



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE HUATUSCO

REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS MEDIANTE EL USO DE LEMNA MINOR

OPCIÓN DE TITULACIÓN

Tesis.

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERÍA AMBIENTAL.

PRESENTA:

EDUARDO GARCIA AMECA

Asesores.

DRA. NOEMI NAVA VALENTE

DR. LUIS ANTONIO LÓPEZ ESCOBAR

HUATUSCO, VER.

MAYO, 2021

Agradecimientos

A Dios, por ser la fortaleza en mis debilidades, por ser luz en las noches que parecen no tener fin, por reanimarme en mis caídas, por escuchar mis peticiones y atender mis suplicas, por darme paciencia cuando la desesperación me alarde, por las buenas personas que ha puesto en mi camino y que me han ayudado a llegar a este punto de mi vida. Gracias.

A mis padres, por todo el apoyo y confianza depositada en mí y por darme la oportunidad de estudiar y terminar una carrera profesional, sin su apoyo nada de esto habría sido posible.

A mi profesor y director de tesis Dra. Noemí Nava Valente por confiar en mí e invitarme a formar parte de su equipo de trabajo y de quien es la idea original del presente proyecto de investigación, por sus consejos, paciencia y apoyo brindado para la realización de esta residencia. Gracias.

Al el Dr. Luis Antonio López Escobar por todo su apoyo brindado durante el desarrollo del presente reporte, por su ayuda en el laboratorio para la realización de las prácticas y manejo de equipos. Gracias

Al el Dr. Jesús Atenodoro por haberme ayudado en el desarrollo de la presente residencia profesional, se agradece su asesoría en la implementación de técnicas especializadas y su atención prestada. Gracias.

Al el Dr. Oscar del Ángel Coronel por permitirme usar su laboratorio, sus asesorías y sobre todo la paciencia que me tuvo durante mi aprendizaje.

A mis compañeros de tesis, Jonathan Velásquez Flores y Dora Linda Hernández por acompañarme y formar un equipo para poder desarrollar de manera correcta la presente investigación.

Dedicatorias

A Dios por darme salud, fuerza y capacidad para llevar a cabo este trabajo, así mismo por haber puesto personas que influyeron positivamente en mi preparación Académica.

A mis padres Lucio y Vicenta por motivarme a seguir adelante, por creer en mí y respaldarme en cada decisión tomada.

A mi abuelita Paz quien siempre me apoyó, alentó, preocupó y motivó a ser mejor persona, sé que desde el cielo me cuidas y estás orgullosa de mí. Te amo

A mi novia Alma Nohemí, por su apoyo y haber demostrado su confianza en mí durante la etapa de residencias.

RESUMEN

Elaborado por Eduardo García Ameca

Dirigido por: Dra. Noemí Nava Valente

Co dirigido por: Dr. Luis Antonio López Escobar

La contaminación de cuerpos acuíferos representa un gran problema actualmente, pues no solo deteriora el medio ambiente, sino también es fuente de vectores y propicia de diferentes enfermedades. Actualmente el municipio de Huatusco, Ver. carece de un sistema de tratamiento de aguas residuales urbanas, en cambio, el agua residual urbana es desechada a cielo abierto en ríos. Tomando en consideración el actual problema del inexistente control sobre el manejo y disposición final del agua residual, surge como solución el empleo de *Lemna Minor*. La *Lemna Minor* es un tipo de lenteja marina, conocida por ser plaga en lagos y estanques con bajos niveles de turbulencia, sin embargo, diferentes investigaciones en torno a ella, han demostrado su capacidad de absorción de materia orgánica, lo cual la convierte en una útil herramienta en la biorremediación de agua residual.

El objetivo de la presente investigación fue evaluar la eficiencia de remoción de DQO presente en aguas residuales domesticas mediante el uso de *Lemna Minor*. Así mismo se discute su potencial como una especie adecuada para realizar ensayos de biorremediación en el municipio de Huatusco, Ver.

Para alcanzar el objetivo planteado, se formularon las siguientes etapas metodológicas: 1.- Obtención de *Lemna Minor* y muestreo, 2.-Proliferación de *Lemna Minor*, 3.- Caracterización del agua residual, 4.- Biorremediación con *Lemna Minor*.

Se ejecutó un experimento tipo batch durante 30 días, con volumen útil de 350 mL en recipientes de polietileno, con una agitación constante de 35 RPM a temperatura ambiente. Se evaluó el tratamiento de agua residual con un proceso de sedimentación previo y sin proceso de sedimentación mediante el uso de un cono imhoff previo a tratarla con *Lemna Minor*. El número inicial de *lemnas* en el proceso fue de 25 para cada recipiente.

Posteriormente se observaron 3 aspectos; tasa de reproducción de *Lemna Minor*, DQO y pH. Al finalizar el desarrollo del experimento batch, se encontró que el promedio de pH fue de 7.5 y presento un ascenso hasta alcanzar un promedio de 8.5, por lo cual está dentro del rango permitido en la NOM-001-SEMARNAT-1996. En cuanto al nivel de DQO se observó que el uso de *Lemna Minor* como agente biorremediador de efluentes contaminados presenta una eficiencia de remoción

de hasta 36% en un lapso de 30 días, pues el promedio de entrada fue de 3,200 mg/L y el promedio de salida a los 30 días fue de 1,800 mg/L. mientras tanto al análisis de la tasa de reproducción se presentó una tasa bruta de crecimiento del 116%.

Finalmente, a partir de los resultados obtenidos por medio de la ejecución de la técnica de biorremediación, la *Lemna Minor* se presenta como una alternativa para contrarrestar los efectos de la contaminación, como fue posible observar en la fase experimental. La *Lemna Minor* es conocida como una plaga de rápido crecimiento y adaptabilidad, sin embargo, cuando es utilizada como agente biorremediador la concentración de DQO se ve atenuada.

Palabras clave: Agua residual, Biorremediación, Contaminación, *Lemna Minor*

ABSTRAC

Eduardo García Ameca

División de Ingeniería Ambiental

Instituto Tecnológico Superior de Huatusco

The contamination of aquifers represents a great problem today, since it not only deteriorates the environment, but is also a source of vectors and a source of different diseases. Currently the municipality of Huatusco, Ver. Lacks an urban wastewater treatment system, and instead, urban wastewater is discharged into the open air in rivers. Based on the current problem of non-existent control over the management and final disposal of wastewater, the use of *Lemna Minor* arises as a solution. *Lemna Minor* is a type of sea lentil, known to be a pest in lakes and ponds with low levels of turbulence, however, different investigations around it have shown its ability to absorb organic matter, which makes it a useful tool in wastewater bioremediation.

The objective of this research was to evaluate the removal efficiency of DQO present in domestic wastewater through the use of *Lemna Minor*. Likewise, its potential as a suitable species to carry out bioremediation tests in the municipality of Huatusco, Ver.

To achieve the proposed objective, the following methodological stages were formulated: 1.- Obtaining *Lemna Minor* and sampling, 2.-Proliferation of *Lemna Minor*, 3.-Characterization of waste water, 4.- Bioremediation with *Lemna Minor*.

A batch type experiment was run for 30 days, with a useful volume of 350 mL in polyethylene containers, with a constant stirring of 35 rpm at room temperature. The wastewater treatment was evaluated with a previous sedimentation process and without a sedimentation process by using a imhoff cone prior to treating it with *Lemna M*. The initial number of *Lemna* in the process was 25 for each container.

Later, 3 aspects were observed; *Lemna Minor* reproduction rate, DQO and pH. At the end of the development of the batch experiment, it was found that the average pH was 7.5 and presented a rise until reaching an average of 8.5, which is why it is within the range allowed in NOM-001-SEMARNAT-1996. Regarding the DQO level, it was observed that the use of *Lemna M*. as a bioremediation agent for contaminated effluents presents a removal efficiency of up to 36% in a period of 30 days, since the average input was 3200 mg / L and the average output at 30 days was 1800 mg / L. meanwhile, the analysis of the reproduction rate showed a gross growth rate of 116%. Finally, from the results obtained through the execution of the bioremediation technique, *Lemna Minor* is presented as an alternative to counteract the effects of contamination, as can be observed

in the experimental part. *Lemna Minor* is known as a rapidly growing and adaptable pest, however, when it is used as a bioremediation agent, the DQO concentration is attenuated.

Key words: Residual wáter, Biorremediation, Pullutants, *Lemna Minor*

INDICE GENERAL

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN	1
JUSTIFICACIÓN	Error! Bookmark not defined.
OBJETIVOS.....	Error! Bookmark not defined.
HIPÓTESIS.....	Error! Bookmark not defined.
CAPITULO I	
MARCO TEORICO.....	6
1,1 AGUAS RESIDUALES EN MEXICO	6
1.2 AGUAS RESIDUALES EN VERACRUZ	6
1.3 AGUAS RESIDUALES EN EL MUNICIPIO DE HUATUSCO, VER.....	7
1.4 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN MEXICO.....	7
1.5 PROCESOS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL	8
1.5.1 Biorreactor de membrana sumergible	8
1.5.2 Lodos activados	9
1.5.3 Degradación a partir de lombrices.....	Error! Bookmark not defined.
1.5.4 Degradación a partir de microorganismos	Error! Bookmark not defined.
1.5.5 Humedales.....	Error! Bookmark not defined.
1.5.6 Plantas acuáticas en el tratamiento de aguas residuales	Error! Bookmark not defined.
1.6 USOS DE <i>LEMNA MINOR</i>	Error! Bookmark not defined.
1.6.1 Alimento para animales	Error! Bookmark not defined.
1.6.2 Tratamiento de aguas residuales.....	Error! Bookmark not defined.
1.6.3 Ensayos de toxicidad	Error! Bookmark not defined.
1.7 CARACTERISTICAS DE <i>LEMNA MINOR</i>	Error! Bookmark not defined.
1.7.1 Distribución geografica.....	Error! Bookmark not defined.
1.7.2 Características del hábitat	Error! Bookmark not defined.

1.7.3 Requerimientos de <i>Lemna Minor</i>	Error! Bookmark not defined.
1.7.4 Ventajas y desventajas de <i>Lemna Minor</i>	Error! Bookmark not defined.
1.7.5 Relaciones interespecificas	Error! Bookmark not defined.
1.8 CONTROL.	Error! Bookmark not defined.
1.8.1 Control mecánico.....	Error! Bookmark not defined.
1.8.2 Control biológico.....	Error! Bookmark not defined.
CAPITULO II	
ANTECEDENTES	18
CAPITULO III	
METODOLOGÍA	Error! Bookmark not defined.
3.1 ETAPA 1 OBTENCIÓN LA LENTEJA MARINA <i>LEMNA MINOR</i> ...	Error! Bookmark not defined.
3.2 ETAPA 2 PROLIFERACIÓN DE <i>LEMNA MINOR</i>	Error! Bookmark not defined.
3.3 ETAPA 3 CARACTERIZACIÓN DE AGUA RESIDUAL. ..	Error! Bookmark not defined.
3.4 ETAPA 4 BIORREMEDIACIÓN DE AGUA RESIDUAL....	Error! Bookmark not defined.
CAPITULO IV	
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	Error! Bookmark not defined.
4.1 ETAPA 1 OBTENCIÓN LA LENTEJA MARINA <i>LEMNA MINOR</i> ...	Error! Bookmark not defined.
4.2 ETAPA 2 PROLIFERACIÓN DE <i>LEMNA MINOR</i>	Error! Bookmark not defined.
4.3 ETAPA 3 CARACTERIZACIÓN DE AGUA RESIDUAL.	30
4.4 ETAPA 4 BIORREMEDIACIÓN DE AGUA RESIDUAL.....	31
CONCLUSIÓN	41
ANEXOS	
BIBLIOGRAFIA	

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.0. Características del medio de <i>Lemna Minor</i>	16
Tabla 1.1. Ventajas y desventajas de <i>Lemna Minor</i>	16
Tabla 3.0. Especificaciones de parámetros evaluados	22
Tabla 3.1. Datos de entrada y salida de agua tratada con <i>Lemna Minor</i>	27
Tabla 4.0. Monitoreo del desarrollo de la técnica de biorremediación y proliferación de <i>Lemna Minor</i>	28
Tabla 4.1. Caracterización de agua cruda del municipio de Huatusco, Ver. y límites permisibles de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996.....	30
Tabla 4.2. Caracterización final del agua residual tratada sin tratamiento primario de sedimentación	39
Tabla 4.3. Caracterización final del agua residual tratada con tratamiento primario de sedimentación	39
Tabla 4.4. Frecuencia de muestreos en municipios de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996	40

INDICE DE FIGURAS

Figura 3.0. Metodología para la investigación de <i>Lemna Minor</i> como agente biorremediador de aguas residuales urbanas	22
Figura 4.0. Desarrollo de las unidades experimentales en torno al tiempo transcurrido	29
Figura 4.1. Disminución de DQO en mg/L con relación al tiempo en días	32
Figura 4.2. Porcentaje de eficiencia de remoción de DQO con relación al tiempo en días.....	33
Figura 4.3. Desarrollo de pH durante la técnica de biorremediación con <i>Lemna Minor</i>	34
Figura 4.4. Número de unidades de <i>Lemna Minor</i> con relación al tiempo en días.....	36
Figura 4.5. Porcentaje de crecimiento de <i>Lemna Minor</i> con relación al tiempo en días.....	37
Figura 4.6. Sedimentación del medio (agua residual) previo a la ejecución de la técnica de biorremediación	38

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la población presenta una estrecha relación al impacto ambiental, especialmente sobre los cuerpos de agua, debido al manejo inadecuado de las aguas residuales de origen industrial, agrícola y urbano, hecho por el cual es necesario promover el desarrollo de tecnologías que ayuden a mejorar la calidad de los efluentes y que al mismo tiempo sean adecuadas al contexto socioeconómico del país (Carrasquero, 2002). La contaminación de origen industrial es la mayor fuente de contaminación de las aguas. Sin embargo, la contaminación de agua a causa de actividades antropogénicas es de un 47 % según datos del INEGI en el año 2017. Existe ciertas sustancias en los cuerpos de agua que se encuentran suspendidos ahí de forma natural, tales como lo son nutrientes, nitrógeno y fosforo, los cuales son necesarios para el desarrollo de la vida marina, sin embargo, cuando estas sustancias presentan una acumulación en exceso pueden representar una amenaza para la biodiversidad, a este fenómeno se le denomina “eutrofización”, y es uno de los procesos de contaminación más importantes de las aguas en lagos, balsas, ríos, embalses, etc. Muchas veces el problema de la eutrofización surge de actividades antropogénicas, las cuales han incrementado significativamente las concentraciones de metales pesados, compuestos químicos y sustancias orgánicas en el ambiente. (Zambrano *et al*, 2013)

En los ambientes contaminados se altera la capacidad de supervivencia de los organismos, lo que afecta la dinámica poblacional de las especies y, por tanto, la estructura y función ecosistémica.

