

Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Facultad de Química y Farmacia

Departamento de Ingeniería Química



TRABAJO DE DIPLOMA

**Diseño de un humedal subsuperficial horizontal para el
tratamiento de las aguas residuales oleosas en la Central
Eléctrica fuel oil Santa Clara Industrial "Los Alevines"**

Autora: Yeniffer de la Caridad Díaz Morales

Tutores: Dra. Maira María Pérez Villar

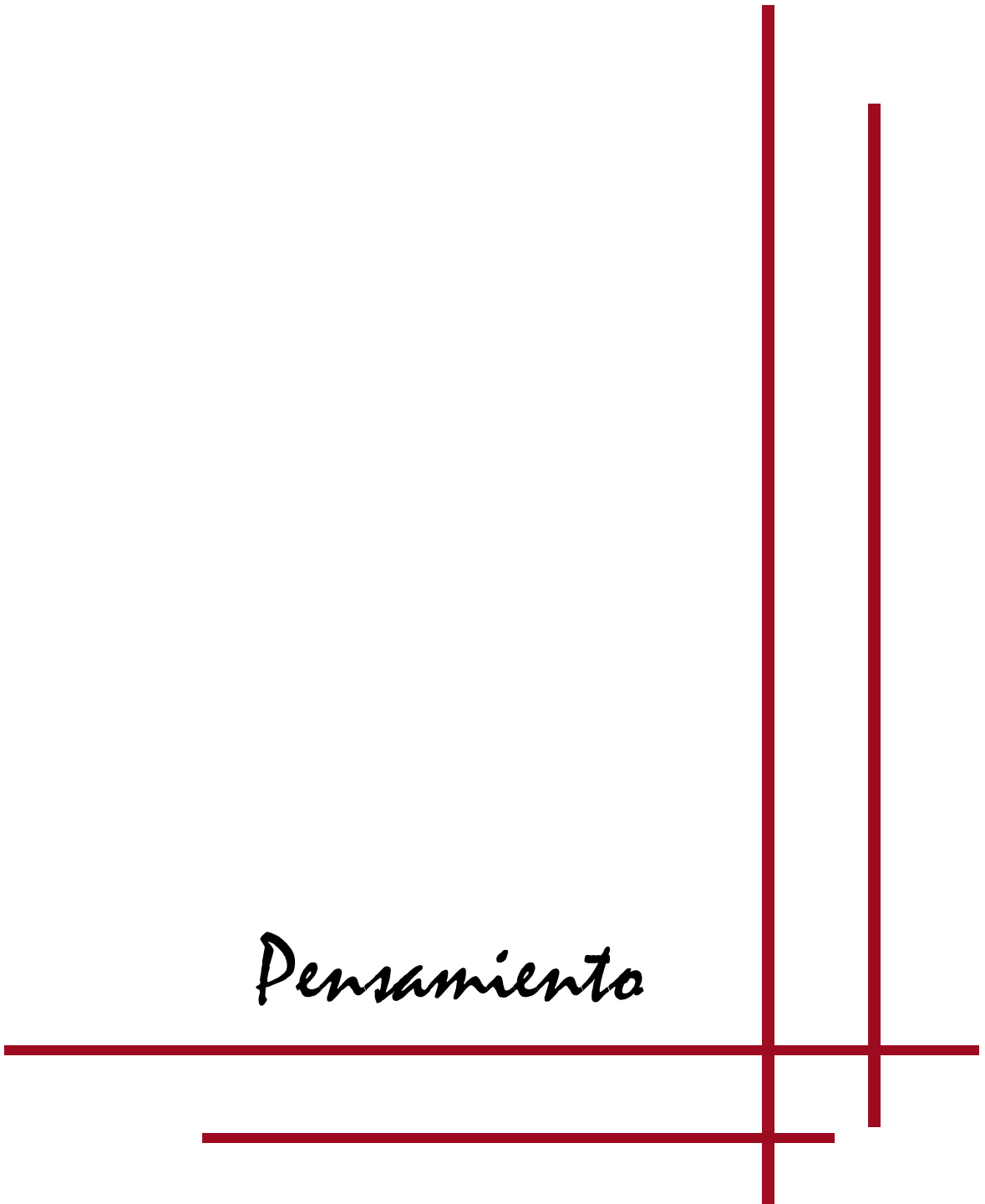
MSc. Pastora de la Concepción Martínez Nodal

Consultante: Ing. Yaribey Mayusca González Roche

Año 56 del Triunfo de la Revolución

2014

Pensamiento





Hay que trabajar para enriquecer los conocimientos adquiridos durante los estudios, para saberlos aplicar en la práctica de manera creadora y recordar que la realidad es siempre mucho más rica que la teoría, pero que la teoría es imprescindible para desarrollar el trabajo profesional de un mundo científico.

Fidel Castro Ruz

Dedicatoria



Dedicatoria

*A la persona que siempre ha estado conmigo, mi mamá, por todo el amor que siento
por ella, por ser la fuerza que me inspira cada día.*

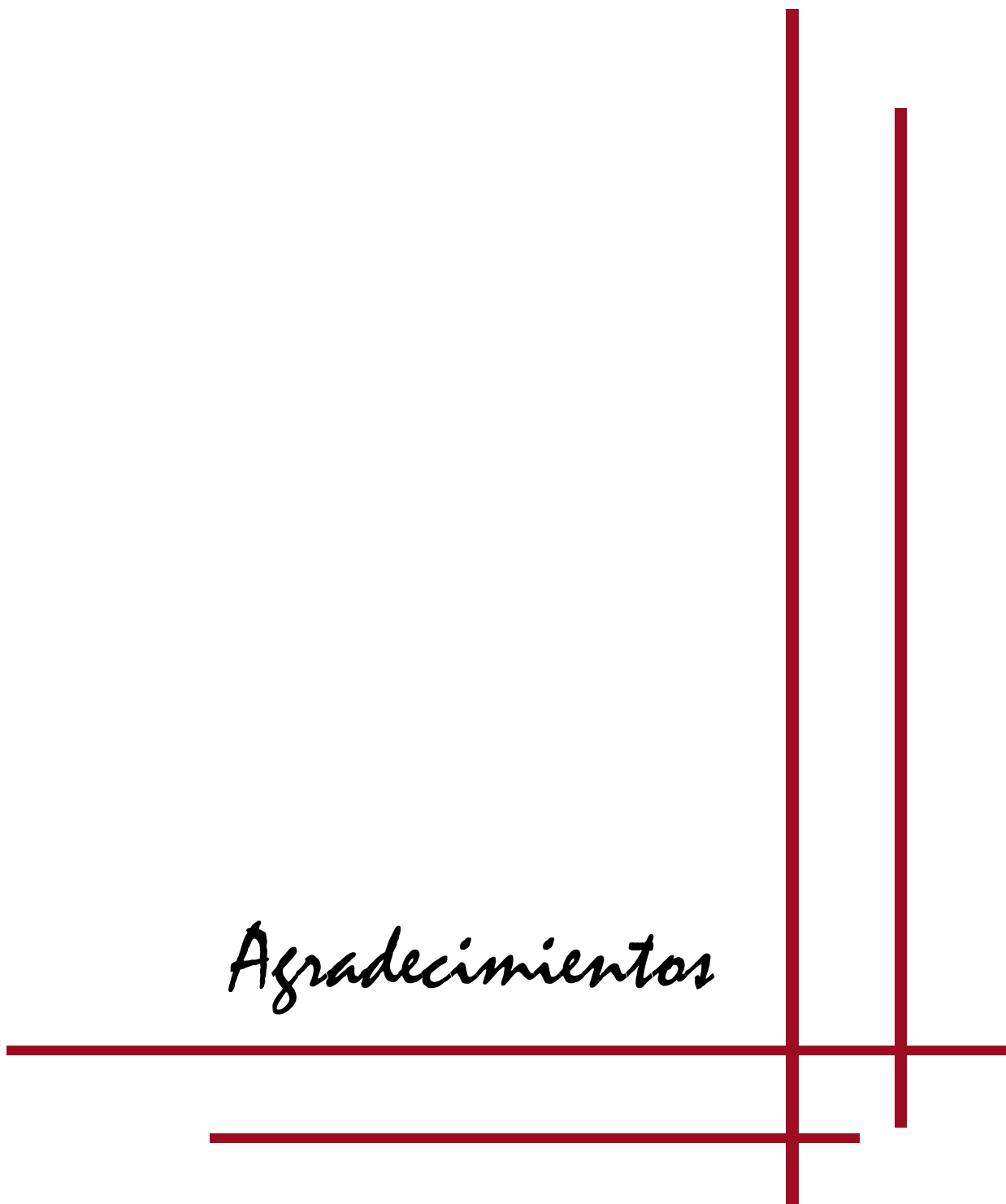
A mi papá, por estar pendiente de mí, por su apoyo y su confianza.

