tipos diferentes de sustrato (tepojal, zeolita y tezontle) estos fueron tamizados para tener tres tamaños diferentes de cada sustrato (6, 9 y 13 mm) después de tamizar fueron lavados y se dejaron en remojo por 24 horas.

La segunda variable fue tipo de inóculo (composta, humus de lombriz sólido y humus de lombriz líquido) para lo cual se pesaron 10 gramos de estos y fueron añadidos al inicio del experimento.

La tercera variable fue el fotoperiodo, se establecieron tres tipos de fotoperiodos: 8 horas de luz/ 16 horas de oscuridad, 12 horas de luz/ 12 horas de oscuridad y 16 horas de luz/ 8 horas de oscuridad.

El material que se utilizó como electrodo tanto para el ánodo como para el cátodo fue de fieltro de grafito, los dos tuvieron un área de 44.18 cm, aunque la forma del ánodo y cátodo era diferente, el ánodo tenía un diámetro de 7.5 cm y el cátodo tenía un diámetro de 10.5 cm esto gracias al corte que se hizo al centro para que pudiera salir la planta al momento del experimento. El ánodo se encontraba al fondo del reactor y el cátodo en la superficie, estos eran conectados externamente por los alambres de titanio los cuales fueron insertados en los reactores de un litro. Para esto se les hacía un orificio a 1 cm de altura del reactor con el alambre de titanio y después se conectaba en un orificio al borde superior para después sellar con silicón con un largo de 8.5 cm cada alambre de titanio el cual se colocó en la parte inferior del reactor después se colocó el sustrato en cada reactor, según el indicado para después colocar la planta, y se acomodó de manera en la que estuviera de pie sin la necesidad de tener que estar

sosteniendo, y al final se colocó el cátodo en forma de dona para lograr sacar la planta por el medio, se procedió a colocarse en un estante donde estaban colocadas luces led de crecimiento. Se tenían tres secciones del estante, cada una estas luces para los diferentes fotoperiodos (8,12 y 16 horas).

Tabla 1. Descripción de los tratamientos y controles

Tratamiento o controles	Descripción <i>inóculo + tipo de sustrato + tamaño de sustrato + fotoperiodo</i>
C1	0+0+0+0
C2	Composta+tezontle+9mm+ 0
T1	Composta+tepojal+6mm+8h luz
T2	Composta+tezontle+13mm+ 12h luz
T3	Composta+zeolita+9mm+16h luz
T4	Humus liquido+tepojal+13mm+16h luz
T5	Humus liquido+tezontle+9mm+12h luz
T6	Humus liquido+zeolita+6mm+8h luz
T7	humus solido+tepojal+9mm+12h luz
T8	humus solido+tezontle+6mm+16h luz
T9	humus solido+zeolita+13mm+8h luz

Técnicas analíticas usadas para la determinación de las diferentes formas de nitrógeno

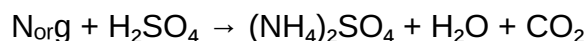
- **Determinación de nitrato**

El procedimiento de la determinación de nitrógenos se obtuvo de la NMX-AA-026-SCFI-2010.

El método Kjeldahl puede ser dividido en tres procesos básicos:

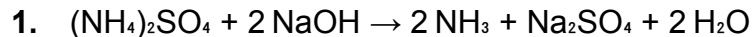
- Digestión: La descomposición del nitrógeno orgánico en la muestra se logra empleando una solución ácida. El resultado final es una disolución de sulfato de amonio.

Fórmula química:

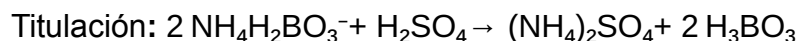


- Destilación: Es la adición de un exceso de álcali a la mezcla ácida de digestión para convertir el NH_4^+ en NH_3 , seguido por la ebullición y condensación del NH_3 gas el cual es recibido en una disolución de concentración conocida de ácido bórico

Fórmula química:



- Cuantificación: La cantidad de nitrógeno en la muestra puede ser calculada de la cantidad cuantificada de iones amonio (amonio) en la disolución de concentración conocida de ácido bórico



El método Kjeldahl cuantifica el nitrógeno en su estado de valencia trinegativo; excepto cuando se trata de los grupos funcionales: azida, azina, azo, hidrazina, nitrato, nitrito, nitrito, nitro, nitroso, oxima y semi-carbazona.