Las plantas acuáticas, denominadas también *macrofitas*, cumplen un papel muy importante en los ecosistemas acuáticos. Brindan directa o indirectamente alimento, protección y un gran número de hábitats para muchos organismos de estos ecosistemas. Muchas de estas plantas son útiles para el ser humano, puesto que sirven de alimento, son materia prima para la industria y se usan en procesos de biorremediación, ya que pueden absorber algunas sustancias disueltas y brindar oxígeno mediante la fotosíntesis. Sin embargo, en algunos cuerpos de agua artificiales podrían crear problemas, porque pueden interferir con el uso que le da el hombre a esa agua al obstruir su flujo o la navegación y al crear ambientes propicios para plagas, enfermedades y vectores que afectan la salud humana. (Cook *et al*, 1974)

Las macrofitas ocupan diversas zonas de los ecosistemas acuáticos. Dentro del grupo de plantas flotantes es frecuente observar en lagunas o en las áreas de flujo lento en ríos y quebradas la planta denominada *Lemna Minor*, conocida comúnmente como lenteja de agua o duckweed. (Roldán, 1992)

En la presente investigación se ejecuta una técnica de biorremediación de agua residual urbana a partir de *Lemna Minor*, con ello, se pretende disminuir el nivel de materia orgánica presente en el agua residual y generar una técnica que sea capaz de cumplir con su propósito y provoque un mínimo impacto al ecosistema.

La presente investigación consta de tres capítulos; durante el capítulo uno, se aborda el marco teórico, en el cual se realiza una investigación en torno a *Lemna Minor*, es decir, se compone de una recopilación de antecedentes, investigaciones previas y consideraciones teóricas en las que se sustenta el presente proyecto de investigación, por consiguiente, brinda el soporte técnico y contextual que se utilizaron para el planteamiento del problema.

En el capítulo dos se plantea la metodología, dentro de este marco se orienta a la creación de un sistema, el cual debe de ser seguido de manera rigurosa para la obtención de conocimiento. La metodología consistió en cuatro etapas, dentro de las cuales son: 1.-Obtención de *Lemna Minor* y muestreo, 2.-Proliferación de *Lemna Minor*, 3.- Caracterización del agua residual, 4.- Biorremediación con *Lemna Minor*.

Finalmente, en el capítulo tres se desarrolla los resultados y su discusión, en esta sección se describen los hallazgos obtenidos y se compara con investigaciones previas, además, en este capítulo se acepta o se rechaza la hipótesis planteada en este trabajo de tesis. En lo esencial se observa la remoción de materia orgánica interpretada como DQO, el crecimiento biológico en relación al número de *Lemna Minor* y la modificación del pH.se plantea entonces una hipótesis en la cual se manifiesta una disminución de materia orgánica presente, y si bien es cierto, parámetros como DQO y pH aún se ubican por arriba del límite permitido en la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Por todo lo anterior, el objetivo del presente trabajo de investigación consistió en evaluar la eficiencia de remoción de DQO presente en aguas residuales domesticas mediante el uso de *Lemna Minor*.

JUSTIFICACIÓN

Actualmente el problema del tratamiento de las aguas residuales ha tomado más importancia, puesto que con la creciente tasa demográfica se necesitan de nuevas tecnologías que sean capaces de atender el problema sin generar otro aunado del mismo. Según datos de CONAGUA (2018) se estima que más de 50 mil millones de personas en zonas rurales, tienen problemas con el abasto de agua, por ello es de vital importancia el crear un sistema que permita el aprovechamiento del agua y recuperar la pureza del agua.

El problema de las aguas residuales va más allá de dar una mala apariencia, pues son un foco de enfermedades, además del gran impacto negativo que generan sobre el medio ambiente, pues también son capaces de penetrar a los mantos freáticos y dar pie a otro nuevo problema.

Las micrófitas acuáticas han sido consideradas por varios autores como una plaga debido a su rápido crecimiento, ya que en ocasiones llegan a invadir lagunas, represas, canales de riego y generan varios problemas, al interrumpir el flujo del agua, propiciar eutrofización y crear ambientes para la crianza de vectores de enfermedades (Zambrano 2013). Sin embargo, si las plantas acuáticas se manejan adecuadamente, su poder de proliferación, capacidad de absorción de nutrientes y bioacumulación de contaminantes del agua las convierten en una herramienta útil en el tratamiento de aguas residuales.

Además, con base en los estudios de remoción de compuestos tóxicos por plantas acuáticas, se pueden considerar estos sistemas de tratamiento como una alternativa ecológica y económicamente viable, tanto para el tratamiento de los efluentes municipales domésticos como industriales.

Kiran (1991), probó cuatro plantas acuáticas (*Eichhorniacrassipes*, *Pistiastratiotes*, *Salvinia rotundifolia* y *Lemna Minor*) y evaluó la remoción de nitrógeno y fósforo. Se demostró el alto potencial de estas plantas acuáticas para la remoción de N y P, reducción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno y la Demanda Química de Oxígeno.

De Souza *et al.* (1999), estudiaron la fitoacumulación de elementos traza Cd (II), Cr (VI), Cu (II), Ni (II), Se (VI) con la especie (*Eichhorniacrassipes* y *Lemna Minor*) con concentraciones en el rango de 0,1 a 10 mg/L en un periodo de 14 días. Para un nivel de concentración de 0,10 mg/L las capacidades de bioacumulación fueron: 1,85 mg Cd/Kg; 1,15 mg Cu/Kg; 0,53 mg Cr/Kg; 0,58 mg Se/Kg y 1,04 mg Ni/Kg. Shaban *et al.* (2005), demostraron que este tipo de plantas pueden remover rápidamente el arsénico del agua.

Desde una perspectiva más general, *Lemna Minor* resulta ser una planta que se caracteriza por su adaptabilidad a diferentes ambientes y condiciones, requiere de poco cuidados y sobre todo gracias a múltiples investigaciones que han surgido en torno a ella, se presenta como un agente biorremediador de diferentes compuestos contaminantes.

Este proyecto pretende evaluar la eficiencia de remoción de materia orgánica presente en aguas residuales domesticas mediante el uso de *Lemna Minor*. Y en base en ello, proponer una alternativa que mediante el uso de *Lemna Minor* como agente biorremediador de solución al problema de aguas residuales en el municipio de Huatusco, todo esto a partir de pruebas experimentales que tengan como objetivo evaluar su eficiencia y eficacia, así como también mantener un control sobre el alga en sus medios de cultivo y proliferación.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar la eficiencia de remoción de materia orgánica expresada como DQO, presente en aguas residuales domesticas mediante el uso de *Lemna Minor*.

Objetivos específicos

- Obtener y caracterizar las aguas residuales domesticas en términos fisicoquímicos.
- Implementar pruebas de proliferación y adaptación de *Lemna Minor* para su uso en pruebas experimentales de remoción de materia orgánica.
- Implementar pruebas experimentales para evaluar la eficiencia de remoción de materia orgánica en las aguas residuales domesticas mediante el uso de *Lemna Minor*.
- Caracterización fisicoquímica de los efluentes tratados con *Lemna Minor*.

HIPÓTESIS

El uso de *Lemna Minor* en sistemas de tratamiento de aguas residuales disminuye el contenido de materia orgánica expresada como DQO presente en aguas residuales domesticas del municipio de Huatusco, Ver.

CAPITULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1. Aguas residuales en México

Se define como agua residual a cualquier cuerpo de agua a la cual se le ha adherido o ha estado en contacto con algún tipo de sustancia que altere o modifique su estructura original.

La descarga de aguas residuales domésticas, industriales, agrícolas y pecuarias sin tratamiento provoca la contaminación de los cuerpos de agua receptores disminuyendo la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, poniendo en riesgo la salud de la población y la integridad de los ecosistemas. (SEMARNAT, 2014)

La descarga de aguas residuales de origen urbano proviene de viviendas, edificios públicos y de la escorrentía urbana que se colecta en el drenaje. Sus principales contaminantes son el nitrógeno y fósforo, compuestos orgánicos, bacterias coliformes fecales, materia orgánica, entre muchos otros (Jiménez, *et al.*, 2010). En México en 2012, los centros urbanos descargaron aproximadamente 7.3 km³ (equivalente a 229.73 m³/s) de aguas residuales. A nivel de entidad federativa, las que en 2012 generaron las mayores descargas de aguas municipales fueron el estado de México (24.22 m³/s), Distrito Federal (21.96 m³/s) y Veracruz (16.08 m³/s), que en conjunto contabilizaron 27.1% del volumen nacional generado. (SEMARNAT, 2014)

1.2. Aguas residuales en Veracruz

Uno de los retos que presenta el estado de Veracruz es el alto porcentaje de municipios sin tratamiento de aguas residuales, que en el caso de la entidad veracruzana es del 76.8 % según el Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegaciones del año 2017 de INEGI. El resultado de este ejercicio indica que, de los 212 municipio veracruzanos, solo 45 cuentan con servicio de tratamiento de aguas residuales municipales; apenas el 21.2 % del total. El estudio realizado durante el año 2016 por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía indica que 163 de los municipios de Veracruz no cuentan con el servicio de tratamiento de aguas residuales municipales, o sea, el 76.8 %; lo que implica que sus aguas sanitarias van a parar a ríos, lagunas o cañadas y esta situación es preocupante tomando en cuenta el enorme impacto negativo que es causado a los ecosistemas naturales. (Barragán, 2018)

1.3. Aguas residuales en el Municipio de Huatusco, Ver.

Huatusco es un Municipio perteneciente al Estado de Veracruz, según datos del INEGI en el municipio llueve aproximadamente 7.8 metros cúbicos de agua al año, además de que tiene una población de 60,674 personas en el año 2016 y una superficie de 2,025 kilómetros cuadrados, sin embargo, el municipio no cuenta con una planta de tratamiento de agua residual y por ende el agua es dirigida a “zanjones” o ríos.

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) se estima que una persona gasta por lo general 250 litros de agua diarios. De acuerdo con la anterior afirmación se estima que Huatusco consume diariamente 15, 168,500 litros de agua.

1.4. Tratamiento de aguas residuales en México

Para la remoción de los contaminantes en las aguas residuales municipales existen diversos procesos de tratamiento. En el país los procesos de tratamiento de aguas residuales municipales incluyen lodos activados, lagunas de estabilización, primario avanzado, lagunas aireadas, filtros biológicos, dual y otros. A través de los sistemas de tratamiento, cada año se remueven cerca de 0.65 millones de toneladas de DBO de los 2 millones de toneladas que se generan. (CONAGUA, 2011)

En 2012 había 2,569 plantas de tratamiento industrial instaladas en el país, de las cuales 2,530 (98.5%) estaban en operación; trataban $60.53 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que equivalía al 80.8% de la capacidad de las plantas en operación. En el caso de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, en ese mismo año había 2,342 plantas en operación, con una capacidad de tratamiento de $140.14 \text{ m}^3/\text{s}$; el caudal tratado en ese año fue de $99.75 \text{ m}^3/\text{s}$, es decir, el 71% de la capacidad instalada. (SEMARNAT, 2014)

Con respecto al caudal municipal tratado, a nivel nacional en 2012 se trató el 43.4% de su caudal generado; esto representó un incremento de 154% respecto a 1998. En el caso de las aguas residuales industriales, en 2012 sólo se trataba el 28.8% del volumen generado; sin embargo, esto representa más del doble de lo que se trataba en 1998. (SEMARNAT, 2014)

A nivel de entidad federativa, existe una variación muy importante en el porcentaje de aguas residuales que reciben tratamiento respecto al caudal generado: en 2012, Aguascalientes y Nuevo León trataron más del 90% del agua residual generada, mientras que entidades como Yucatán, Campeche e Hidalgo trataron menos del 10%. (SEMARNAT, 2014)

En 2012, el agua residual municipal recibió tratamiento principalmente a través de los procesos de lagunas de estabilización y lodos activados (el 55.4% y 14% del total de las plantas, respectivamente), que son de tipo secundario y que tratan cerca del 70% del caudal tratado. El proceso de tratamiento dual (de tipo terciario) sólo está presente en Aguascalientes, Chiapas, Jalisco, estado de México, Querétaro, Quintana Roo y San Luis Potosí (todos estos estados, a excepción de Quintana Roo que tiene 7 plantas, cuentan con sólo una planta en su territorio). En conjunto apenas tratan el 5% de las aguas residuales nacionales tratadas. (SEMARNAT, 2014)

1.5. Procesos de tratamiento de agua residual

El tratamiento de aguas residuales se divide en dos tipos; fisicoquímico y biológico.

En la actualidad se han desarrollado una gran variedad de métodos para el tratamiento de aguas residuales, sin embargo, cada una difiere de las demás a partir de su costo, su eficiencia o su eficacia, entre otras. Por otro lado, la creciente tasa demográfica implica una creciente necesidad de recursos naturales, entre ellos el agua, por lo que es necesario optimizar métodos que permitan el tratamiento de agua de manera que los pozos negros o la destrucción de flora y fauna marina dejen de ser una consecuencia.

A continuación, se presentan algunas de las técnicas desarrolladas para el tratamiento de agua residual.

1.5.1. Birreactor de membrana sumergible

Desde su aparición en el mercado, los biorreactores de membrana sumergidas (MBR) se han convertido en una de las tecnologías más prometedoras para el tratamiento de aguas residuales. Pese a que su empleo se ha visto limitado por el elevado consumo energético o por los problemas de ensuciamiento de membrana, ventajas como la calidad del efluente obtenido, las posibilidades de trabajar a altas concentraciones de SS y los menores requisitos tanto en tiempo como en espacio necesarios para que tengan lugar la depuración, la han convertido en una de las alternativas ampliamente utilizadas en todo el mundo. (Vásquez, 2015)

De forma genérica, los biorreactores de membrana (MembraneBio-Reactor, MBR) pueden ser definidos como sistemas en los que se integra la degradación biológica de los efluentes de aguas residuales con una filtración por membrana (Ciceket *al*, 1998).