A mis abuelos y tíos, por todo el cariño que siempre me han dado.

*A mi novio Annier por estar siempre a mi lado, por su comprensión, por su apoyo y
porque lo amo con todo mi corazón.*

*A todas mis amistades de la UCLV, en especial Dayami y Elisa, por su apoyo y
sobre todo por su incondicional amistad.*

Agradecimientos



Agradecimientos

A mi mamá, que lo deja todo para ayudarme, aunque sea un capricho, a veces hasta egoísta por mi parte, para ella es está carrera.

A mi papá, que aunque esté lejos siempre me ha recordado que todo en la vida requiere sacrificio.

A mis tutoras Dra. Maira María Pérez y MSc. Pastora Martínez por su dedicación, paciencia y preocupación constante, sin escatimar incluso sus horas de descanso en el asesoramiento de mi trabajo.

A todos los profesores que durante estos cinco años han colaborado en mi formación como profesional.

A mi familia por su apoyo constante, a mis tíos, abuelos y mi suegra, por contar siempre con ellos.

A Annier por ser mi apoyo y fuente de amor en toda ocasión.

A Elisa, Dayami, Alianny y Edenny por haberme brindado su amistad incondicionalmente.

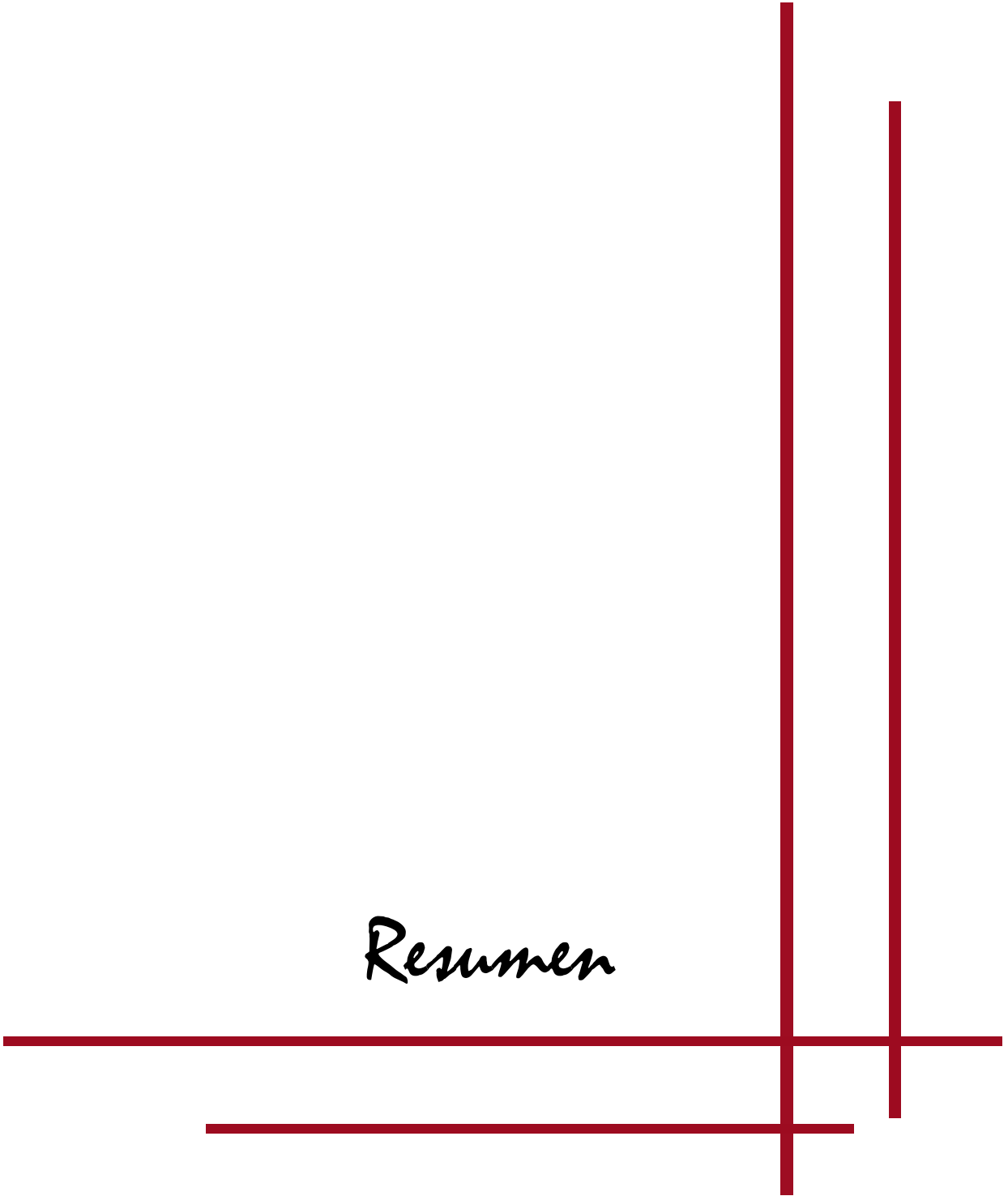
A todos mis compañeros de aula por compartir tanto los buenos como los malos momentos durante estos inolvidables cinco años.

A Mayusca, por su preocupación y por acompañarnos en cada paso de la investigación.

A todas las personas que de una forma u otra me ayudaron en la realización de este trabajo.