Limpia el equipo de destilación antes de utilizarlo, destilando una mezcla (1:1) agua+disolución hidróxido-tiosulfato de sodio hasta que el destilado esté libre de amonio. Esta operación debe realizarse cada vez que el aparato esté fuera de servicio.

- ***Nitrógeno amoniacal***

Determinar el volumen de la muestra de acuerdo a la tabla 1, si es necesario, ajustar el volumen a aproximadamente 500 mL y neutralizar a pH 7, con hidróxido de sodio 12,5 mol/L o ácido sulfúrico 5 mol/L. Colocar la muestra medida en un matraz Kjeldahl de 800 mL.

Añadir 25 mL de la disolución amortiguadora de boratos y ajustar el pH a 9,5 con disolución de hidróxido de sodio 6 mol/L utilizando potenciómetro o papel indicador para verificar. Transferir la disolución a un matraz Kjeldahl y añadir unas cuentas de vidrio o perlas de ebullición.

Conectar el matraz Kjeldahl al condensador, destilar la muestra cuidando que la temperatura del condensador no pase de 302 K (29 °C)

Recolectar el condensado en un recipiente que contenga 50 mL de la disolución indicadora de ácido bórico, sumergiendo la punta del condensador o una extensión del mismo por debajo de la superficie del líquido.

La destilación se completa cuando se hayan recolectado 300 mL de destilado aproximadamente, incluyendo los 50 mL de la disolución indicadora de ácido bórico.

Retirar el matraz colector y titular con disolución de ácido sulfúrico 0,006 mol/L hasta el vire del indicador de verde esmeralda a morado. Registrar el volumen gastado de ácido como volumen A.

- **Nitrógeno orgánico**

Digestión: adicionar cuidadosamente 50 mL de reactivo para la digestión al matraz de Kjeldahl y mezclar perfectamente. Añadir unas cuentas de vidrio o piedras de ebullición. Mezclar y conectar al equipo Kjeldahl; permitir la ebullición de la muestra hasta que el volumen de la disolución se reduzca aproximadamente a un volumen de 25 mL a 50 mL y se observe gran desprendimiento de vapores blancos (estos vapores pueden oscurecerse cuando la muestra presenta grandes cantidades de materia orgánica). NOTA : Si la muestra contiene una cantidad apreciable de material suspendido, añadir 50 mL adicionales de reactivo de digestión.

Continuar la digestión durante 30 mín. más. En este período, la disolución cambia de turbia hasta ser transparente e incolora o con una ligera coloración amarillo pálido. Durante la digestión el matraz Kjeldahl debe permanecer inclinado. Enfriar el matraz y su contenido, diluir a 300 mL con agua y mezclar.

Cuidadosamente añadir 50 mL de la disolución de hidróxidotiosulfato de sodio, para formar una capa alcalina en el fondo del matraz. Mezclar vigorosamente y verificar, con tirillas reactivas que el pH de la disolución sea mayor a 11,0 unidades de pH.

Conectar el matraz Kjeldahl al condensador, destilar la muestra cuidando que la temperatura del condensador no pase de 302 K (29 °C)

Recolectar el condensado en un recipiente que contenga 50 mL de la disolución indicadora de ácido bórico sumergiendo la punta del condensador o una extensión del mismo por debajo de la superficie del líquido.

Retirar el matraz colector y titular con disolución de ácido sulfúrico 0,006 mol/L hasta que la disolución vire de color verde esmeralda a morado. Registrar el volumen gastado de ácido como volumen C.

Nitrógeno total Kjeldahl Si solo se requiere la medición del nitrógeno total Kjeldahl; cuantificar el contenido de nitrógeno en la muestra, siguiendo el procedimiento para el nitrógeno orgánico (digestión)

-Determinación de nitritos

El procedimiento de determinación de nitritos se obtuvo de la Norma Mexicana NMX-AA-099-SCFI-2021.

Pretratamiento de la muestra

La muestra debe estar libre de turbiedad y color, para lograr esto, filtrar a través de membranas de 0,45 µm de poro. Si persiste el color en la muestra tomar una nueva porción de la muestra y adicionar con agitación 2 mL de la suspensión clarificadora de hidróxido de aluminio cada 100 mL, filtrar a través de papel de poro medio. Si existe color en la muestra continuar con el procedimiento y efectuar la corrección por color establecida en el numeral

Corrección por color

Si el color de la muestra pretratada persiste, puede interferir con la medición de la absorbancia. Tratar otro volumen igual de muestra cómo se describe en 10.2. En lugar de agregar las disoluciones de sulfanilamida y NEDA, adicionar 1 mL de la disolución de ácido clorhídrico al 10 % y leer la absorbancia.