Las técnicas biológicas de tratamiento de aguas residuales se vienen usando desde hace más de cien años. De todos los procesos que se han desarrollado para el tratamiento de las aguas residuales el sistema convencional de fangos activados ha sido el más extendido. Por su parte, la tecnología de

membrana, en un principio se mantuvo limitado su uso y solamente se empleaba como tratamiento de afino o para la desalación de agua de mar. El uso de membranas en el tratamiento de las aguas residuales es más reciente y se han empleado en aquellas situaciones donde había requerimientos de vertido rigurosos o donde se pretendía reutilizar el agua depurada. Los factores principales que han limitado el desarrollo de la tecnología de membrana han sido el elevado coste de inversión y de operación. Sin embargo, con la aparición de novedosos módulos de membrana menos costosos y más efectivos junto con el endurecimiento de los requisitos de vertido, la tecnología de membrana ha vuelto a cobrar interés. Son numerosas las vías de investigación que en la actualidad se mantienen abiertas. (Vásquez, 2015)

1.5.2. Lodos activados

En este método partir de lodos activados es un proceso biológico empleado en el tratamiento de aguas residuales convencional, que consiste en el desarrollo de un cultivo bacteriano disperso en forma de floculo en un depósito agitado, aireado y alimentado con el agua residual, que es capaz de metabolizar como nutrientes los contaminantes biológicos presentes en esa agua. La agitación evita sedimentos y homogeniza la mezcla de los flóculos bacterianos con el agua residual. La aireación requerida tiene por objeto suministrar el oxígeno necesario tanto para las bacterias como para el resto de los microorganismos aerobios. El oxígeno puede provenir del aire, de un gas enriquecido en oxígeno o de oxígeno puro. Este proceso puede ser considerado como de un proceso de autodepuración acelerada, reforzada y controlada artificialmente. Los fenómenos que se presentan son exactamente los mismos que en los ríos o lagos naturales, pero en las balsas de aireación los organismos se agrupan apretadamente en un espacio reducido y en gran número. El proceso de depuración se lleva a cabo por los microorganismos, que se desarrollan sobre la materia orgánica, y con la presencia requerida de nutrientes (nitrógeno y fósforo, así como otros oligoelementos). Este proceso biológico requiere de una cantidad determinada de materia orgánica, ya que cantidades excesivas de estos compuestos orgánicos, metales pesados y/o sales pueden inhibirlo o destruirlo; y cantidades reducidas de nutrientes pueden no ser suficientes para mantener el proceso. (Chirinos, 2019)

Un proceso biológico de fangos activos se desarrolla habitualmente en dos cámaras separadas:

Un reactor biológico, tanque agitado, aireado y alimentado con el agua residual, en el que se produce la parte biológica del proceso, y un decantador secundario, tanque en el que sedimenta el fango producido, que es recirculado a la cabecera del tratamiento, y purgada para su eliminación la cantidad producida en exceso.

Estos procesos pueden desarrollarse en un único depósito, actuando alternativamente como reactor y como decantador. Los sistemas de lodo mecánicamente eliminan los sólidos y sedimentos destructivos de su barro, lo que resulta en: la retención de líquidos, reducción el desgaste en el equipo, agitación de barro más eficiente, mantenimiento de limpieza eficiente y un ambiente de trabajo más seguro. (Chirinos, 2019)

1.5.3. Degradación a partir de lombrices

Tratamiento de aguas residuales sin generar contaminantes en este proceso. Para ello, utiliza lombrices de tierra, que gracias a su acción dentro del sistema transforma la contaminación de agua en humus, un abono natural constituido por los excrementos de éstas y que puede usarse como fertilizante lo que, además puede generar un ingreso adicional. Se trata de un proceso de limpieza biológico que emplea una técnica sostenible para las industrias y los municipios que lo utilizan, desde un punto de vista ambiental, económico y técnico. (Aedyr, 2019)

El sistema está recomendado para el uso en la industria alimentaria (lácteos, mataderos, bodegas, etcétera) y también en el caso de pequeños municipios. (Aedyr, 2019)

1.5.4. Degradación a partir de microorganismos

La degradación biológica es un proceso natural mediante el cual la materia orgánica es utilizada por microorganismos para crear nueva biomasa produciendo dióxido de carbono, agua y compuestos nitrogenados como subproductos.

El hombre ha desarrollado sistemas de tratamiento usando microorganismos que están en la naturaleza para neutralizar los residuos tanto de origen doméstico como industrial. Las bacterias en los sistemas de tratamiento de aguas residuales eliminan la materia orgánica (disuelta como en partículas) para transformarla en crecimiento de nuevas células y en subproductos, es decir, son descomponedores primarios. Los microorganismos usados en tratamiento de aguas residuales se seleccionan tanto por su capacidad para aprovechar la materia orgánica como por su capacidad de sedimentación una vez que el proceso de degradación se ha completado, ya que las bacterias y ciertos tipos de protozoos son capaces de aglutinarse formando flóculos que sedimentan fácilmente dando un sobrenadante claro. Las bacterias filamentosas y los hongos pesan poco y su área superficial es grande y por lo tanto sedimentan mal, causando problemas de bulking (espumas). (Bui *et al.* 2002)

Los microorganismos en un sistema biológico de tratamiento de residuos son sensibles a muchos parámetros. Una carga orgánica muy elevada hace que las bacterias del sistema no sean suficientes

para consumir todos los nutrientes existentes, o bien unas temperaturas extremas (frías y calientes) pueden ralentizar el metabolismo de las bacterias de tal manera que la disminución de la DBO no cumpla con los requisitos de vertido del efluente.

1.5.5. Humedales

Los humedales artificiales construidos tienen ventajas respecto de los sistemas de tratamiento alternativos, debido a que requieren poca o ninguna energía para funcionar. Si hay suficiente tierra barata disponible cerca de la instalación de los humedales de cultivo acuático, puede ser una alternativa de costo efectivo. También proporcionan un hábitat para la vida silvestre. La importancia de los humedales ha variado con el tiempo. Los humedales son zonas de transición entre el medio ambiente terrestre y acuático y sirven como enlace dinámico entre los dos. El agua que se mueve arriba y abajo del gradiente de humedad, asimila una variedad de constituyentes químicos y físicos en solución, ya sea como detritus o sedimentos, estos a su vez se transforman y transportan a los alrededores del paisaje. (Sosa, 2015)

Los humedales proveen sumideros efectivos de nutrientes y sitios amortiguadores para contaminantes orgánicos e inorgánicos. Esta capacidad es el mecanismo detrás de los humedales artificiales, para simular un humedal natural con el propósito de tratar las aguas residuales de empresas y municipios. La Solución biotecnológica consiste en la instalación de humedales artificiales que actúan como filtros naturales. Ubicados entre la planta y los recursos acuáticos (ríos, lagos, lagunas), estos sistemas, además de no necesitar mantenimiento ni consumir energía eléctrica, cuestan menos que la cuarta parte de un sistema de tratamiento tradicional. Los humedales se construyen utilizando diferentes especies de plantas que abundan en la zona: totoras, repollitos de agua, camalotes o juncos. (Sosa, 2015)

1.5.6. Plantas acuáticas en el tratamiento de aguas residuales

Los sistemas de plantas acuáticas están en los es tanques poco profundos como plantas acuáticas flotantes o sumergidas. Los sistemas más completamente estudiados son aquellos que usan la lenteja de agua. Estos sistemas incluyen dos tipos basado en tipos de plantas dominantes. El primer tipo usa plantas flotantes y se distingue por la habilidad de estas plantas para derivar el dióxido carbono y las necesidades de oxígenos de la atmósfera directamente. Las plantas reciben sus nutrientes minerales desde el agua. (Sosa, 2015)

El segundo tipo de sistema consiste en plantas sumergidas, se distingue por la habilidad de estas plantas para absorber oxígeno, dióxido de carbono, y minerales de la columna de agua. Las plantas

sumergidas se inhiben fácilmente por la turbiedad alta en el agua porque sus partes fotosintéticas están debajo del agua. (Sosa, 2015)

1.6. Usos de *Lemna Minor*

1.6.1. Alimento para animales

Las plantas acuáticas son un recurso altamente productivo de biomasa con alto valor proteínico y pueden constituirse en un complemento ideal en la alimentación de animales domésticos (Chará 1998).

Si las plantas acuáticas son cultivadas en aguas residuales, pueden ser utilizadas para la alimentación de animales, siempre y cuando las aguas tratadas no contengan sustancias tóxicas, y si éste es el caso, la biomasa obtenida podría utilizarse para producir metano, por medio de la digestión anaerobia. (Olguín *et al*, 1998)

La lenteja de agua alcanza niveles de proteína hasta un 38% de su biomasa. Este contenido proteínico, junto con su alta palatabilidad y su facilidad de suministro, la hace ideal para alimentación de cerdos, aves o ganado. (Chará 1998)

Lemna Minor se ha ensayado como alimento para patos domésticos (duckweed significa maleza para patos) y los resultados en aumento de peso y producción de huevos fueron comparables al suplemento proteínico usual, con la ventaja de presentarse una disminución de un 25% en los costos de alimentación. (Bui *et al*, 2002)

También la lenteja de agua ha sido utilizada en México con el fin de alimentar cerdas gestantes y lechones, reemplazando la proteína proveniente de torta de soya en un 80%, con muy buenos resultados en producción. En Venezuela se usa conjuntamente harina de pescado con *Lemna Minor* y *Azolla filiculoides* en raciones para cerdos. (Chará 1998)

1.6.2. Tratamiento de aguas residuales

Las microfitas acuáticas han sido consideradas por varios autores como una plaga debido a su rápido crecimiento, ya que en ocasiones llegan a invadir lagunas, represas, canales de riego y generan varios problemas, al interrumpir el flujo del agua, propiciar eutrofización y crear ambientes para la crianza de vectores de enfermedades (Zambrano 1974, Cook *et al*. 1974). Sin embargo, si las plantas acuáticas se manejan adecuadamente, su poder de proliferación, capacidad de absorción de

nutrientes y bioacumulación de contaminantes del agua las convierten en una herramienta útil en el tratamiento de aguas residuales.

Además, con base en los estudios de remoción de compuestos tóxicos por plantas acuáticas, se pueden considerar estos sistemas de tratamiento como una alternativa ecológica y económicamente viable, tanto para el tratamiento de los efluentes municipales domésticos como industriales. En la fábrica de Imusa S.A., localizada en el municipio de Rio negro (Antioquia), se tienen operando desde 1988 unos canales sembrados con *Eichhorniacrassipes* (Jacinto de agua); se ha comprobado una eficiencia de remoción de los diferentes contaminantes que alcanza más de 97% en los metales pesados y hasta el 98% en sólidos suspendidos (Roldán 2002).

Según Olguín y Hernández (1998), las características que deben contar las plantas acuáticas usadas para el tratamiento de las aguas residuales son las siguientes: alta productividad, alta eficiencia de remoción de nutrientes y contaminantes, alta predominancia en condiciones naturales adversas y fácil cosecha. *Lemna Minor* cumple con todas estas características y gracias a esto ha sido empleada en sistemas de descontaminación de aguas.

Chará (1998) describe uno de estos sistemas de tratamiento de aguas residuales provenientes de granjas porcinas. El sistema está constituido por un biodigestor, seguido de un canal de sedimentación, un canal con *Eichhorniacrassipes*, por último, un canal con *Lemna Minor*. Pedraza (1997), citado por Chará (1998), reporta una disminución en la demanda bioquímica de oxígeno de 247 a 149 mg/l y una reducción en los sólidos suspendidos totales de 214 a 58 mg/l en una granja porcina en el Valle del Cauca utilizando este sistema de tratamiento.

La capacidad de remoción de fosfatos fue estudiada en condiciones de laboratorio por Obek y Hasar (2002) quienes encontraron que *Lemna* puede remover ortofosfato eficientemente si se cosecha frecuentemente. Encontraron que la concentración inicial de 15 mg/l fue reducida a 0,5 mg/l al final de un período de 8 días.

Zayed (1998) investigó el potencial de la lenteja de agua para acumular cadmio, cromo, cobre, níquel, plomo y selenio. Los resultados demostraron que, en condiciones experimentales de laboratorio,

La planta resultó ser un buen acumulador de Cd, Se y Cu, un acumulador moderado de Cr y pobre acumulador de Ni y Pb. Las concentraciones más altas de cada elemento acumulada en los tejidos de la lenteja de agua fueron de 13.3 g Cd / kg, 4.27 g Se / kg, 3.36 g Cu / kg, 2.87 g Cr / kg, 1.79 g Ni / kg y 0.63 g Pb / kg. Se concluye en el estudio que la lenteja de agua tiene un buen potencial para la remoción de cadmio, selenio y cobre de aguas residuales contaminadas con estos elementos,

ya que puede acumular concentraciones altas de ellos. Su rápido crecimiento la hace una planta apropiada para actividades de fitorremediación.

La principal ventaja de los sistemas de tratamiento con plantas acuáticas es su bajo costo de construcción y mantenimiento, así como su simplicidad de operación. Además, se utiliza un recurso disponible, hasta ahora no aprovechado en muchos lugares y que puede tener diversos usos (Olguín y Hernández 1998).

Una de las desventajas de esta tecnología es que se requiere un área considerable para la construcción de los canales. Adicionalmente, se necesita instalar plantas piloto para evaluar variables de diseño específicas para cada región, cada planta y cada tipo de efluente.

1.6.3. Ensayos de toxicidad

Un ensayo de toxicidad es un método que permite evaluar el potencial tóxico de una sustancia sobre un organismo vivo. Estos ensayos son útiles para identificar el efecto que diferentes concentraciones de un contaminante específico puedan tener sobre las especies presentes en un ecosistema. Entre estas sustancias químicas se pueden citar plaguicidas, detergentes y metales pesados usados en diversas actividades humanas, vertidos al suelo o directamente a los cuerpos de agua. (Arroyave, 2004)

Por la importancia que representa el análisis de la manera como la contaminación puede afectar los productores primarios, se han realizado pruebas de sensibilidad hacia 16 herbicidas, compuestos por nueve clases de químicos. Fairchild *et al.* (1997) compararon la sensibilidad de *Lemna Minor* con la del alga *Selenastrum Capricornutum*. Los resultados obtenidos fueron variables, y pudo determinarse que ambas especies son altamente sensibles a las *triacinas*, las *sulfonureas* y las *piridinas*.

Otros estudios relacionados con el mismo tema han indicado que *Lemna Minores* ideal para el estudio de la toxicidad acuática, porque tales plantas son de fácil recolección y cultivo. *Lemna* ha resultado ser un buen organismo para utilizar en bioensayos, porque la prueba de inhibición del crecimiento es simple, sensible y económica. Este tipo de análisis ha sido recomendado por las agencias estatales de los Estados Unidos y por la Organización Internacional para la Cooperación y el Desarrollo Económico, que han afirmado que la lenteja de agua es más sensible a los herbicidas y a los metales pesados que a los productos químicos industriales (EPA, 1996).

1.7. Características de *Lemna Minor*

Lemna Minor es una planta angiosperma (plantas con flores), *monocotiledónea*, perteneciente a la familia *Lemnaceae*. Su cuerpo vegetativo corresponde a una forma tabloide, es decir, en la que no se diferencian el tallo y las hojas. Consiste en una estructura plana y verde y una sola raíz delgada de color blanco.