A todos, muchas gracias

Resumen



Resumen

Resumen

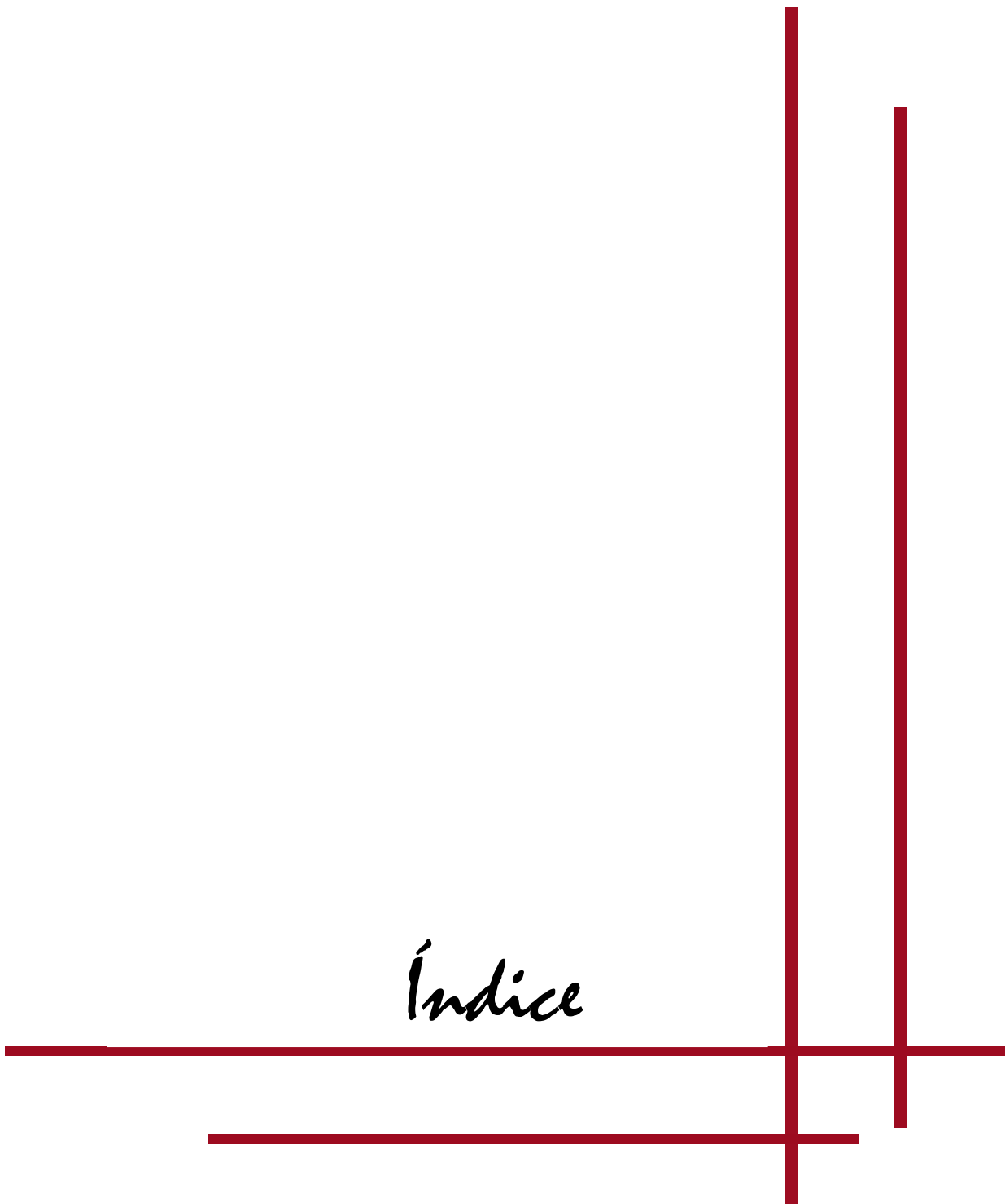
El presente trabajo está encaminado a diseñar un humedal subsuperficial horizontal para el tratamiento de las aguas oleosas en la Central Eléctrica fuel oil Santa Clara Industrial “Los Alevines”. Primeramente, se evaluó un humedal experimental a escala de laboratorio, el cual presentó eficiencias de remoción de DQO mayores que 77% y de grasas y aceites por encima de 87%. Se obtuvo el modelo cinético para la remoción de DQO, siendo el modelo de saturación el que mejor se ajustó a los datos experimentales obtenidos y obteniéndose las constantes de dicho modelo ($K=138,9$ mg/Lh y $k=4,06$ mg/L). Con las constantes obtenidas se realizó el diseño de un humedal subsuperficial horizontal para el tratamiento de las aguas residuales de la Central Eléctrica, colocado después de un tratamiento primario ya existente en la entidad. Se obtuvo un área necesaria para la remoción de DQO de 60 m^2 , proponiéndose dos celdas de 1,5 m de ancho por 20 m de largo. Finalmente se realizó la evaluación económica del sistema propuesto, demostrándose la factibilidad del mismo con un VAN de \$53 452 y una TIR de 91%, recuperándose la inversión antes de los dos años de la puesta en funcionamiento.

Abstract

Abstract

The present research is focus to design of a horizontal subsurface wetland for the treatment of oil waters in the plant for generating electric power “Santa Clara Industrial Los Alevines”. First, an experimental laboratory-scale wetland was evaluated, which presented COD removal efficiencies greater than 77% and fats and oils removal efficiencies above 87%. Kinetic model for COD removal was obtained, the saturation model which best fit the experimental data and was obtained the model constants ($K = 138.9 \text{ mg / L h}$ and $k = 4.06 \text{ mg / L}$). The design of a horizontal subsurface flow wetland for oil wastewater treatment in the plant for generating electric power was carried out, using the constants obtained in experimental laboratory-scale wetland; the wetland was placed after an existing primary treatment in the plant. Area required for COD removal of 60 m^2 was obtained, proposing two cells of 15 m width by 20 m length. Finally an economic assessment of a proposed system was performed, indicating the viability of the same one, with a VAN of \$53 452 and a TIR of 91%. The investment can recover before two years of operation.