Desarrollo de color

Si la muestra no se encuentra en el intervalo de pH de 5 a 9 unidades ajustar a este intervalo con HCl 1 mol/L. Tomar 50 mL de muestra o una porción de muestra diluida de 50 mL, agregar 2 mL del reactivo para desarrollo de color y mezclar.

NOTA: En caso de agua marina agregar 2 mL del reactivo para desarrollo de color.

Medición fotométrica

Medir la absorbancia por triplicado de las muestras y estándares a una longitud de onda de 543 nm. Realizar la lectura entre 10 minutos y hasta 2 horas después de adicionar el reactivo para desarrollo de color.

Llevar un blanco durante todos los pasos del método

NOTA: seguir las instrucciones del fabricante del equipo en cuanto a la resta automática del blanco de ensayo.

Corrección de la absorbancia de la muestra por presencia de color

$$A = A_m - A_b - A_c$$

-Determinación de nitrato

El procedimiento de determinación de nitratos se obtuvo de Bulgariu et al (2010).

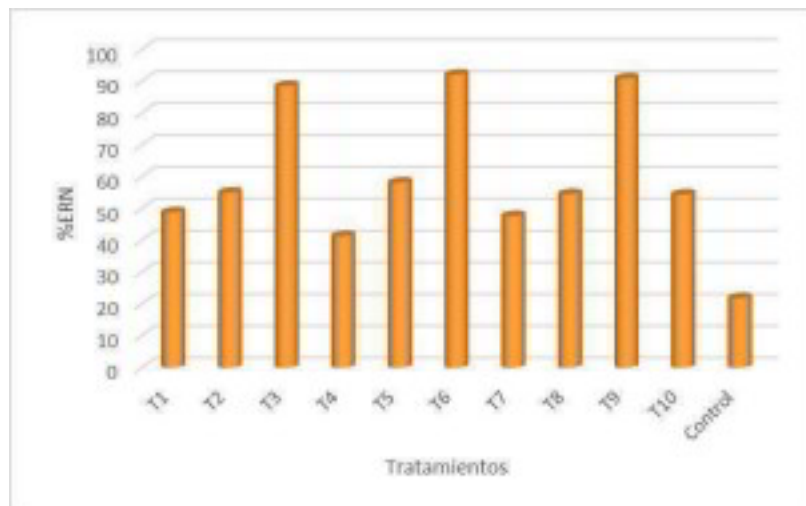
1. Tomar 4 mL de la muestra de agua que contenga entre 0.62 y 9.24 mg/L de nitrato y transferirla a un tubo de ensayo de 15 mL.
2. Agregar 1.0 mL de la solución de ácido cromotrópico al tubo que contiene la muestra
3. Añadir 8.0 mL de ácido sulfúrico concentrado (95–97%) al mismo tubo.
4. Mezclar cuidadosamente para asegurar una reacción homogénea.
5. Dejar reposar la mezcla durante 2 horas a temperatura ambiente para permitir el desarrollo completo del color amarillo característico del complejo nitrato-ácido cromotrópico.
6. Medir la absorbancia de la solución a 412 nm utilizando una celda de 1 cm de paso óptico.
7. Utilizar una solución en blanco, preparada con los mismos reactivos, pero sin la muestra de nitrato, para calibrar el espectrofotómetro.
8. Preparar una curva de calibración utilizando soluciones estándar de nitrato de concentraciones conocidas.
9. Determinar la concentración de nitrato en la muestra interpolando la absorbancia obtenida en la curva de calibración.

Diseño experimental

El diseño utilizado para este experimento fue Taguchi L9 que es un diseño ortogonal, que permite estudiar el efecto de diferentes variables simultáneamente (inóculo: composta, humus líquido y humus sólido; sustrato: tepojal, tezontle y zeolita, tamaño de sustrato: 6, 9 y 13 mm y fotoperiodo: 8,12 y 16 h), esto le permite al investigador estudiar los efectos principales y no correr un arreglo completo que sería muy costoso e implicaría mucho trabajo (Naranjo-Palacios, 2019).