Según Cook y Gut (1974) el talo ha sido interpretado de diversas maneras: un tallo modificado, una hoja o como parcialmente tallo y hoja. Otros autores consideran que el talo corresponde a una hoja modificada que cumple las funciones del tallo, la hoja y el eje florífero (Instituto Gallach, 1984). Su tamaño es muy reducido, alcanzando de 2 a 4 mm de longitud y 2 mm de ancho. Es una de las especies de angiospermas más pequeñas que existen en el reino de las plantas. En la misma familia de la lenteja de agua se encuentra *Wolffia*, reportada como la planta con flores de tamaño más reducido que existe en la Tierra; su cuerpo mide sólo 0,6 mm de largo y 0,2 mm de ancho, y su fruto, que es el más pequeño del planeta, mide sólo 0,3 mm de largo y pesa 70 mg (Armstrong 1996). La lenteja de agua es una planta monoica, con flores unisexuales. Las flores masculinas están constituidas por un solo estambre y las flores femeninas consisten en un pistilo formado por un solo carpelo. El periantio está ausente. Las flores nacen de una hendidura ubicada en el borde de la hoja, dentro de una bráctea denominada espata, muy común en las especies del orden arales. El fruto contiene de 1 a 4 semillas (Armstrong 2003, Instituto Gallach, 1984). La forma más común de reproducción es la asexual por gemación. En los bordes basales se desarrolla una yema pequeña que origina una planta nueva que se separa de la planta progenitora (Instituto Gallach 1984). Sin embargo, es común encontrar las plantas agregadas formando grupos de 2 a 4 individuos.

1.7.1. Distribución geográfica

Es una planta con distribución universal. Se ha encontrado en varias regiones de los hemisferios norte y sur, incluyendo América, Europa, Asia, Australia y Nueva Zelanda. Se encuentra principalmente en charcos de agua dulce, ciénagas, lagos y ríos calmados (Armstrong 2003).

De acuerdo con Roldán (1992), *L. minores* una planta acuática flotante de rápido crecimiento y de amplia distribución tropical y subtropical, que se desarrolla principalmente en lagunas.

1.7.2. Características del hábitat

La planta puede desarrollarse en un rango amplio de temperaturas, que varía entre 5° y 30°C, con un crecimiento óptimo entre los 15° y 18°C. Se adapta bien a cualquier condición de iluminación. Crece rápidamente en partes calmas y ricas en nutrientes, con altos niveles de nitrógeno y

fosfatos. Con frecuencia el hierro es un elemento limitante para su adecuado desarrollo. Pueden además tolerar un rango de pH amplio, siendo el óptimo entre 4,5 y 7,5 (Rook 2002).

1.7.3. Requerimientos de *Lemna Minor*

A continuación, se presentan las características básicas que se deben de considerar en el medio el cual contendrá la *Lemna Minor*.

Tabla 1.0. Características del medio de *Lemna Minor*. Fuente: Rook, 2002

Dureza	La dureza tampoco es algo que le importe realmente a esta pequeña planta. Se adapta bien tanto a aguas blandas como duras. Es decir el rango de tolerancia va desde los 3 – 15 °dH.
pH	Pueden además tolerar un rango de pH amplio, siendo el óptimo entre 4,5 y 7,5
Iluminación	Este parámetro es el más delicado. La lenteja de agua, necesita una iluminación intensa. Ser una planta flotante le permite gozar de ventaja por el sol respecto a otras competidoras.
Posición y cuidados	En el acuario o estanque prefieren las zonas tranquilas, de poca corriente o estancadas dado que la corriente haría que la planta se volteara constantemente dificultando así su desarrollo. Sobre el abonado, no es necesario un abonado extra, eso sí se llega a notar la falta de hierro debido a sus escasas reservas y a su rápido crecimiento. Para saber que les falta hierro, vas a verlas amarillear.

1.7.4. Ventajas y desventajas de *Lemna Minor*

A continuación, se presentan las ventajas y las desventajas que estas conllevan.

Tabla 1.1. Ventajas y desventajas de *Lemna Minor*. Fuente: Rook, 2002

Ventajas	Desventajas
Dan cobijo a los especies de herbívoros que buscan protección entre ellas. Proporcionan valor estético. Eliminan compuestos nitrogenados. Mantienen más limpia el agua.	Es considerada por muchos como una plaga molesta. Reduce la iluminación dificultando el crecimiento al resto de las plantas acuáticas, por ejemplo a la <i>Limnophila Sessiflora</i> .

Reducen la intensidad lumínica. Peces de aguas oscuras se ven beneficiados al igual que plantas de bajos requerimientos lumínicos como las <i>anubias</i>, las cuales pertenecen a una familia de plantas acuáticas, usualmente utilizadas en estanques y acuarios. Los peces herbívoros del estanque disfrutan devorándolas. Reducen la cantidad de algas en el medio.	Absorbe nutrientes destinados a otras plantas del acuario
--	--

1.7.5. Relaciones interespecíficas

Dado que es una especie flotante y de buen crecimiento, puede cubrir rápidamente la superficie de los cuerpos de agua donde se encuentra e impedir el paso de la luz inhibiendo el crecimiento de otros organismos fotosintéticos.

Al respecto, Parr *et al.* (2002), en un estudio sobre el efecto de dos especies de *Lemna* (*L. Minor* *L. Minuscula*) sobre la eficiencia fotosintética del alga *Cladophoraglomerata*, encontraron que la presencia de *Lemna* estimulo la eficiencia fotosintética hasta un 42%, y el oxígeno disuelto fue menor en los tratamientos con *Lemna* y *Cladophora* que cuando estaba *Cladophorasola*. Esto se explica por la reducción en la intensidad lumínica disponible para la actividad fotosintética del alga. Por esto, la cobertura de plantas flotantes como *Lemna Minor* reduce las probabilidades de que se presente la proliferación de algas y los consecuentes procesos de eutrofización en cuerpos de agua lenticos. Sin embargo, si se permite un crecimiento excesivo de la planta se pueden generar problemas de eutrofización, por lo tanto, es importante implementar medidas de control.

Adicionalmente, la inhibición del crecimiento de algunas microfitas sumergidas o emergentes por parte de las plantas flotantes (tales como *Lemna spp* y *Salvinia spp*) puede ser considerado como una ventaja en canales profundos, ya que inhibe el crecimiento de plantas sumergidas que impiden la navegación. (Roldán 1992)

1.8. Control

Dado que algunas plantas acuáticas se pueden convertir en plagas, se han reportado diferentes medidas de control a las poblaciones de estas especies. A continuación, se describen los métodos de control que pueden ser aplicados a plantas como *Lemna Minor*.

1.8.1. Control mecánico

Consiste en la remoción y corte por medios mecánicos de colonias y grupos pequeños de plantas con utilización de rastrillos especiales y aparatos cortadores colocados en botes. (Arroyave, 2004)

A este método se le puede señalar la desventaja de que la alteración ocasionada por la remoción causa estragos en otras poblaciones de organismos, sobre todo de animales, y es posible que haya necesidad de repetir el tratamiento con mucha frecuencia, lo que hace el método poco económico. Adicionalmente, es un método que sólo puede aplicarse en áreas pequeñas o medianas. (Roldán, 1992)

1.8.2. Control biológico

Actualmente se está experimentando el control de malezas mediante herbívoros acuáticos en diferentes centros de investigación. Entre los animales utilizados se encuentran los peces, los moluscos y los mamíferos. El valor real de este método depende de la tasa de crecimiento de las malezas y del número y tasa de crecimiento de los animales introducidos. (Zambrano, 1974)

CAPITULO 2

ANTECEDENTES

La lenteja de agua o como es llamada por su nombre científico *Lemna Minor* es una especie de alga marina de pequeño tamaño pero que debido a que es capaz de adaptarse a una gran variedad de ambientes es considerada una plaga. Existen empresas las cuales se dedican a comercializar la *Lemna* como alimento pollino puesto que es alta en contenido proteico. La *Lemna Minor* es una planta muy versátil, su dieta está basada sobre todo en la remoción de nitritos, nitratos y sulfatos disueltos en el agua. (Quintana, 2012)

Muhammad (2019) lleva a cabo una investigación centrada en la fitorremediación de azul de metileno usando *Lemna Minor* a partir de la cual llega a la conclusión de que la eliminación de azul de metileno (MB) por *Lemna Minor* se ve significativamente afectada por el tiempo de contacto.

Lemna Minor mostró un aumento significativo de remoción de $3.27 \pm 0.08 \text{ \AA}$ a $0.64 \pm 0.02 \text{ \AA}$ después de 24 h. La observación física mostró una clara indicación de biodecoloración por *Lemna M.* después de 24 h de exposición al tinte. El análisis de espectros UV / Vis también ilustró la disminución de la absorbancia de MB a lo largo de las 24 h del período de prueba y mostró hasta $80.56 \pm 0.44\%$ de decoloración. La decoloración de MB por *Lemna Minor* aumentó con el aumento del tiempo de exposición. Nuestros hallazgos sugieren que *Lemna Minor* tiene el potencial de ser utilizado como agente de fitorremediación en el tratamiento de aguas residuales contaminadas con colorantes. Un estudio adicional relacionado con diferentes tipos de tintes, la combinación de diferentes plantas acuáticas y la exposición prolongada al tiempo contribuirán en gran medida al conocimiento sobre la fitorremediación de aguas residuales contaminadas con colorantes.

Ferley (2015) realiza una comparación de las características poblacionales de *Lemna minuta* (ARACEAE: LEMNOIDEAE) en tres medios de cultivo con la cual encuentra *L. minuta* es una especie adecuada como organismo de prueba para la realización de ensayos de toxicidad acuática, debido a su constante tasa de crecimiento, producción de frondas, y tiempo de duplicación en condiciones de laboratorio. Se resalta la necesidad de verificar las condiciones adecuadas para la obtención de monocultivos, al controlar parámetros ambientales como los aquí presentados y que los cultivos se desarrollen con el medio HE+ sin sustancias orgánicas, durante un período de tiempo mayor a dos meses, para poder estabilizar y obtener tasas de crecimiento mayores.

Mortero (2012) realiza una revisión de las micrófitas y su propiedad para la remoción de contaminantes en el agua con la cual llega a la conclusión Existe un amplio espectro de aplicaciones encontradas en la literatura que hacen referencia a las micrófitas flotantes como sistemas naturales para el tratamiento de aguas residuales. La mayoría ha demostrado eficiencias de remoción significativamente altas en todos los constituyentes de las aguas residuales, siendo el Jacinto de agua la especie de mayor uso. Los criterios de diseño empleados en sistemas con micrófitas flotantes difieren dependiendo de qué modelo pueda ser empleado; sistema con especies flotantes; filtro de micrófitas en flotación; o humedales de tratamiento flotante con micrófitas emergentes. Los retiros periódicos de las plantas son un requerimiento necesario para optimizar la eficiencia de remoción, que puede convertirse en una limitación para el proceso, si no se tiene una disposición adecuada de la cosecha. Las perspectivas para el desarrollo de esta técnica, plantean que se requiere orientar esfuerzos científicos para entender y potenciar los mecanismos de depuración de estas especies.

Arenas *et al* (2011) realizan una evaluación de planta *Lemna Minor* como biorremediadora para aguas contaminadas con mercurio, en su investigación encuentran que la eficiencia de la planta para

remover Mercurio del agua fue del 30 %; por lo que puede afirmarse que la planta es eficiente para remover dicho elemento del agua. La cantidad del mercurio faltante en el balance de masa y la disminución de las concentraciones en grupo control sin *Lemna Minor*, evidencian pérdidas por evaporación, fitovolatilización y precipitación. El periodo de máxima eficiencia de remoción de la *Lemna Minor* ocurre durante los primeros 6 días. Las concentraciones de mercurio en el agua afectan la absorción de potasio en la planta. Las concentraciones de N y P foliar no son afectadas por los niveles de mercurio utilizados en el ensayo. El método diseñado para la determinación de mercurio resultó exacto y preciso, y con la sensibilidad adecuada para monitorear ensayos de biorremediación. La concentración final de mercurio en la *Lemna Minor* se ubicó en 40 µg por cada gramo de peso seco, del material vegetal. La planta *Lemna Minor* puede utilizarse como una herramienta efectiva, sencilla y económica en los procesos de descontaminación del agua con niveles tóxicos de mercurio.

Córdoba y Mendiola (2010) realizan una investigación orientada a la utilización de la lenteja marina para la producción de tilapia, a partir de los resultados concluyen que son varios los factores que limitan la utilización de la lenteja de agua en como única fuente de alimento, por ejemplo, la deficiencia de histidina y metionina, presencia de factores anti nutricionales, alto contenido de humedad y las bolsas de aire contenidas en la fronda, que limitan el consumo de materia seca, por lo que no es recomendable la utilización como dieta única. Sin embargo, cuando es utilizada como tal, la tasa de alimentación apropiada no debe exceder el 6% del peso corporal (base seca), obteniéndose mejores resultados cuando se utiliza los géneros *Lemna spp.* O *Wolffia spp* debido al menor contenido de fibra que *Spirodela*. La utilización en policultivos en sistemas extensivos, es una opción viable para complementar la dieta con plancton, aportando proteína de excelente calidad, incrementando la producción alrededor de 30%. Investigaciones concernientes a la utilización como parte integral de la dieta, a niveles de 5- 30%, sustituyendo parcialmente a la torta de soja u otra fuente de proteína vegetal, han demostrado mejores resultados, como consecuencia del aporte aminoácido a la dieta, principalmente en crías y juveniles de tilapia.

Arroyave (2004) realiza una investigación acerca de la capacidad que tiene la *Lemna Minor* para cubrir ciertos requerimientos alimenticios y conocer si es un alimento balanceado. En el estudio encuentra que la lenteja de agua alcanza niveles de proteína hasta un 38% de su biomasa. Este contenido proteínico, junto con su alta palatabilidad y su facilidad de suministro, la hace ideal para alimentación de cerdos, aves o ganado. Además de que en México la lenteja también ha sido utilizada con el fin de alimentar cerdas gestantes y lechones, reemplazando la proteína proveniente

de torta de soya en un 80%, con muy buenos resultados en producción. En Venezuela se usa conjuntamente harina de pescado con *Lemna Minor* y *Azolla filiculoides* en raciones para cerdos.