Índice



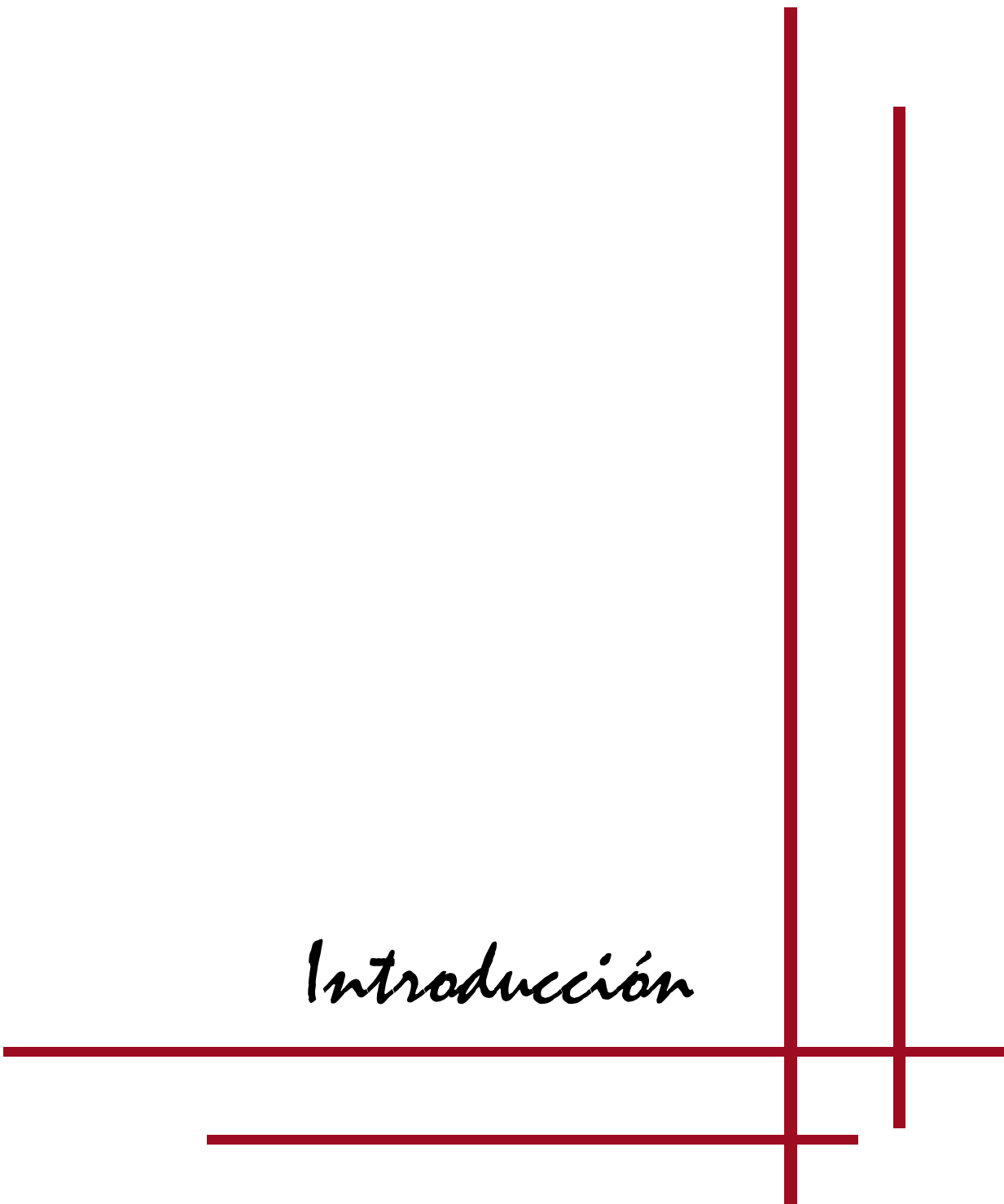
Índice

Introducción	1
Capítulo I: Revisión Bibliográfica	4
1.1 Las aguas residuales oleosas	4
1.1.1 Características	4
1.1.2 Escenario actual para el tratamiento de las aguas oleosas	4
1.1.3 Sistemas de tratamiento existentes	5
1.2 Humedales subsuperficiales	9
1.2.1 Características	9
1.2.2 Clasificación	10
1.2.3 Ventajas e inconvenientes de los humedales	10
1.2.4 Mecanismos de remoción	11
1.2.5 Componentes	14
1.2.6 Criterios de diseño	19
Conclusiones Parciales	23
Capítulo II: Evaluación y estudio cinético del tratamiento de aguas oleosas con humedal subsuperficial horizontal	24
2.1 Descripción del proceso de centrifugación y sistema de tratamiento de las aguas oleosas en la CE fuel oil Santa Clara Industrial “Los Alevines”	24
2.1.1 Descripción del sistema experimental	25
2.2 Estudios de la cinética de remoción de DQO en aguas residuales oleosas empleando humedal subsuperficial horizontal como tratamiento secundario	28
2.2.1 Evaluación del comportamiento del humedal subsuperficial horizontal en la remoción de DQO en las aguas oleosas durante el período de estabilización	28
2.2.2 Estudio cinético de la remoción de DQO en el humedal subsuperficial horizontal ..	30
Conclusiones Parciales	35
Capítulo III: Diseño del humedal subsuperficial horizontal	36

Índice

3.1	Diseño del sistema de tratamiento	36
3.1.1	Parámetros de diseño del humedal	37
3.1.2	Dimensionamiento del humedal	37
3.2	Evaluación económica del sistema propuesto	40
3.2.1	Costo de inversión	40
3.2.2	Costo de operación	40
3.2.3	Ingresos, considerando las externalidades	40
3.2.4	Análisis de los indicadores dinámicos de rentabilidad	41
	Conclusiones Parciales	43
	Conclusiones	44
	Recomendaciones	45
	Bibliografía	46
	Anexo A	51

Introducción



Introducción

Introducción

En el ámbito mundial, existe un sin número de estudios que nos proporcionan datos alarmantes acerca del impacto negativo que el hombre ocasiona a los recursos hídricos en todo el planeta, sobre todo en este último siglo, el cual se ha caracterizado por la sobrepoblación y el gran crecimiento tecnológico que amenazan seriamente la dotación del recurso agua para las futuras generaciones, ocurriendo un incremento de la contaminación de los cuerpos receptores debido al manejo inadecuado de las aguas residuales de origen urbano, industrial y agrícola, por lo que la depuración de las mismas es una necesidad imperiosa de la sociedad moderna.

Las tecnologías convencionales que han sido desarrolladas en los países desarrollados, pueden ser muy eficientes en cuanto a calidad de los efluentes producidos pero en cuanto a los costos, tanto de inversión como de operación son altos, por lo cual se impone la necesidad de desarrollar sistemas de tratamiento sostenibles.

La escasez y mala calidad del agua ponen en peligro la salud, el bienestar social y económico, la seguridad alimentaria y la diversidad biológica. Además, agrava las tensiones y conflictos, tanto dentro como entre las naciones. A la escasez de agua hay que sumar, como problema, su contaminación. La contaminación del agua es uno de los problemas más graves con los que se enfrenta la civilización actual y las principales fuentes resultan ser urbanas, industriales y agrícolas. La escasez y el mal uso del agua constituyen un problema ambiental global al que la comunidad internacional le dedica atención. El agua además es considerada un portador energético, por lo que se priorizan todas aquellas acciones que contribuyan a su uso más ecológico, que incluyen racionalidad y calidad, incluidas dentro del proyecto de lineamientos socio económicos de Cuba 2010 para fomentar el desarrollo sostenible.

En Cuba a pesar de que existe voluntad política de minimizar la carga contaminante en los residuos líquidos y de depurar las aguas, fundamentalmente las potables, aún no existe institucionalización o generalización del tratamiento y gestión de dichos residuos (final del tubo), constituyendo el factor económico una de las limitantes principales. Del mismo modo las limitaciones económicas y la poca experiencia en esta especialidad no han propiciado un desarrollo acelerado o proporcional a nuestras expectativas sobre Producción Más Limpia (PML) que disminuiría considerablemente la generación de aguas residuales y consecuentemente los impactos negativos al cuerpo receptor.

Las acciones de PML para ahorrar y tratar el agua de uso industrial en el área donde se consume o utiliza, así como su adecuado tratamiento al final del proceso productivo o servicio realizado como agua residual es muy importante tanto para la salud y preservación de las

Introducción

especies como para que las comunidades alcancen un nivel satisfactorio de desarrollo sostenible, sin poner en riesgo la satisfacción de necesidades y aspiraciones de las generaciones futuras.

Es bueno recordar que *“el aumento de la población y de las actividades productivas que usan agua ha generado una mayor demanda por el vital elemento, y ya se registran conflictos por la cantidad y calidad del agua entre diversos usos, tales como abastecimiento de agua potable, riego, hidroelectricidad, uso industrial, recreación, conservación de la vida acuática y otros”*. Hoy día existe la tendencia a no estudiar los residuales al “final de la tubería”, sino emprender un estudio que permita su segregación y minimización e inclusive la obtención de subproductos y recirculación del agua tratada.