XIV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la gráfica 1 se presenta la eficiencia de la remoción de nitrógeno total en los distintos tratamientos y controles, los resultados muestran que los tratamientos T3, T6 y T9 tienen los mejores resultados de remoción superando el 90% en promedio, lo cual muestra que estas configuraciones son altamente efectivas. Mientras que los controles tuvieron un porcentaje de remoción de nitrógeno de 21%. Esto nos muestra la importancia que tienen la planta, el tipo de sustrato y el tiempo que están expuestos a la luz es de suma importancia ya que al no tenerlo no se tiene el mismo porcentaje de remoción, si no que mucho menos, González *et al.* (2021) mencionan que los humedales muestran una eficiencia alta en la eliminación de nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitratos y nitritos, removiendo hasta el 96% del nitrógeno total, sin embargo no se menciona el TRH por lo que no se sabe con exactitud el tiempo que estuvo la planta en remoción del contaminante, esto sugiere que los humedales con *Canna indica* son una solución sostenible y eficiente para el tratamiento de agua residual ofreciendo una alternativa de bajo costo y mantenimiento especialmente para países en desarrollo



Gráfica 1. Porcentaje de eficiencia en remoción de nitrógeno en los Tratamientos del T1 a T9 y los dos controles

En la siguiente tabla se observa la remoción de los compuestos nitrogenados, lo cual refleja el impacto de las variables. Los tratamientos en los que fue utilizado como sustrato la *zeolita*, en específico T1 y T2, presentan mayor remoción de nitrógeno amoniacal lo cual significa una alta actividad de nitrificación, seguido de esto una desnitrificación, ya que se encuentran niveles bajos de nitritos y nitratos, lo que sugiere

que también ocurrió una conversión a N_2 . La presencia de nitrógeno orgánico tuvo una reducción muy alta en tratamientos como T1 y T2 probablemente por acción asimilativa microbiana y vegetal.

En general, los resultados indican que las rutas metabólicas dominantes fueron la desnitrificación y nitrificación en conjunto, esto junto a la asimilación de nitrógeno por las plantas, siendo más efectivas con el sustrato *zeolita*, esto da como resultado la importancia de un correcto diseño del sistema y la selección de los materiales soporte para optimizar el tratamiento del agua residual.

Tabla 2. Formas de nitrógeno y remoción total de nitrógeno.

Tratamientos y controles	mg NO ₃ /L	mg NO ₂ /L	mg NH ₄ ⁺ /L	mg Norg/L	mg N total/L	%ERN total
ARM	1.39	0.20	44.33	15.12	61.05	
C-TP-6-8	2.72	0.62	27.02	0.84	31.21	48.86
C-TZ-13-12	2.07	0.45	24.07	0.84	27.44	55.04
C-Z-9-16	1.71	0.12	3.44	1.68	6.97	88.58
HL-TP-13-16	1.67	0.31	32.10	1.68	35.77	41.39
HL-TZ-9-12	1.35	0.30	22.18	1.68	25.52	58.19
HL-Z-6-8	0.95	0.12	2.88	0.84	4.80	92.12
HS-TP-9-12	1.06	0.40	27.09	3.36	31.92	47.70
HS-TZ-6-16	0.95	0.30	21.41	5.04	27.71	54.59
HS-Z-13-8	0.84	0.09	2.05	2.52	5.51	90.96
0-0-0-0	2.14	0.47	40.84	4.2	47.66	21.92
C-TZ-9-0 WP	1.35	0.25	22.83	3.36	27.80	54.46

XV. CONCLUSIONES

Esta investigación permitió demostrar que los sistemas fitobioelectroquímicos con *Canna indica* dan como resultado una remoción muy significativa de todas las formas del nitrógeno como nitrógeno amoniacal, nitritos, nitratos y nitrógeno orgánico. La optimización de las variables permitió conocer que el sustrato, el tamaño del sustrato, el inóculo y el fotoperiodo son esenciales.