Díaz (2003) en su trabajo de investigación; Producción de biomasa de la lenteja de agua (*Lemna Minor*), fertilizada con estiércol de ovinos, concluye que la *Lemna Minor* aumenta su producción de biomasa al aplicar fertilizante orgánico, encontrando el mayor crecimiento con 20 g. Así mismo, triplica su biomasa en 7 días cuando se adicionan a la micro laguna 30 g de material vegetativo y se fertiliza; sin embargo, al utilizar menor cantidad de material vegetativo (5 g) el crecimiento es más acelerado, probablemente, porque el área del espejo de agua y la cantidad de nutrientes es proporcionalmente mayor.

Según Olguín y Hernández (1998), las características que deben contar las plantas acuáticas usadas para el tratamiento de las aguas residuales son las siguientes: alta productividad, alta eficiencia de remoción de nutrientes y contaminantes, alta predominancia en condiciones naturales adversas y fácil cosecha. *Lemna Minor* cumple con todas estas características y gracias a esto ha sido empleada en sistemas de descontaminación de aguas.

Chará (1998) describe uno de estos sistemas de tratamiento de aguas residuales provenientes de granjas porcinas. El sistema está constituido por un biodigestor, seguido de un canal de sedimentación, un canal con *Eichhornia crassipes* y, por último, un canal con *Lemna Minor*. Pedraza (1997), citado por Chará (1998), reporta una disminución en la demanda bioquímica de oxígeno de 247 a 149 mg/l y una reducción en los sólidos suspendidos totales de 214 a 58 mg/l en una granja porcina en el Valle del Cauca utilizando este sistema de tratamiento.

Zayed (1998) investigó el potencial de la lenteja de agua para acumular cadmio, cromo, cobre, níquel, plomo y selenio. Los resultados demostraron que, en condiciones experimentales de laboratorio, la planta resultó ser un buen acumulador de Cd, Se y Cu, un acumulador moderado de Cr y pobre acumulador de Ni y Pb. Las concentraciones más altas de cada elemento acumulada en los tejidos de la lenteja de agua fueron de 13,3 g Cd / kg, 4,27 g Se / kg, 3,36 g Cu / kg, 2,87 g Cr / kg, 1,79 g Ni / kg y 0,63 g Pb / kg. Se concluye en el estudio que la lenteja de agua tiene un buen potencial para la remoción de cadmio, selenio y cobre de aguas residuales contaminadas con estos elementos, ya que puede acumular concentraciones altas de ellos. Su rápido crecimiento la hace una planta apropiada para actividades de fitorremediación.

CAPITULO 3

METODOLOGIA

En el presente proyecto de investigación se evaluaron diversos parámetros biológicos, físicos y químicos de agua residual, todo con el fin de cumplir con los lineamientos de la norma NOM-001-SEMARNAT-1996.

Para cumplir con los objetivos planteados, se estructuro un plan de trabajo, el cual consistió en 4 etapas:

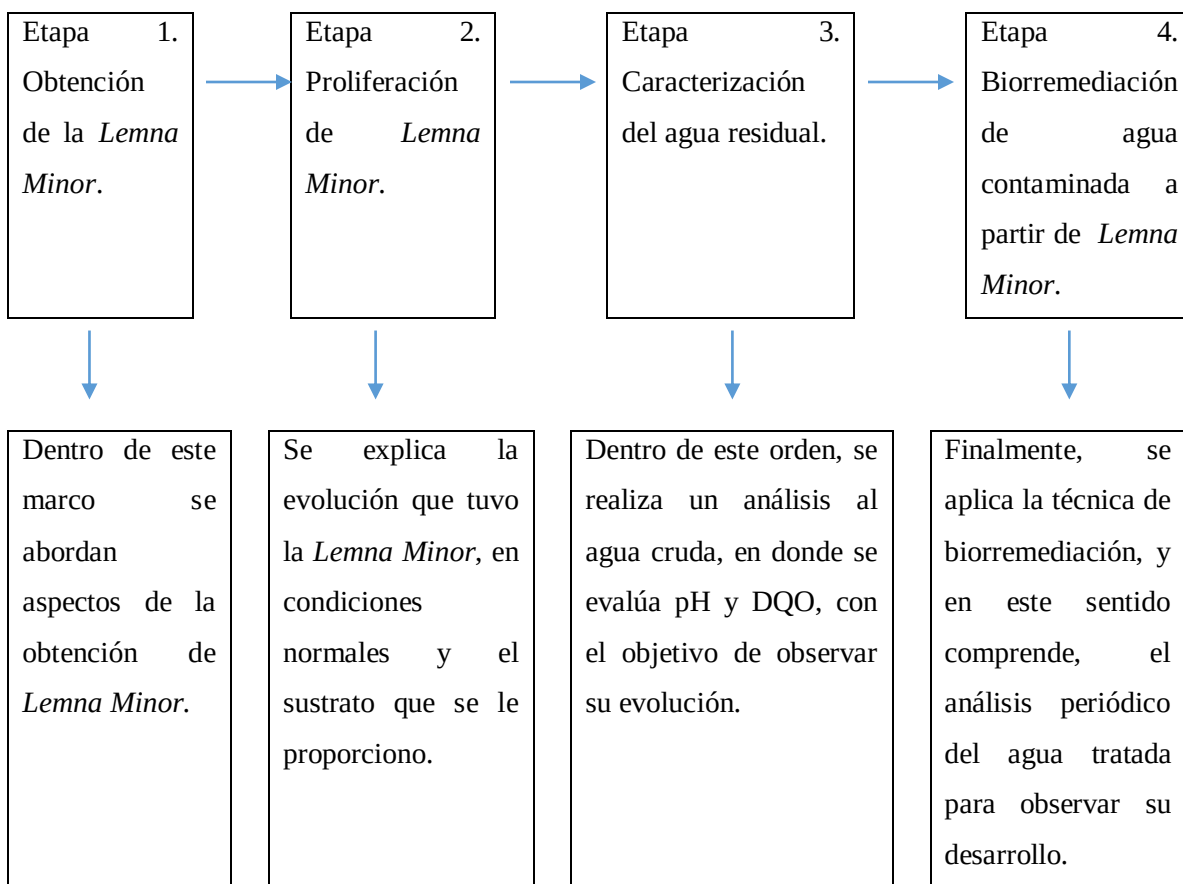


Figura 3.0. Metodología para la investigación de *Lemna Minor* como agente biorremediador de agua residual urbana

De la misma manera, se evaluaron parámetros biológicos, físicos y químicos de agua residual, basados en los lineamientos expuestos en la norma NOM-001-SEMARNAT-1996. En la tabla 3.0 se presentan dichos parámetros, y las especificaciones para su análisis.

Tabla 3.0. Especificaciones de parámetros evaluados.

Parámetro	Unidad de medida	Valor recomendable	Referencia
-----------	------------------	--------------------	------------

		en agua tratada de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996	bibliográfica
DQO	mg/L	150 mg/L	NMX-AA-031/1-SCFI-2012
pH	-log ₁₀ (H ⁺) Escala de 1 a 14	6.5 a 7.5	NMX-AA-008-SCFI-2016
Numera de <i>Lemna Minor</i>	Secuencial	No hay criterio	
Sólidos sedimentables	Gramos	No mayor a 5 gr para aguas residuales tratadas	NMX-AA-004-SCFI-2016

Etapas 1. Obtención de la lenteja marina *Lemna Minor*

La *Lemna Minor* es una planta acuática con forma de lenteja, de ahí que algunos autores la llaman “lenteja de agua”. Es conocida principalmente por su alta tasa de reproducción, pues puede considerarse como una plaga o una amenaza para otras vidas marinas, también ha sido objeto de múltiples estudios debido a su capacidad de remoción de contaminantes, es sobre esto en lo cual se centra el presente proyecto de investigación.

Para su estudio la *Lemna Minor* se obtuvo de un estanque natural, ubicado cerca de una granja de vacas, en el municipio de Huatusco Ver.

Etapas 2. Proliferación de *Lemna Minor*

Los ejemplares de *Lemna Minor* se depositaron en tres diferentes estanques artificiales con una superficie de un pie cuadrado, con el objetivo de acelerar su crecimiento. El cual contenía estiércol de vaca como sustrato.

En dos semanas la *Lemna Minor* había cubierto toda la superficie del recipiente, así que se requirió trasladar las *lemna* a otro recipiente de mayor volumen para continuar con su crecimiento.

Etapas 3. Caracterización de agua residual

Las muestras de agua residual se obtuvieron del sitio denominado el “zanjón” del municipio de Huatusco, Veracruz, en temporada de sequía, el muestreo se realizó de manera periódica una vez cada 15 días.

Los muestreos fueron realizados de acuerdo con la Norma NOM-001-SEMARNAT-1996, inmediatamente después, las muestras fueron trasladadas al laboratorio de Biotecnología del Instituto Tecnológico Superior de Huatusco para su conservación a $4\pm 2^{\circ}\text{C}$ y posterior análisis.

A continuación, se enlistan los parámetros fisicoquímicos empleados en la caracterización del agua residual:

Determinación de Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La demanda química de oxígeno (DQO) del agua, medida a través del método del dicromato, puede ser considerada como una medida aproximada de la demanda teórica de oxígeno, por ejemplo: la cantidad de oxígeno consumida en la oxidación química total de constituyentes orgánicos a productos inorgánicos finales. El grado en el cual los resultados de prueba se aproximan al valor teórico depende principalmente de qué tan completa es la oxidación. Un gran número de compuestos orgánicos se oxidan en una proporción de 90 % a 100 %. Para aguas en las que estos compuestos predominan, tales como las descargas municipales, el valor de DQO es una medida realista de la demanda de oxígeno teórica. Para otro tipo de aguas, que contienen grandes cantidades de ciertas sustancias difíciles de oxidar, bajo las condiciones de prueba, el valor de DQO es una medida pobre de la demanda de oxígeno teórica. (Zambrano *et al*, 2013)

En consideración con la norma NMX-AA-031/1-SCFI-2012, en la cual establece la medición de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas, y con la ayuda de herramientas informáticas, como Excel, se llevaron a cabo los siguientes cálculos estipulados en la metodología de la norma

Para el cálculo de la demanda química de oxígeno, DQO, expresada como concentración de masa (mg/L), está dada por la siguiente ecuación:

$$\gamma \text{ (DQO)} = (V_{\text{FASb}} - V_{\text{FASm}}) \cdot C_{\text{FAS}} \cdot M_0 \cdot V_0 / V_m$$

$$M_0 \cdot V_0 = 8,000 \text{ mg/mol}$$

Donde:

$\gamma \text{ (DQO)}$: concentración de masa de DQO, expresado en mg/L;

C_{FAS} : concentración de cantidad de sustancia de dicromato potásico a utilizar en la medición, expresada en mol/L;

V_{FASm} : volumen del sulfato de plata (FAS) usado como indicador, expresado en mL;

V_{FASb} : volumen del sulfato de plata (FAS) usado en la titulación contra el blanco de prueba, expresado en mL;

V_m : volumen de la porción de prueba, expresado en mL;

M_O : masa molar de un átomo de oxígeno, expresada en mg/mol, y

V_o : número estequiométrico = 0,5. 10.2

Al otorgar valor al resultado se redondea a la unidad de miligramo por litro más cercana al resultado.

Potencial Hidrogeno

El pH es una medida empleada para determinar el grado de la alcalinidad o la acidez de una sustancia, e indica el porcentaje de hidrógeno contenido.

El pH consta de una escala de valores, los cuales van de 1 a 14, en dicha escala se puede identificar tres grados; ácido, cuando la escala de valores se sitúa de 1 a 7.5, mientras que se considera neutro cuando se sitúa de 7.5 a 8.5, y alcalino cuando está en los valores de 8.5 hasta 14.

Sólidos sedimentables

La norma NMX-AA-004-SCFI-2013 define como sólidos sedimentables a materiales de cualquier tamaño que no se mantienen suspendidos o disueltos en un tanque de retención que no está sujeto a movimiento. Para la presente investigación su volumen se expresó en mg/L.

Los sólidos pueden afectar negativamente a la calidad del agua o al suministro de varias maneras. Las aguas altamente mineralizadas no son adecuadas para muchas aplicaciones industriales o incluso resultan estéticamente insatisfactorias para bañarse. Los análisis de sólidos son importantes en el control de procesos de tratamientos biológico y físico de aguas residuales y para evaluar el cumplimiento de las limitaciones que regulan su vertimiento. El contenido de materia en suspensión es muy variable según los cursos de agua. Para cada uno de ellos está en función de la naturaleza de los terrenos atravesados, de la estación, la pluviometría, los trabajos, los vertimientos etc. (Zambrano *et al*, 2013)

La sedimentación llevada a cabo, consistió en agregar 1 lt de agua residual en un cono imhoff, y posteriormente permitir que se sedimentara la muestra durante 1 hora a condiciones normales, posteriormente se observó una sedimentación de 5 mL de materia orgánica presente en el agua cruda.

Reproducción de *Lemna Minor*

El agua es un recurso natural indispensable para la vida de todos los seres vivos, desde un punto de vista crítico, el agua natural alberga una importante biodiversidad, desde este punto se parte, a el análisis del agua residual urbana del municipio de Huatusco y su capacidad para albergar seres vivos, tal y como es en este caso de la lenteja de agua *Lemna Minor*. En este aspecto se hace énfasis, ya que la lenteja de agua no pertenece al grupo de seres vivos *extermofilos*, por lo que requiere de ciertas características el medio para que esta prospere, tales características como un pH adecuado, temperatura, turbidez etc.

En 4 estanques artificiales, dos de ellos con sedimentación previa, y un volumen útil de 250 mL de agua cruda se agregaron 25 unidades de *Lemna Minor* y se mantuvo en constante agitación a 35 rpm.

Debido a que cada tratamiento consto de su unidad y su correspondiente replica, se realizó un promedio entre ambas de la siguiente manera

$$\text{Promedio} = P1 + P2 / 10$$

Donde

P1: es el dato de la unidad experimental original

P2: es el dato de la réplica de la unidad experimental original

Posteriormente para determinar la tasa de crecimiento se siguió la siguiente ecuación

$$\text{Tasa porcentual de crecimiento} = (D1/D2) - 1$$

Donde

D1: número actual de *Lemna Minor*

D2: anterior número de *Lemna Minor*

En esta ecuación se determina la tasa de crecimiento porcentual de dos datos, es decir, se realiza una relación del número actual de *Lemna* con el anterior, con base en ello se determina su crecimiento.

Etapla 4. Biorremediación de *Lemna Minor*

Para la presente investigación se ejecutó un experimento tipo batch durante 30 días, se emplearon recipientes con un volumen útil de 350 mL, con agitación constante de 35 rpm a temperatura ambiente. Se evaluó el tratamiento de agua residual con un proceso de sedimentación previo y sin proceso de sedimentación mediante el uso de un cono imhoff previo a tratarla con *Lemna M.* El número inicial de *Lemna* en el proceso fue de 25 para cada recipiente.