La generación eléctrica de nuestro país se obtiene actualmente, mediante Grupos Electrógenos (GE) o Centrales Eléctricas (CE) de fuel oil y diésel, dadas las ventajas que los mismos tienen sobre las termoeléctricas tradicionales en cuanto a: mayor disponibilidad, rapidez para entrar al servicio y menor consumo de combustible. Es importante considerar en la utilización de los GE o CE no solo los beneficios que estos representan, sino también las desventajas ambientales que pueden tener los mismos, si no son consideradas todas las medidas correspondientes.

Las CE HYUNDAI que operan con fuel oil, no son más que motores de combustión interna que funcionan con combustible líquido, que durante su funcionamiento generan emisiones, las que deben ser tomadas en consideración cuando se desea evaluar el efecto de las mismas sobre el medio ambiente. La calidad del combustible es de suma importancia para obtener parámetros óptimos de combustión y con ello una larga vida operativa del motor, operación más eficiente y emisiones de gases de escape menos contaminantes. Para lograr la calidad del combustible utilizado en la generación de energía eléctrica, es necesario someterlo a un proceso de purificación, con el objetivo de eliminar las impurezas mecánicas, agua y partículas mediante el proceso de centrifugación.

En estas CE producto del lavado del combustible utilizado como principal materia prima para la generación de energía eléctrica, se genera un residual líquido (aguas residuales oleosas) con alto contenido de grasas, aceites e hidrocarburos, por lo que son *considerados residuos tóxicos y peligrosos*, los cuales deben ser tratados de forma adecuada y segura para evitar posibles daños al suelo, a las aguas superficiales, subterráneas y a la población en general, en caso de derrames o vertimientos sin la calidad requerida, según lo establecido en la legislación vigente.

Introducción

En investigaciones recientes se ha demostrado que el uso de tratamientos naturales como son los humedales, donde se observan procesos físicos, químicos o biológicos, han reportado resultados significativos en la depuración de estas aguas.

Problema Científico:

Las aguas oleosas generadas como residual por la Central Eléctrica fuel oil Santa Clara Industrial “Los Alevines”, actualmente cuenta con un sistema de tratamiento primario que no garantiza la calidad de las mismas para ser vertidas al medio ambiente en correspondencia con los estándares vigentes.

Para darle solución a este problema se plantea la siguiente hipótesis:

Hipótesis:

Es posible minimizar la carga contaminante de las aguas residuales oleosas generadas en la Central Eléctrica fuel oil Santa Clara Industrial “Los Alevines” si se implementa un humedal subsuperficial horizontal como tratamiento secundario.

En correspondencia con lo planteado se define como objetivo general del trabajo el siguiente:

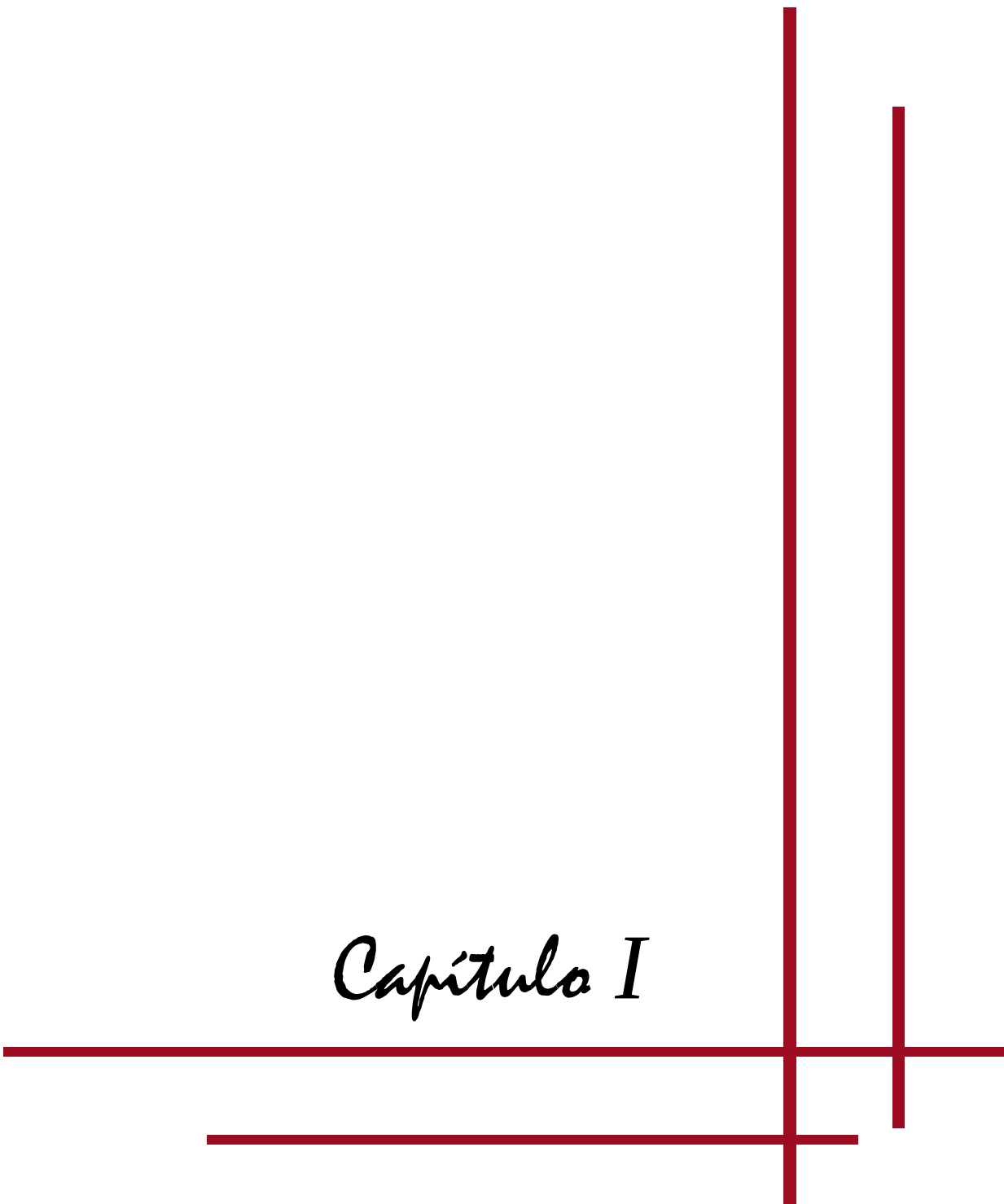
Objetivo General:

Diseñar un humedal subsuperficial horizontal como tratamiento secundario para las aguas residuales oleosas generadas en la Central Eléctrica, Santa Clara Industrial que opera con fuel oil.

Objetivos específicos:

1. Confeccionar una reseña bibliográfica crítica que permita sustentar teóricamente la investigación.
2. Evaluar a escala de laboratorio el comportamiento en la remoción de DQO y grasas, aceites e hidrocarburos mediante humedales subsuperficiales horizontales como tratamiento secundario.
3. Obtener los modelos y constantes cinéticas de la remoción de DQO de las aguas oleosas con humedales subsuperficiales horizontales.
4. Diseñar un humedal subsuperficial horizontal piloto para la Central Eléctrica, Santa Clara Industrial que opera con fuel oil.
5. Realizar una evaluación económica del sistema propuesto.