XVI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Benítez Díaz, L.A., Arenas-Sánchez, A., & Vélez Gutiérrez, L.J. (2015). Evaluación de la remoción de nitrógeno, fósforo y sulfuros en agua residual doméstica, utilizando *Phragmites australis* en bioreactores. *Información Tecnológica*, 26(6), 59–68. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642015000600007>
2. BULGARIU, L.; BULGARIU, D. Direct Determination of Nitrate in Small Volumes of Natural Surface Water Using a Simple Spectrophotometric Method. *Analytical Chemistry*, 31, n. 3-4, p. 201-207, (2012).
3. Bustos-Murillo, F.A., Pulido-Aponte, A.E., & Rivera Escobar, H.M. (2023). Tratamiento de aguas residuales en Colombia y sistemas bioelectroquímicos: usos y perspectivas. *Tecnura*, 27(76), 111–143. <https://doi.org/10.14483/22487638.23276>
4. Cárdenas Calvachi, G.L., & Sánchez Ortiz, I.A. (2013). Nitrógeno en aguas residuales: orígenes, efectos y mecanismos de remoción para preservar el ambiente y la salud pública. *Universidad y Salud*, 15(1), 27–42. Recuperado de <https://revistas.udenar.edu.co/index.php/usalud/article/view/375>
5. Doherty, L., Zhao, Y., Zhao, X., Hu, Y., Hao, X., Xu, L., et al. (2015). A review of a recently emerged technology: constructed wetland-microbial fuel cells. *Water Research*, 85, 38–45. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.08.016>
6. González, T., Vidal, G., Miranda, J.P., & Gómez, G. (2022). Sustainable treatment of urban wastewater using a constructed wetland coupled with a microbial fuel cell. *Environmental Technology*. <https://doi.org/10.1080/09593330.2022.2101234>
7. Naranjo-Palacios, F. (2019). *Diseños experimentales de Taguchi fraccionados* [Tesis de maestría, Instituto Tecnológico de Celaya, Tecnológico Nacional de México]. Repositorio del Tecnológico Nacional de México. <https://rinacional.tecnm.mx/handle/TecNM/794>
8. Pérez, Y.A., García Cortés, D.A., & Jauregui Haza, U.J. (2022). Humedales construidos como alternativa de tratamiento de aguas residuales en zonas urbanas: una revisión. *Ecosistemas*, 31(1), artículo 2279.

<https://doi.org/10.7818/ecos.2279>

9. Pérez, Y. A., & Martínez-Borrego, D. (2022). Humedales construidos como alternativa de tratamiento de aguas residuales en zonas urbanas: una revisión. *Ecosistemas*, 31(1), 2279. <https://doi.org/10.7818/ecos.2279>
10. Rojas Valencia, M. N., & Vargas Rivera, C. A. (2022). Humedales artificiales y celdas de combustibles microbianas: tratamiento de aguas residuales y generación de energía eléctrica. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 6(30), 7–23. <https://doi.org/10.33936/rcta.v6i30.323>
11. Sangeetha, R., & Sivakumar, P. (2023). A review on phytoremediation potential of *Canna* species for wastewater treatment. *Pollution Research*, 42(4), 437–444. <https://doi.org/10.53550/PR.2023.v42i04.005>
arxiv.org+1pmc.ncbi.nlm.nih.gov+1mdpi.com+2researchgate.net+2sciencedirect.com+2researchgate.net
12. Santos, A. C. O., & Matoso, E. (2017, octubre). *Validation of nitrogen-nitrate analysis by the chromotropic acid method*. En International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2017, Belo Horizonte, MG, Brasil. Associação Brasileira de Energia Nuclear – [ABEN.DOI: 10.13140/RG.2.2.24612.53129](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24612.53129)
13. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2010). NMX-AA-026-SCFI-2010: Análisis de agua – Medición de sólidos suspendidos totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba. México: SEMARNAT.
14. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2021). NMX-AA-099-SCFI-2021: Análisis de agua – Determinación de nitrógeno amoniacal en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas – Método de ensayo. México: SEMARNAT.
15. Villasenor, J., Capilla, P., Rodrigo, M. A., Cañizares, P., & Fernández, F. J. (2013). Operation of a horizontal subsurface flow constructed wetland–microbial fuel cell treating wastewater under different organic loading rates. *Water Research*, 47(17), 6731–6738. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.09.055> [mdpi.com](https://www.mdpi.com)

16. Wu, S., Wallace, S., Brix, H., Kuschk, P., Kirui, W. K., Masi, F., & Dong, R. (2018). Treatment of industrial effluents in constructed wetlands: Challenges, operational strategies and overall performance. *Water*, 10(9), 1128. <https://doi.org/10.3390/w10091128>