El monitoreo del proceso se llevó a cabo cada tres días, observando los siguientes parámetros: número de *Lemna M.*, DQO y pH. Se presenta la tabla 3.1, en la cual es posible observar las características iniciales del agua contaminada, y por otro lado, observar las características de finales que obtuvieron posterior a 30 días de la ejecución de la técnica de biorremediación.

Tabla 3.1. Datos de entrada y salida del agua tratada con *Lemna Minor*.

Tratamiento	Unidades experimental es	Numero de <i>Lemna</i> inicial	Numero de <i>Lemna</i> final	pH promedi o inicial	pH promedi o final	DQO promedi o inicial mg/L	DQO promedi o final mg/L
Promedio entre las 3 unidades experimentales	3	25 <i>Lemna</i>	73 <i>Lemna</i>	7.19	8.43	3,053.43 mg/L	2,107.29 mg/L

CAPITULO 4

RESULTADOS Y DISCUSION

Etapla 1. Obtención de la lenteja marina *Lemna Minor*

La *Lemna Minor* es una planta acuática con forma de lenteja y que en múltiples ocasiones es catalogada como una planta invasora de sistemas pecuarios.

La *Lemna Minor* fue obtenida cerca de una granja de vacas, en el municipio de Huatusco, Ver.

Etapla 2. Proliferación de *Lemna Minor*

Una vez ejecutada la técnica de biorremediación se mantuvo en constante observación durante 30 días. Inicialmente en los medios experimentales, es decir, en los recipientes, se colocaron 25 *Lemnass M.*, con lo cual, después de ello se observó la reproducción de *Lemna M.*, puesto que al finalizar los días, se obtuvo un promedio de reproducción de 60 unidades, dicho de otra manera,

obtuvo un promedio de reproducción de 110%. No obstante, algunos investigadores, como Martelo (2012) atribuyen este fenómeno, a que en las aguas residuales urbanas se encuentra presente una alta carga de materia orgánica, así también como nitritos y proteínas, las cuales sirven de alimento para varios tipos de algas, hongos y vectores, y así mismo estimulen su crecimiento.

Tabla 4.0. Monitoreo del desarrollo de la técnica de biorremediación y proliferación de *Lemna Minor*.

Tiempo (días)	Estado del medio experimental
Día 1. Durante el primer día se realizó la preparación el medio y caracterización del agua cruda. Se ejecutó un experimento tipo batch durante 30 días, con volumen útil de 350 mL en recipientes de polietileno, con agitación constante de 35 rpm a temperatura ambiente. Se evaluó el tratamiento de agua residual con un proceso de sedimentación previo y sin proceso de sedimentación.	
Día 9. Se continuó monitoreando el desarrollo del proceso, se mantiene a una agitación de 35 rpm con el objetivo de evitar en mayor medida sedimentación. Parámetros como pH y conteo de unidades de <i>Lemna Minor</i> son realizados diariamente.	
Día 18. Se puede apreciar que la lenteja de agua se ha reproducido sin ningún problema. Algunos aspectos para destacar, es la aparición de una ligera capa de materia orgánica suspendida en la superficie, sin embargo, no interviene en el crecimiento de la lenteja de agua ni en el desarrollo del proceso.	

Día 24. Se nota que la lenteja de agua tuvo un buen desarrollo en el medio, es decir, se ha reproducido sin ningún problema. Se continúan evaluando parámetros orgánicos, tales como; DQO, pH y el grado de reproducción de la *Lemna Minor*.

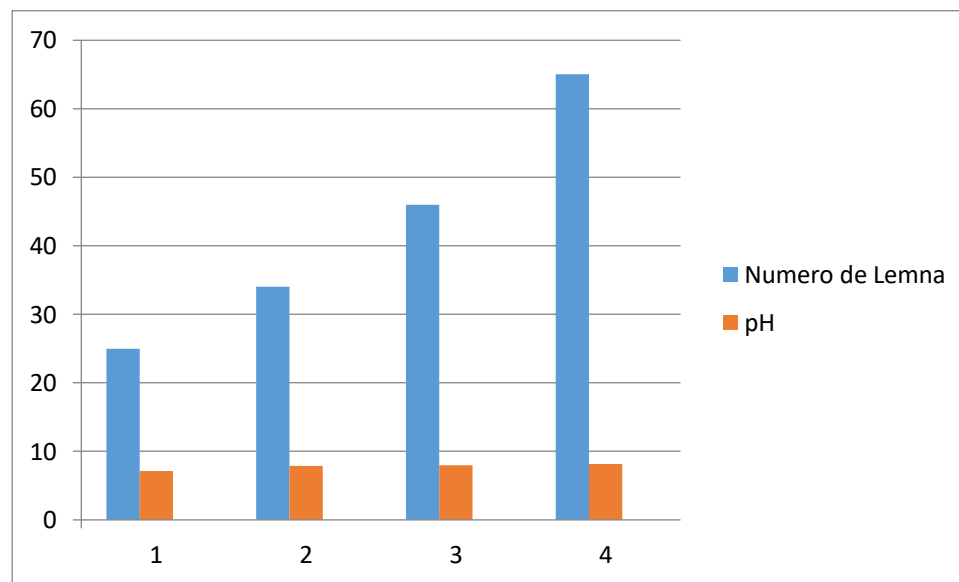


Figura 4.0. Desarrollo de las unidades experimentales (pH y numero de *Lemna Minor*) en torno al tiempo transcurrido

En la figura 4.0, es posible observar el cambio que tuvieron ciertos aspectos, tales como pH y el número de *Lemna Minor* que se reprodujeron, el tiempo concierne a los días 1, 9, 18 y 24 correspondientemente a 1,2, 3, y 4. Por otro lado, durante el desarrollo se observó el crecimiento de lama en la superficie, la cual se debe a las interacciones con el medio ambiente, entre las cuales están la temperatura o la iluminación, sin embargo, con el propósito de evitar que dicha lama interfiriera en el desarrollo de *Lemna Minor*, los estanques artificiales se mantuvieron en agitación constante, dicho procedimiento también ayudo a evitar la presencia de exceso de sedimentación.

Etapas 3. Caracterización de agua residual

Las pruebas de laboratorio de caracterización inicial tienen como objetivo mostrar un panorama amplio del estado físico y biológico del medio, y con ello, posterior a la ejecución de la técnica de biorremediación dar un enfoque científico y crítico de la eficiencia y viabilidad de la técnica aplicada, en este caso, del desempeño que tiene la *Lemna Minor* como agente biorremediador en el tratamiento de aguas residuales del municipio de Huatusco.

La caracterización del agua cruda, obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 4.1. Caracterización inicial de agua cruda del municipio de Huatusco, Ver. y límites permisibles de acuerdo a la NOM-0010SEMARNAT-1996. Fuente propia

Parámetro	Tratamiento con sedimentación	Tratamiento sin sedimentación	Límite máximo de acuerdo con NOM-001-SEMARNAT-1996 para una población de menos de 80 000 habitantes
pH	7.23	7.15	6.5 – 7.5
Sólidos sedimentables	5 mg/L	No se ejecutó técnica de sedimentación	1 mg/L
DQO	2,911.86 mg/L	3,195.43 mg/L	150 mg/L

Cabe señalar, que de acuerdo a información de CEIEG (2017), el municipio de Huatusco tiene una población estimada de 59,734 habitantes, por ende, la norma NOM-001-SEMARNAT-1996, se aplica en términos de municipios con una población menor a los 80, 000 habitantes.

Como se observa en la tabla 4.1, el nivel máximo de materia orgánica expresada como DQO permisible en aguas procedentes de ríos, arroyos y canales de drenaje es de 150 mg/L, por otro lado, inicialmente para el agua cruda con sedimentación se obtuvo un valor de 2911.86 mg/L, mientras que para el agua cruda sin sedimentación se obtuvo un valor de 3,195.43 mg/L, en este sentido, el agua cruda presenta altos índices de concentración de DQO, y está situada muy por arriba del límite permitido en la NOM-001-SEMARNAT-1996, sin embargo, después de transcurrir un periodo de 30 días de biorremediación a partir de *Lemna Minor*, en el tratamiento con sedimentación se obtuvo un valor de 1986 mg/L, mientras que el tratamiento con sedimentación obtuvo una concentración de

DQO de 2228 mg/L, no obstante, a pesar de que presenta una tasa de reducción de 36%, sigue estando situada por arriba del límite permitido.

Etapas 4. Biorremediación de *Lemna Minor*

A través del desarrollo de la técnica de biorremediación, se observó una disminución de DQO, el cual va de 3195 mg/L en el tratamiento sin sedimentación inicialmente, hasta finalmente, alcanzar un promedio de 2041 mg/L al terminar la ejecución de la técnica de biorremediación, mientras que el tratamiento con sedimentación presentó una concentración de DQO inicial de 2,911.86 mg/L, y finalizó con una concentración de 1986.14 mg/L, cabe señalar que en ambos tratamientos el pH tuvo un ascenso de neutro a básico conforme el tiempo, puesto que la medición de pH en el agua cruda de ambos tratamientos obtuvo un promedio de 7.19, y este mismo al finalizar la técnica reportó un valor promedio de 8.4. Exactamente el pH inicial del agua cruda con tratamiento presentó un valor de 7.23, mientras que el agua cruda sin sedimentación obtuvo un valor de 7.15, y al terminar el periodo de 30 días de biorremediación a partir de *Lemna Minor*, estas presentaron un valor de 8.33 y de 8.53 correspondientemente.

La estrategia experimental se conformó por dos unidades experimentales, una con tratamiento primario; el cual consistió en la sedimentación del flujo contaminado a través de un cono Imhoff durante 1 hora, mientras que la otra línea careció de dicha sedimentación.

Análisis de DQO

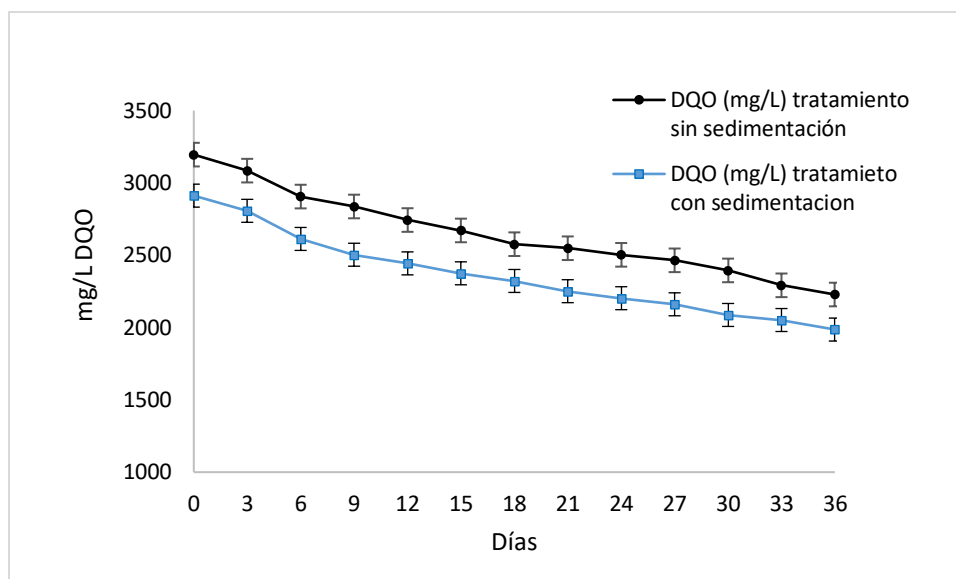


Figura 4.1. Disminución de DQO en mg/L con relación al tiempo en días

En la figura 4.1 se observa una disminución eventual de DQO, siendo mayor la carga en el tratamiento sin sedimentación inicial, sin embargo, se debe de considerar ciertos factores, tales como las condiciones ambientales que pueden afectar de manera indirecta el crecimiento de *Lemna Minor*, y por lo tanto obstaculizar el desarrollo de la biorremediación. Chirinos(2019), explica que existe una relación directa de la eficiencia de remoción de materia orgánica en aguas contaminadas con las transformaciones naturales que surgen debido a las reacciones químicas por las que pasan los compuestos orgánicos en el suelo y en el agua, entre las cuales se conocen reacciones de tipo redox y neutralización, aunque más comúnmente fenómenos de acidificación, por otro lado argumenta que algunos contaminantes del grupo Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs por su siglas, provienen de la combustión de materia orgánica) pueden afectar de manera directa.

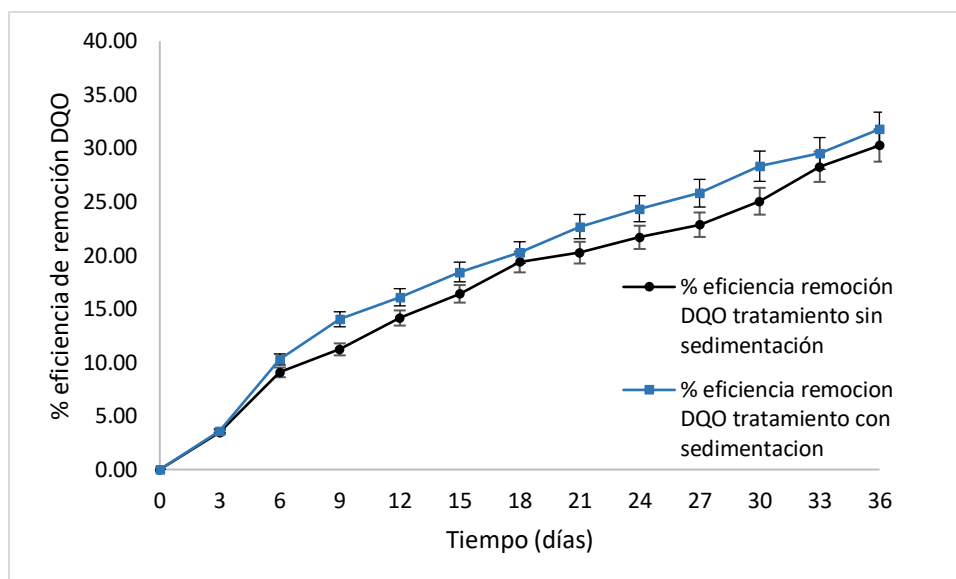


Figura 4.2. Porcentaje de eficiencia de remoción de DQO con relación al tiempo en días

En la figura 4.2 se puede observar que el uso de *Lemna Minor* como agente biorremediador de efluentes contaminados presenta una eficiencia de remoción de materia orgánica de hasta 36% en un periodo de 30 días.