Capítulo I



Capítulo I: Revisión Bibliográfica

Capítulo I: Revisión Bibliográfica.

1.1 Las aguas residuales oleosas.

1.1.1 Características.

Las aguas oleosas provienen de diversas fuentes y varían ampliamente en la composición y propiedades físicas. Un factor común en ellas, es que contienen tanto aceite como impurezas, gruesas y finas, que forman una emulsión estable, la cual en ocasiones dificulta el trabajo con estos materiales. En las Centrales Eléctrica (CE) que operan con diésel y fuel oil, las aguas oleosas son el residuo líquido que se genera en el proceso de centrifugación del combustible. El objetivo de esta operación es eliminar las impurezas mecánicas, el agua y partículas que se incorporan durante el almacenamiento y transporte del mismo. Es por ello, que la centrifugación es una de las etapas fundamentales en la generación de energía eléctrica porque las máquinas o motores de combustión interna utilizados, requieren combustible de muy alta calidad para obtener parámetros óptimos de combustión y con ello una larga vida operativa del motor, operación más eficiente y emisiones de gases de escape menos contaminantes. **(Martínez, 2010).**

Las aguas oleosas están formadas por dos fases fundamentales bien definidas: fase combustible y fase agua. La fase agua presenta una turbidez y color característico debido a las impurezas y trazas de combustible que se encuentran en el interior de la centrífuga las cuales son arrastradas en los lavados realizados con agua tratada en caliente a presión. La turbidez va desapareciendo a medida que transcurren los días, evidenciándose que existe una emulsión poco estable formada por agua-combustible, que con el tiempo por difusión se tributa a la fase combustible. La fase combustible es de gran importancia por ser un recurso no renovable, cuyo calor de combustión supera el de los minerales combustibles sólidos como: carbón, esquitos, turba, etc., es por ello que la misma debe ser recuperada para su reutilización en diferentes procesos, de acuerdo a las especificaciones de calidad requeridas para los mismos. **(Martínez, 2010).**

1.1.2 Escenario actual para el tratamiento de las aguas oleosas.

Como se conoce las aguas oleosas son consideradas un residuo tóxico y peligroso, por lo que deben ser tratadas de forma adecuada para evitar daños al medio ambiente, de ahí la necesidad entonces de asegurar sistemas de tratamiento que eliminen o al menos reduzcan lo mejor posible la presencia de estos contaminantes en las mismas, desarrollándose para ello métodos basados en las características físicas o químicas que puedan presentar o los posibles compuestos que puedan originar al combinarse con otras sustancias de desecho.

Capítulo I: Revisión Bibliográfica

En Cuba, existen complejos sistemas de tratamiento de aguas residuales oleosas que requieren un área grande de emplazamiento, como es el caso de la Refinería de Cienfuegos. Existen además otros sistemas de tratamiento primario más sencillos y económicos para la separación de aguas-lodos-fuel oil (separadores API, PPI, CP), pero que requieren también grandes áreas para su instalación. Por último se encuentran los filtros verticales semiautomáticos con apoyo de skimmers, aplicados en Empresas Comercializadoras de Combustibles, los cuales resultan muy costosos.

En nuestro país las Centrales Eléctricas (CE) que operan con diésel, las aguas oleosas y son almacenadas en un tanque recolector sin tratamiento alguno. En las CE que operan fuel oil las aguas oleosas provenientes de la etapa de centrifugación se depositan en un tanque colector (tanque de lodo) donde ocurre la separación de las dos fases (agua y combustible) por decantación como tratamiento primario. La fase agua pasa por un sistema trampas de grasa (tratamiento secundario), para luego ser vertidas al medio ambiente, no presentando los índices de calidad requeridos por las normas cubanas vigentes. Por último la fase combustible (lodo) es recolectada por CUPET para su disposición final.

1.1.3 Sistemas de tratamiento existentes.

El objetivo más importante del tratamiento de las aguas residuales es la eliminación de la materia orgánica, pues cuando se vierten directamente al medio sin depurar las bacterias que contienen son responsables de la degradación que se aprecia en las corrientes de agua receptoras.

Sobre los tratamientos la literatura especializada en tecnologías **(Degremot, 1979); (Germain, 1982); (Metcalf and Eddy, 1995); (Servín, 2000)** coinciden en que estos, pueden ponerse en juego por separados o conjuntamente, pudiendo usarse desde sencillos procesos físicos como la sedimentación, en la que se deja que los contaminantes se depositen en el fondo por gravedad, hasta complicados procesos químicos y biológicos.

a) Físicos

Son los métodos de tratamiento en los cuales predomina la aplicación de fuerzas físicas, dentro de los cuales se encuentran: el cribado y desmenuzado, desarenado, mezclado, sedimentación, flotación y filtración. **(García y Col, 2001)**

b) Químicos

Son los métodos de tratamiento en los cuales la disminución o conversión de los contaminantes es provocado por la adición de productos químicos o por las reacciones químicas como: la

Capítulo I: Revisión Bibliográfica

precipitación, transferencia de gases, adsorción, neutralización, reacciones de oxidación reducción, intercambio iónico y la desinfección. **(García y Col, 2001).**

c) Biológicos

Son los métodos de tratamiento en los cuales se consigue la eliminación de contaminantes por medio de la actividad biológica. Este tipo de tratamiento es usado para eliminar las sustancias biodegradables del agua residual. Los más común usados son: los filtros rociadores, lodos activados, lagunas de estabilización, lagunas aireadas y zanjas de oxidación. **(García y Col, 2001).**

Típicamente, el tratamiento de aguas residuales es alcanzado por la separación física inicial de sólidos de la corriente de aguas, seguido por la conversión progresiva de materia biológica disuelta en una masa biológica sólida usando bacterias adecuadas, generalmente presentes en estas aguas. Una vez que la masa biológica es separada o removida, el agua tratada puede experimentar una desinfección adicional mediante procesos físicos o químicos. Este efluente final puede ser descargado o reintroducido de vuelta a un cuerpo de agua natural (corriente, río o bahía) u otro ambiente (terreno superficial o subsuelo) etc., o reutilizado en operaciones tecnológicas o procesos, como se explicó anteriormente. Los sólidos biológicos segregados experimentan un tratamiento y neutralización adicional antes de la descarga o reutilización apropiada. Estos procesos de tratamiento son típicamente referidos a un:

- Tratamiento primario (asentamiento de sólidos).
- Tratamiento secundario (tratamiento biológico de sólidos flotantes y sedimentados).
- Tratamiento terciario (pasos adicionales como lagunas, micro filtración o desinfección).

Las unidades de tratamiento pueden ser individuales o colectivas, diseñadas para un solo tipo de residuos o multipropósito en las que es posible el tratamiento de una variedad de residuos. Estas últimas son las de mayor complejidad pues requieren de una completa y versátil infraestructura capaz de tratar en forma eficiente residuos de muy diversas características. Estas deben ser diseñadas contemplando las posibilidades de disposición final para los residuos resultantes del tratamiento, ya que se trata de procesos de transformación. Todo sistema de gestión debe garantizar una disposición ambientalmente adecuada, viabilizando todo el tratamiento.