Cabe señalar que para fines críticos se realiza una comparación entre los resultados obtenidos a partir de la biorremediación con *Lemna Minor* y los límites que propone la norma mexicana; NOM-001-SEMARNAT-1996 en la cual establecen los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

Los resultados obtenidos arrojan una disminución de la demanda de oxígeno, es decir, presento una eficiencia de remoción del 36%, sin embargo, se aprecia que en la línea experimental en la cual se dio un tratamiento primario el contenido de DQO es incluso menor a la línea que careció de dicho procedimiento de sedimentación, dicha diferencia consta de 12% en relación una de otra.

Torres (2015) cataloga a los niveles de DQO con carácter general, el DQO es la necesidad de oxígeno para oxidar la materia orgánica y sales minerales presentes en el agua, esto se lleva a cabo principalmente a partir de bicromato potásico o permanganato potásico, y es por eso que cuanta más contaminación, más DQO.

Torres (2015) proporciona una medida aproximada y algunos valores de referencia en función del tipo del agua pueden ser:

Pura: entre 2 y 20 mg/L

Poco contaminada entre 20 y 100 mg/L

Medianamente contaminada entre 100 y 500 mg/L

Muy contaminada entre 500 y 3,000 mg/L

Extremadamente contaminada entre 3,000 y 15,000 mg/L

De acuerdo con la investigación de Torres (2015), el agua residual estudiada se aproxima a el nivel de medianamente contaminada, pero para efectos prácticos, la presente investigación se basa en los lineamientos expuestos en la norma mexicana NOM-001.SEMARNAT.1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

Análisis de pH

El propósito del análisis del pH, es observar si la presencia de *Lemna Minor* tiene un efecto indirecto dentro del medio contaminado. Dentro de este marco se observó un ascenso eventual del pH, presento una ascendencia escalar hacia una sustancia básica, puesto que de tener un promedio inicial de 7.1, al finalizar los 30 días presento un promedio de pH de 8.1, y a pesar de que se encuentra dentro del rango permitido de acuerdo a la normatividad, se teme que ese ascenso se prologue, es decir, continúe ascendiendo indefinidamente, en tal caso, se tiene que ejecutar una técnica de neutralización, la cual consiste en agregar soluciones buffer que ayuden a equilibrar el pH.

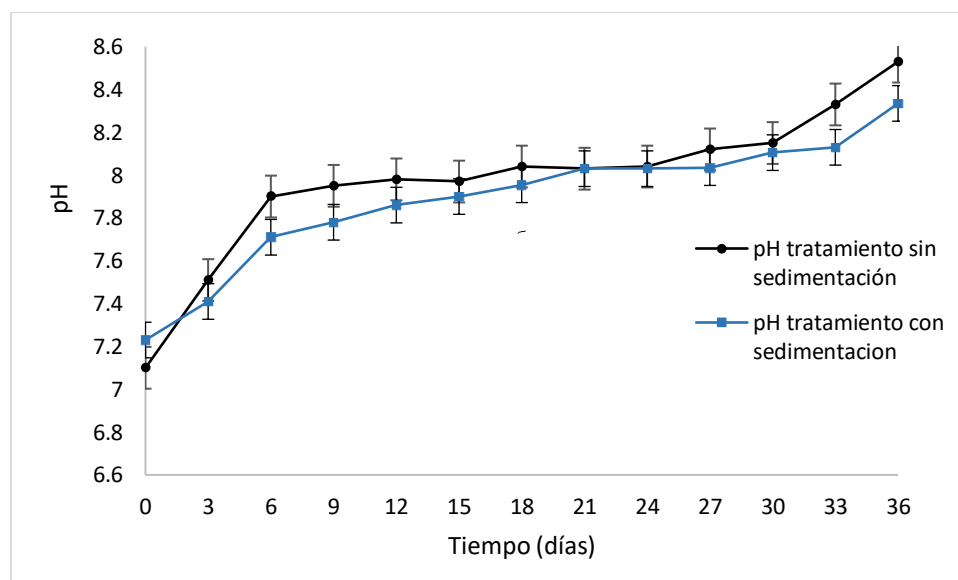


Figura 4.3. Desarrollo de pH durante la técnica de biorremediación con *Lemna Minor*

En la figura 4.3, se aprecia que ocurrió un ascenso en el valor de pH en ambos tratamientos, sin embargo, de acuerdo a la norma mexicana para el análisis del agua, en la figura 4.3; establece que el pH de una muestra de agua residual debe de mostrar un pH entre 7.5 y 8.5, es decir, estar en el rango de neutral, por otro lado, en los resultados se observa una tendencia que gira en torno hacia una sustancia básica.

De acuerdo con Sosa (2019), un pH demasiado alto o bajo puede ser perjudicial. De hecho, el agua alcalina tiene un sabor amargo, y se sabe que puede provocar depósitos en las tuberías y los electrodomésticos; por su parte, un agua ácida puede corroer metales o llegar a disolverlos. Por ello es importante remarcar que la tendencia a la alcalinidad representa un obstáculo para una exitosa ejecución de biorremediación. Por otro lado, existen métodos a partir de los cuales es posible lograr establecer un equilibrio, es decir, obtener un pH neutral, y esto consiste en agregar ciertas sustancias en las cuales predominen características ácidas o alcalinas, según se requiera, y a partir de cálculos estequiométricos agregar la cantidad de sustancia correcta para obtener un pH neutral.

La actividad biológica se desarrolla dentro de un intervalo de pH generalmente estricto. Un pH que se encuentre entre los valores de 5 a 9, no suele tener un efecto significativo sobre la mayoría de las especies, aunque algunas son muy estrictas a este respecto. Un aspecto importante del pH es la agresividad de las aguas ácidas, que da lugar a la solubilización de sustancias por ataque a los materiales.

De este modo, un efluente con pH adverso puede alterar la composición y modificar la vida biológica de las aguas naturales. También es más difícil de tratar por métodos biológicos, que sólo pueden realizarse entre valores de pH de 6.5 a 8.5. Las aguas residuales urbanas suelen tener un pH próximo al neutro, como es el caso del agua residual del municipio de Huatusco, la cual está situada en un promedio de 7.5.

Sin embargo, aunado a eso, aparte del efecto directo, el pH tiene un efecto indirecto, influenciando la toxicidad de algunas sustancias, especialmente de aquellas en las que, la toxicidad depende del grado de disociación. (Espigares *et al.* 1985)

Se atribuye el ascenso de pH a la temperatura, puesto que Sosa (2019) argumenta que el pH disminuye conforme aumenta la temperatura y también conforme aumenta la profundidad, y viceversa. En este caso, la presente investigación se desarrolló durante los meses de octubre y noviembre, donde las temperaturas suelen oscilar entre los 26° y 18° en zonas montañosas.

Por otro lado, cabe señalar, que Carrasquero (2002), menciona que el pH de los mares y océanos oscila entre 7.6 hasta 8.9, y esto se debe al consumo de dióxido de carbono y producción de

oxígeno debido a la flora presente, de este modo, la fotosíntesis que realiza *Lemna Minor* puede influir de manera directa sobre el pH y se atribuye a ello su inclinación hacia una sustancia básica.

Análisis de tasa de reproducción de *Lemna Minor*

A través del monitoreo es posible observar el desarrollo de cualquier proceso e identificar ciertos aspectos de interés o que representen relevancia para el desarrollo del mismo. Uno de los aspectos a los cuales se dio interés es la capacidad que tiene la lenteja de agua *Lemna Minor* de proliferar en un medio altamente contaminado, como lo es al agua residual urbana sin tratar.

Las aguas residuales, dependiendo de su composición y concentración, pueden llevar en su seno gran cantidad de organismos. También influyen en su presencia la temperatura y el pH, puesto que cada organismo requiere unos valores determinados de estos dos parámetros para desarrollarse.

La *Lemna M.* es un tipo de alga marina, la cual es considerada como una planta invasora y plaga; esto, debido a su alta tasa de reproducción. Su proliferación la ha llevado a colocarse como una fuente de alimento para animales de granja, debido a su contenido proteico. Sin embargo, el propósito de mantener en observación la tasa de reproducción fue estudiar su capacidad de proliferación en fluidos altamente contaminados.

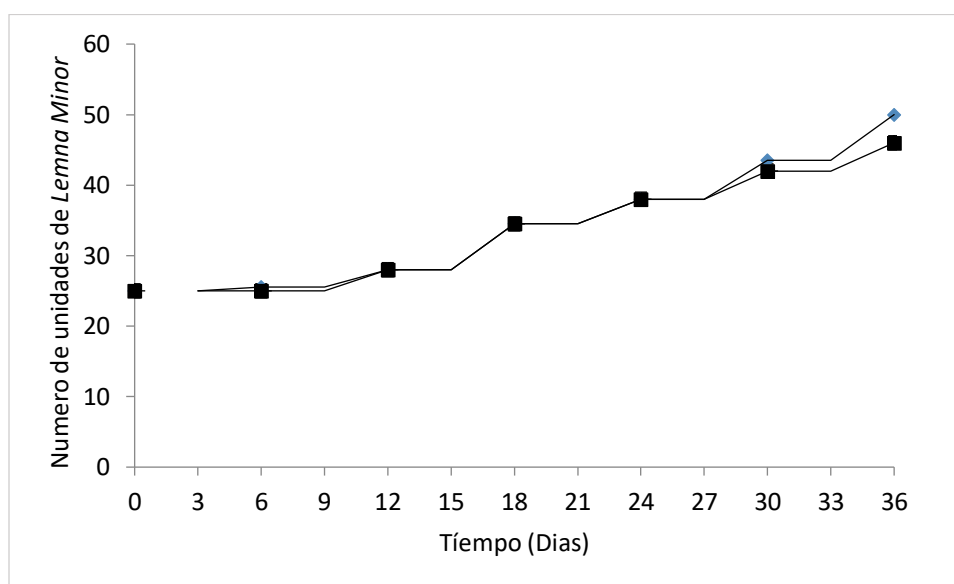


Figura 4.4. Número de unidades de *Lemna Minor* con relación al tiempo en días.

Como se puede apreciar en la figura 4.4, al día número 36, se observó una concentración de 75 unidades de *Lemna Minor* en el recipiente donde se llevó a cabo una sedimentación, mientras, el

recipiente el cual careció de dicho procedimiento de sedimentación, presento 72 unidades de *Lemna Minor*. Todo se realizó bajo temperatura ambiente y con una agitación constante de 35 rpm.

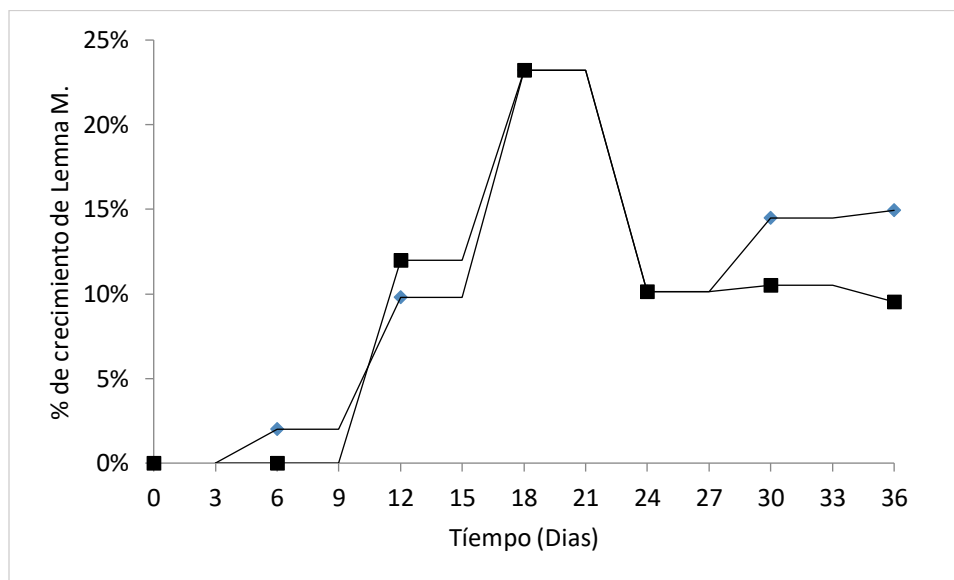


Figura 4.5. Porcentaje de crecimiento de *Lemna Minor* con relación al tiempo en días.

Como se puede observar en la figura 4.5, existió una tasa de crecimiento del 116%, es decir, el número inicial de 25 unidades se incrementó más de doble, con lo cual, se logra confirmar, que a pesar de que se les disipe sobre un medio altamente contaminado, esto no interfiere en su alto índice de reproducción, y que incluso, la materia orgánica disuelta en tal medio como lo es el agua residual, sirve como medio nutrimental para estimular su reproducción.

Se aprecia en la figura 4.5, que durante el muestreo 18 y 21 el índice de crecimiento sufrió un pico, sin embargo, posterior al pico, el crecimiento continuo. Existen algunos factores a considerar para que diera lugar a tal pico, por ejemplo, la temperatura o pH. Esto es debido a que las algas acuáticas se desarrollan mejor en temperaturas que van de los 18° a los 28°, y contrario a los hongos que prefieren un pH ácido, las algas se desarrollan mejor en soluciones que tengan un pH cercano al neutral, es decir, de 7.5 a 8.5.

Se presume que su crecimiento está favorecido por la presencia en las aguas residuales de distintas sustancias y trazas de compuestos orgánicos, de acuerdo con Muñoz (2008) en el agua residual es común encontrar fósforo, oxígeno, nitrógeno y anhídrido carbónico, así como vestigios de elementos tales como níquel, manganeso, plomo, cromo, cadmio, zinc, cobre, hierro y cobalto, y son necesarios para la vida biológica y pueden favorecer a la reproducción de *Lemna Minor*.

Análisis de sólidos sedimentables



Figura 4.6. Sedimentación del medio (agua residual) previo a la ejecución de la técnica de biorremediación.

Se examinó la capacidad de *Lemna Minor* como agente para la disminución de materia orgánica presente en aguas residuales. Se realizó una sedimentación, tal sedimentación consistió en agregar 1 lt de agua residual en un cono imhoff, y posteriormente permitir que se sedimentara la muestra durante 1 hora a condiciones normales, posteriormente se observó una sedimentación de 5 mL de materia orgánica presente en el agua cruda.

De acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996 , dentro de la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de los sistemas de alcantarillado o drenaje municipal, establece que en municipios con menos de 80 000 habitantes el límite máximo permisible de sólidos sedimentables para aguas residuales no debe de superar 1 mg/L, siendo que en el cono imhoff se captó 5 mg/L de sólidos sedimentables en un periodo de 1 hora.

A partir del desarrollo de la técnica de biorremediación tipo batch, se presenta la siguiente tabla, dentro de la cual se muestran los resultados obtenidos en la línea de investigación sin previo tratamiento primario de sedimentación

Tabla 4.2. Caracterización final del agua residual tratada sin tratamiento primario de sedimentación.

Fuente: propia

Parámetro	Entrada (Agua cruda)	Salida (Agua tratada)
DQO	3,118.3 (mg O ₂ /L)	2,052.6 (mg O ₂ /L)
pH	7.51	8.47
Numero de <i>Lemna</i>	25 unidades	67 unidades

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos a partir del medio experimental de 30 días con previo tratamiento primario de sedimentación

Tabla 4.3. Caracterización final del agua residual tratada con tratamiento primario de sedimentación. Fuente: propia

Parámetro	Entrada (Agua cruda)	Salida (Agua tratada)
DQO	2,992.6 (mg O ₂ /L)	2,035.4 (mg O ₂ /L)
pH	7.64	8.36
Numero de <i>Lemna</i>	25 unidades	83 unidades

En la línea experimental a la cual se le dio un tratamiento primario de sedimentación, presenta un diferencia porcentual del 12% en la remoción de DQO respecto a la línea experimental que careció de dicho tratamiento. Mientras que el pH en ambas líneas tiende a la alcalinidad, sin embargo, la norma NOM-001-SEMARNAT-1996 menciona que el pH para aguas tratadas debe de estar situado en un rango de 7.5 a 8.5.

Por otro lado, de acuerdo con la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LEGEEPA) en su artículo 123 establece que todas las descargas en las redes colectoras, ríos, acuíferos, cuencas, cauces, vasos, aguas marinas y demás depósitos o corrientes de agua y los derrames de aguas residuales en los suelos o su infiltración en terrenos, deberán satisfacer las

normas oficiales mexicanas que para tal efecto se expidan, y en su caso, las condiciones particulares de descarga que determine la Secretaría o las autoridades locales. Corresponderá a quien genere dichas descargas, realizar el tratamiento previo requerido.

El municipio de Huatusco carece de dicho sistema de tratamiento de aguas residuales. El agua residual procedente de los hogares, e incluso industrial (beneficios de café y rastros principalmente) es vertida los caudales sin ningún tipo de tratamiento previo.

La norma mexicana también expone la periodicidad de los muestreos, análisis e informe de resultados para descargas de tipo municipal.

Tabla 4.4. Periodicidad de muestreos en un municipio de acuerdo a la norma NOM-001-SEMARNAT-1996

Rango de población	Frecuencia de muestreo y análisis	Frecuencia de Informe de resultados de muestreo y análisis
Mayor de 50 000 habitantes	Mensual	Trimestral
De 10 001 a 50 000 habitantes	Trimestral	Trimestral
De 20 501 a 10 000 habitantes	Semestral	Trimestral

Considerando la periodicidad que estipula la norma, y que indica la frecuencia con la cual deben de ser llevados a cabo dichos muestreos, un municipio como Huatusco, el cual de acuerdo al censo del INEGI del año 2015, calculo una cantidad de 60 674 habitantes, por lo tanto la frecuencia con la cual deberían ejecutarse dichos muestreos deberían de ser mensualmente y el correspondiente informe de resultados debe de presentarse trimestralmente, sin embargo el municipio de Huatusco no cuenta ni siquiera con sistemas de tratamiento primarios.

De acuerdo a lo anteriormente mencionado, se presenta la alga *Lemna Minor* como parte de un tratamiento de biorremediación, el cual de acuerdo a los resultados obtenidos en la previa experimentación tipo batch, es posible decir, que la técnica de biorremediación representa un medio viable para el tratamiento de agua residual, siento que además de ser altamente eficiente en la disminución de contaminantes orgánicos, también surge como un tratamiento de biorremediación fácil de ejecutar, es decir, no requiere de avanzados conocimientos, sino de una sencilla capacitación que dote al usuario con conocimientos básicos, también representa una técnica económicamente accesible, pues la inversión que se contempla es solo la construcción de estanques

de sedimentación y estanques de reposo de la alga junto con el agua residual, en donde se llevara a cabo de biorremediación.

El rápido crecimiento de la *Lemna Minor* puede suponer un problema, sin embargo, Torres en su artículo Evaluación de planta *Lemna Minor* como biorremediadora para aguas contaminadas con mercurio, declara que la *Lemna Minor* es rica en proteínas, para ser preciso en 78% de peso neto, lo cual es también considerada dentro de una dieta para aves de corral.

Conclusión

A partir de los resultados obtenidos por medio de la ejecución de la técnica de biorremediación supone una alternativa para contrarrestar los fenómenos de la contaminación, como es posible observar en la parte experimental, la *Lemna Minor* es conocida como una plaga de rápido crecimiento y adaptabilidad, sin embargo, cuando es utilizada como agente biorremediador se observó cómo los niveles de DQO se ven atenuados eventualmente conforme al tiempo, es decir, existe una relación directa entre la proliferación de la *Lemna Minor* y los contaminantes disueltos en el medio acuoso.

Este estudio demuestra el uso de *Lemna Minor* (lenteja de agua) para ayudar a la remoción de materia orgánica presente en aguas residuales de tipo urbana y de esta manera mitigar los efectos de la contaminación al medio ambiente y al ecosistema. La lenteja de agua parece ser especialmente ventajoso en tales sistemas, puesto que exhibe un alto potencial para el tratamiento de aguas residuales debido a su ubicuidad, rápida tasa de crecimiento, facilidad de recolección, amplia gama de tolerancia a la temperatura y ampliados periodos de crecimiento y cosecha.

El tratamiento con *Lemna Minor* puede contribuir a la remoción de materia orgánica expresada como demanda química de oxígeno, sin embargo, por si sola, no se logra cumplir con lo establecido por la NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos de agua nacionales.

Finalmente, se presenta a la *Lemna Mimor* como un agente viable en el tratamiento de agua residual urbana, el cual resuelve el problema de la carencia de un control adecuado de aguas residuales generadas en el municipio de Huatusco, y de tal manera, se puede considerar como un medio que satisfaga la responsabilidad ambiental del municipio. Con fundamentos en la norma mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, se puede decir, que el desempeño de la *Lemna Minor* en agua residual alcanzo a disminuir el nivel de un efluente “Altamente contaminado” a “Medianamente contaminado”, todo ello en un lapso de 30 días en una prueba tipo batch. Sin embargo, se sugiere se

realicen más estudios tomando como factor, concentración de DQO, vol. de agua a tratar, tiempo de tratamiento en lote y en continuo desarrollo.

Anexos

Técnica de determinación de DQO por medio de espectrofotometría

Materiales y reactivos a utilizar

Dicromato potásico

Sulfato de plata

Ácido sulfúrico

Celdas de vidrio (5 mL)

Espectrofotómetro

Pipetas automáticas y puntas

Digestor

Tubos de ensayo

Método

El procedimiento habitual para la determinación de la DQO utiliza dicromato potásico ($K_2 Cr_2 O_7$) en exceso en medio ácido, en presencia de sulfato de plata ($Ag_2 SO_4$) como catalizador para eliminar las interferencias de los cloruros. El dicromato oxida la materia orgánica e inorgánica de la muestra y a su vez es reducido de Cr+6 a Cr+3. El ensayo se realiza a 150 °C a reflujo total durante 2 horas. Después de la digestión el exceso de dicromato potásico se valora con la ayuda de un espectrofotómetro.

Preparación de materiales

Todo el material de laboratorio (puntas de pipeta, tubos de ensayo y vasos de precipitado) previo a su utilización deben de ser esterilizados con una solución de 10/1 de agua destilada y ácido sulfúrico correspondientemente. Inmediatamente después, deben de ser lavados con agua destilada.

Procedimiento

Preparación de blanco

Con la ayuda de la pipeta automática, se adhieren en un tubo de ensayo 2 mL de agua destilada, 2 mL de sulfato de platino y 1 mL de dicromato de potasio.

Preparación de muestras

Con la ayuda de la pipeta automática, se adhieren en un tubo de ensayo 2 mL de agua contaminada, 2 mL de sulfato de platino y 1 mL de dicromato de potasio

Una vez listos los objetos experimentales, se incorporan a un digestor a 150 °C durante 2 horas, cabe resaltar, que las muestras deben de mantenerse en la sombra, ya que son sustancias que pueden presentar reacciones fotoquímicas, y por ende alterar los resultados.

Transcurridas las 2 horas, en celdas de vidrio de 5 mL, se vierten los objetos experimentales y se miden en el espectrofotómetro.

Bibliografía

Aedyr, (2019); Disminución de las emisiones de mercurio de las aguas cubiertas de lenteja de agua. Revista de geofísica.

Arenas A., Meru L., Torres A., 2011. Evaluación de planta Lemna Minor como biorremediador para aguas contaminadas con mercurio.

Arroyave, 2004. La lenteja de agua (Lemna Minor) una planta acuática promisor.

Armstrong 2003. La fruta más pequeña del mundo. Plantas dignas de mención de la palabra de Wayne.

Barragan D. 2018. Biología de las plantas. 5 ed. New York : Worth. 791p.

BUI, X.M., B. Ogle and J.E. Lindberg. 2002. Uso de lenteja de agua como suplemento proteico para la cría de patos. Asian Australasian Journal of Animal Sciences. 15 (6): 866-871.

Instituto Gallach, 1984. Historia natural. Volumen V. Barcelona: Océano.

Roldán, 1992. Descripción de diversas plantas acuáticas del orden de las macrofitas en las costas de Yucatán.

Carrasquero, 2002. Problemática de la contaminación de cuerpos acuíferos en Venezuela.

Centro de Información Estadística y Geografía de Veracruz (CEIEG) 2017. Información estadística, Censos municipales, geografía e información.

COOK, C.D. and B.J. GUT. 1974. Plantas acuáticas del mundo: Un manual para la identificación de los géneros de macrofitas de agua dulce. The Hague : Junk, 560 p

Córdoba M, Mendiola O, 2010. Utilización de la lenteja de agua para la producción de tilapia

Chara, J. 1998. El potencial de las excretas porcinas para uso múltiple y los sistemas de descontaminación productiva.

Cicek, N, 1998. Efectividad del biorreactor de membrana en la degradación de alto peso molecular. 1998.

Chirinos, 2019. Biorremediación de lodos petroquímicos mediante el uso de la biota microbiana autóctona en un oxisol del municipio Lagunillas del estado Zulia, Venezuela.

De Souza S. Pedraza G. 1999. Implementación y evaluación de un sistema de descontaminación de aguas servidas con plantas acuáticas. Maestría en Desarrollo Sostenible de Sistemas Agrarios. Universidad Javeriana-CIPAVIMCA. 89 p.

Díaz 2003. Producción de biomasa de la lenteja de agua (*Lemna Minor*), fertilizada con estiércol de ovinos

Espigares García, M. y PérezLópez, JA, 1985. Aspectos sanitarios del estudio de las aguas. Universidad de Granada. Servicio de Publicaciones. Granada.

EPA (Environmental Protection Agency). 1996. Directrices de prueba de efectos ecológicos. Ensayo de toxicidad de plantas acuáticas utilizando *Lemna* spp. Tiers I and II.

Semarnat, 2017. Agua y calidad

Fairchild, J.F., D.S. Ruessler, P.S. Haverland and A.R. Carlson. 1997. Sensibilidad comparativa a *Selenastrum capricornutum* y *Lemna Minor* a dieciséis herbicidas, Arco Reinar. Toxicología de la contaminación. New York, Springer-Verlag pp. 353-357.

Ferley 2015. Comparación de las características poblacionales de *Lemna minuta* (ARACEAE: LEMNOIDEAE) en tres medios de cultivo

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2017. Censo de población y vivienda.

Instituto Gallach, 1984. Historia natural. Volumen V. Barcelona: Océano

Jiménez J., Sánchez H, 2010. Evaluación de la calidad del agua en el lago de Santa María, Guerrero.

Kiran, J., 1991. Capacidad de retiro de nitrógeno y fósforo en la Capacidad de retiro del nitrógeno y fósforo de cuatro plantas elegidas en las charcas de aguas dulces tropicales. *Diario Conservación Ambiental*: 18, 143–147.

Martelo, 2012. Macrofitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales; una revisión del estado del arte

Mortero F., 2012. Evaluación del estado nutricional de las plantas: principios y aplicaciones. 2a ed., Piracicaba: POTAFOS, 319p.

Muhammed, 2019. Fitorremediación de azul de metileno mediante lenteja de agua (*Lemna Minor*)

Obek, E. and H. Hasar. 2002. Papel de la cosecha de lenteja de agua *Lemna Minor* en la eliminación biológica de fosfato de efluentes de tratamiento secundario. *Boletín medioambiental de Fresenius*. 11:27-29 (Abstract).

Olguín, E. and E. Hernández. 1998. Utilización de las plantas acuáticas para la recuperación de nutrientes y metales pesados de aguas residuales. Instituto de ecología Vancouver, biotecnología ambiental. Disponible: www.idrc.ca/industry/canada.

Organización Mundial de la Salud (OMS) 2010. Water, sanitation and hygiene.

Parr, L.B., R.G. Perkins and C.F. Mason. 2002. Agua. Revisado. 36 (7): 1735-1742 (introducción).

Quintana W. Raven, P., R. Evert and S. Eichhorn. 1971. *Biología de las plantas*. 5 ed. Nueva York: Worth. 791p.

Roldán, G. 1992. *Fundamentos de limnología tropical*. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia. 529 p

Rook, E. 2002. Flora, fauna tierra y cielo. La historia natural de los bosques del norte. Disponible en: www.rook.org/earl/bwca/nature/aquatics/lemna.html

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Diario de la federación. Nomras y estatutos.

Sosa, L.M.; Chu, L.M.; Wong, P.K. 2019; Mejora microbiana de la capacidad de eliminación de Cu de *Eichhornia crassipes* quimiosfera: 52, 1499-1503.

Shabanet, W.; Rmali, A.; Harrington, C.F.; Ayub, M.; Parvez, I.; Haris, I. (2005); Un enfoque basado en biomateriales para la eliminación de arsénico del agua. *Revista de monitoreo ambiental*: 7, 279-282.

Torres G., 2011. Evaluación de la planta lemna minor como biorremediadora de aguas contaminadas con mercurio

Vásquez, 2015. Estudio de biorreactor de membrana para el tratamiento de aguas residuales.

Zayed, A. 1998. Fitoacumulación de oligoelementos por humedales. Revista de Calidad Ambiental. 27 (3): 715-721

Zambrano, J. 1974. Las malezas acuáticas. Revista de la Facultad de Agronomía (LUZ). 2 (4): 87-94.

Zambrano A, Garcia M, 2013. Determinación de sólidos totales, suspendidos, sedimentados y volátiles, en el efluente de las lagunas de oxidación situadas en la parroquia colón, cantón portoviejo, provincia de Manabí, durante el período de marzo a septiembre 2013.