El sitio donde se lleva a cabo el proceso de tratamiento de las aguas residuales se llama Planta de tratamiento de aguas residuales. El diagrama de flujo de una planta de tratamiento de aguas residuales es generalmente el mismo en todos los países, aunque existen especificidades en la

Capítulo I: Revisión Bibliográfica

composición de su equipamiento, teniendo en cuenta las características y complejidad del proceso tecnológico-generación del residuo y el desarrollo socio económico imperante.

Se conoce (autores y bibliografía diversa) que existen diferentes métodos y aplicaciones de tratamiento de aguas oleosas industriales, aunque no específicamente sobre el tratamiento de efluentes acuosos provenientes de pequeños emplazamientos. Por lo general los sistemas de tratamiento de las aguas oleosas reconocidos responden a entidades de perforación, extracción y refinación de petróleo, donde se utilizan y procesan grandes volúmenes de agua e hidrocarburos respectivamente y en correspondencia se generan grandes cantidades de residuos de procesos y efluentes acuosos oleosos.

Dado que el Petróleo Crudo (C_5H_{12}), combustibles derivados, grasas y aceites son viscosos y menos densos que el agua, estos tienden a depositarse en la superficie de esta, generando una capa flotante que impide el paso de la luz (radiación solar), fuente fundamental de energía en la biosfera para los procesos biológicos, que implican un intercambio continuo de sustancia y de energía, así como también impide el paso del aire y consecuentemente sólo se producen procesos anaerobios donde la producción de energía es menor, razones por las que este tipo de tratamiento es poco utilizado en el tratamiento de aguas residuales oleosas. También atenta que los lodos residuales que generan estos procesos son petrolizados. Asimismo en dichos efluentes se integran sustancias de difícil degradación biológica. En el tratamiento de aguas residuales oleosas se utiliza por lo general tratamiento físico o físico-químico.

En el caso de las aguas residuales oleosas el **tratamiento primario** se realiza para reducir hidrocarburos, aceites, grasas, lodos petrolizados y metales pesados disueltos que en las grandes industrias se realiza con maquinaria, de ahí conocido también como tratamiento mecánico, pero que no es viable en el caso de pequeñas industrias y talleres de transporte donde son más factibles los métodos de sedimentación-decantación, separación por gravedad y otros más sencillos. **(Servín, 2000).**

Una vez eliminados de un 40 a un 60% los sólidos en suspensión, reducida de un 20 a un 40% la DBO y de un 60 a un 99 % las sustancias oleaginosas, por medios físicos en el tratamiento primario, el **tratamiento secundario** reduce en el agua la cantidad de materia orgánica, las trazas de aceites, olores, colores, metales pesados y compuestos no aptos para su destino final, que difiere en tecnología según calidad de agua requerida para ser reutilizada o vertida al cuerpo receptor. **(Chudoba, 1986).**

Capítulo I: Revisión Bibliográfica

En el caso del tratamiento de aguas residuales oleosas, el proceso secundario recomendable sería el filtrado con diferentes tipos de materiales filtrantes porosos, combinado con procesos de sorción utilizando sorbentes como: carbón activado, bagazo de caña natural, aserrín de madera, etc. Los métodos no convencionales como los procesos biológicos facilitan que las bacterias aerobias digieran la materia orgánica que contiene las aguas.

(Izquierdo, 2013) demuestra la existencia de materiales capaces de adsorber el diésel presente en las aguas residuales oleosas, como ejemplo de estos productos tenemos el bagazo de caña de azúcar, utilizado como biosorbente por ser un residuo de la industria azucarera, su alta disponibilidad y bajo costo.

Los humedales subsuperficiales pueden ser utilizados como tratamiento secundario para este tipo de aguas residuales, ya que permiten tanto el proceso físico de filtración a través de su medio poroso, como los procesos biológicos que se desarrollan por la película microbiana presente en el medio poroso y las raíces de las plantas. **(Blanco, 2009 y Col)**, obtuvieron eficiencias de remoción considerables con el empleo de humedales construidos de flujo subsuperficiales para el tratamiento de aguas oleosas utilizando un medio poroso con plantas emergentes en sistemas experimentales a escala de laboratorio. Los resultados obtenidos demostraron que estos sistemas son eficientes y factibles para el tratamiento de dichas aguas residuales.

Dependiendo del grado de purificación que se quiera se realizan **tratamiento terciario** como: físicos, químicos y biológicos especiales con los que se consigue eliminar los contaminantes que han pasado las etapas anteriores (nutrientes) y los microorganismos patógenos. **(<http://www.mediambiente.geoscopio.com>)**

En el caso del tratamiento de aguas residuales oleosas, pueden ser utilizados los humedales subsuperficiales, ya que estos métodos de tratamiento se emplean tanto como tratamiento secundario como terciario

(Izquierdo, 2013) obtuvo altas eficiencias de remoción de contaminantes presentes en las aguas residuales oleosas con el empleo de humedales de flujo subsuperficial con fitorremediación debido a la actividad de las plantas y la transformación microbiana que en ellos ocurre, los cuales logran reducir la concentración o peligrosidad de los diversos tipos de contaminantes.

Si se pretende la reutilización del agua residual, la desinfección por tratamiento con ozono es considerada el método más fiable, excepción hecha de la cloración extrema, aunque el ozono

se produce in situ y en el momento de usarse, requiriéndose de costosos equipos generadores para el tipo de tratamiento que evalúa esta tesis. Es probable que en el futuro se generalice el uso de estos y otros métodos de tratamiento de residuos a la vista de los esfuerzos que se están haciendo para conservar el agua mediante su reutilización.

En el caso de las aguas residuales oleosas que serán estudio en esta tesis, el sistema de tratamiento escogido es un humedal subsuperficial con medio poroso de grava y plantas emergentes tanto como tratamiento secundario como terciario.

1.2 Humedales subsuperficiales.

Se incluyan entre los llamados sistemas naturales de tratamiento. En estos sistemas los contaminantes presentes en las aguas residuales son removidos por una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que se efectúan en el ambiente natural, entre estos procesos se encuentran la sedimentación, la adsorción a las partículas del suelo, la asimilación por las plantas y la transformación microbiana. **(Watson y Col, 1989); (Brix, 1993)**

Los humedales pueden construirse donde se necesitan y dimensionarse de acuerdo a las necesidades del tratamiento. Han demostrado ser altamente eficientes en la remoción de contaminantes, flexibles a fluctuaciones de la carga del contaminante y el caudal, son de bajo costo de instalación y de mantenimiento, son operables por mano de obra no especializada, amigable con el entorno y además ofrecen beneficios recreacionales y estéticos. **(Jenssen y Col, 1993); (De Luís Calabuig, 2001); (Perdomo y Col, 2000).**

1.2.1 Características.

Los humedales con flujo subsuperficial son estanques o canales con el fondo generalmente impermeable sobre el cual se coloca un medio poroso que puede ser suelo, arena o grava en el que se siembran las plantas emergentes. En este caso como su nombre indica el agua tiene una circulación tipo subterráneo a través de un medio granular (generalmente impermeable sobre el cual se coloca un medio poroso que puede ser suelo, arena o grava) y en contacto con las raíces y rizomas de las plantas. Este tipo de humedales puede ser construidos con flujo horizontal subsuperficial, en el que el medio poroso se mantiene saturado por el agua, o con flujo vertical en el que el medio poroso no se encuentra saturado debido a que el agua se aplica usualmente sobre la superficie del lecho a intervalos de tiempo, lo que permite que el agua percole a través del medio, de forma similar a lo que sucede en un filtro de arena intermitente.

1.2.2 Clasificación.

Los humedales de flujo subsuperficial se clasifican según el sentido de circulación del agua en horizontales o verticales.

- **Horizontales.**

En ellos el agua circula horizontalmente a través del medio granular y los rizomas y raíces de las plantas. La profundidad del agua es de entre 0,3 y 0,9 m. Se caracterizan por funcionar permanentemente inundados (el agua se encuentra entre 0,05 y 0,1 m por debajo de la superficie) y con cargas de alrededor de 6 g DBO/m²*día. Están compuestos por: estructuras de entrada del afluente, impermeabilización del fondo y laterales ya sea con láminas sintéticas o arcilla compactada, medio granular, vegetación emergente típica de zonas húmedas, y estructuras de salida regulables para controlar el nivel del agua. La barrera impermeable es necesaria para confinar al sistema y prevenir la contaminación de las aguas subterráneas. Los humedales requieren una buena repartición y recogida de las aguas para alcanzar los rendimientos estimados, es por ello que las estructuras de entrada y salida deben estar muy bien diseñadas y construidas. La recogida del agua efluente se realiza con una tubería perforada asentada sobre el fondo del humedal. (**Mesa, 2007**).

- **Verticales.**

Puede decirse que son una alternativa de los de flujo horizontal. Los sistemas verticales se combinan con horizontales para que los procesos de nitrificación y desnitrificación se sucedan de forma progresiva y se consiga eliminar el nitrógeno. En estos humedales la circulación es tipo vertical y tiene lugar de manera tal que el medio granular no esté permanentemente inundado. Tienen una mayor capacidad de tratamiento que los horizontales (requieren menos superficie para tratar una determinada carga orgánica). Están constituidos por los mismos elementos que los horizontales: estructuras de entrada del afluente, impermeabilización, medio granular, vegetación y estructuras de salida. Adicionalmente suelen incluir tuberías de aireación. Los aspectos relacionados con la impermeabilización y la vegetación son idénticos a los descritos para los sistemas horizontales. (**Lahora C., 2007**).

1.2.3 Ventajas e inconvenientes de los humedales.

En general, los sistemas naturales de depuración de aguas residuales como los humedales presentan una serie de ventajas e inconvenientes.

Entre las ventajas se pueden destacar:

- La eliminación eficaz de patógenos. Esto permite preservar la calidad sanitaria de las aguas superficiales, subterráneas y marinas. Son métodos especialmente útiles en zonas ambientalmente sensibles o donde se requiera reutilizar las aguas residuales. **(Seoanez, 1995).**
- La economía de funcionamiento, debido a que emplean formaciones naturales o suelos aportados como sustrato depurador.
- La velocidad de remoción en los sistemas con flujo subsuperficial es mayor debido a que el medio poroso brinda mayor área superficial para el crecimiento de los microorganismos.
- No se presentan problemas con el desarrollo de los mosquitos y otros vectores debido a que el agua en estos sistemas fluye por debajo de la superficie del medio, además de proporcionar protección térmica, lo que hace que estos sistemas puedan ser utilizados en lugares donde ocurran grandes nevadas. **(Reed et al., 1995).**
- Se caracterizan, en general, por su escasa necesidad de personal de mantenimiento, consumo energético reducido y baja producción de fangos. **(Castro, 2003)**

Entre los inconvenientes se encuentran:

- La necesidad de espacio, las nuevas tecnologías están permitiendo reducir esta necesidad.
- El costo del medio de soporte utilizado, así como su traslado y colocación.
- La posibilidad de contaminar el medio si no se gestiona adecuadamente o no se ha elegido cuidadosamente el emplazamiento. Se suele caer en la tentación de emplear estos sistemas de depuración por encima de su capacidad real, lo que redundaría en perjuicios evidentes para el medio. Estos sistemas son especialmente sensibles, pues en muchas ocasiones siguen la ley del todo o nada cuando se supera su capacidad. **(Salgot, 1996).**

1.2.4 Mecanismos de remoción.

En los humedales construidos la remoción de los contaminantes presentes en las aguas residuales es llevado a cabo por una variedad de complejos procesos físicos, químicos y biológicos, que en la mayoría de los casos ocurren simultáneamente.

- **Remoción de Sólidos Suspendidos.**

Capítulo I: Revisión Bibliográfica

Son removidos fundamentalmente en las unidades de pretratamiento, las cuales usualmente se instalan delante de los humedales. Los sólidos suspendidos que permanecen en el agua residual después del pretratamiento son removidos por sedimentación y filtración. Estos procesos que son puramente físicos también eliminan una porción significativa de otros contaminantes presentes en las aguas residuales (DBO, nutrientes, patógenos). La remoción de los sólidos suspendidos es muy efectiva tanto en los humedales con flujo superficial como subsuperficial. En el caso de los sistemas con flujo libre la remoción óptima de los sólidos suspendidos solo se logra cuando hay una gran cantidad de plantas, las cuales facilitan la filtración y la sedimentación y evitan el crecimiento de las algas. En los humedales con flujo subsuperficial los mecanismos de remoción son los mismos que en los sistemas con flujo superficial, solo que al no tener zonas abiertas de agua, los problemas de resuspensión por el viento se evitan, por lo que la concentración de los sólidos suspendidos en el efluente, son menores. **(Calderón, 2005); (Solano, 2004)**

- **Remoción de DBO.**

En los humedales construidos la remoción de la DBO soluble y suspendida se lleva a efecto por una serie de mecanismos diferentes. La DBO que se encuentra en forma soluble es removida mediante la degradación biológica realizada por los microorganismos adheridos a la superficie de las plantas y en la columna de agua. En los sistemas con flujo subsuperficial las bajas velocidades que se producen, así como la presencia de las plantas y del medio soporte, hacen que se favorezca la filtración, floculación y sedimentación de la materia orgánica que se encuentra en forma suspendida. Los sólidos orgánicos removidos por sedimentación y filtración, así como la vegetación muerta ejercerán una demanda de oxígeno. La DBO afluente al humedal se remueve rápidamente a medida que el agua avanza en el sistema. Los compuestos orgánicos solubles son (en su mayoría) degradados de forma aerobia; sin embargo, en algunos casos la degradación anaerobia puede ser significativa. El oxígeno necesario para los procesos aerobios puede ser suministrado directamente de la atmósfera por difusión, mediante la fotosíntesis de las plantas en el interior de la columna de agua y cedido desde las raíces de las plantas. **(Folch y Col, 2004)**

- **Remoción de nitrógeno.**

El mecanismo fundamental para la remoción del nitrógeno en los humedales es la nitrificación y desnitrificación debido a que en las aguas residuales la mayor parte del nitrógeno se encuentra en estado reducido, otro mecanismo es mediante la toma de nitrógeno por las plantas pero se considera que mientras no haya cosecha de plantas no hay remoción, no obstante, hay autores

Capítulo I: Revisión Bibliográfica

que señalan que por esta vía solo se puede lograr alrededor del 10% de remoción el agua residual que entra a un humedal, el nitrógeno puede encontrarse en varias formas: nitrógeno orgánico, amoniacal, nitrito y nitrato. El nitrógeno orgánico que entra al humedal lo hace en forma de materia orgánica sólida (generalmente), dicha materia orgánica sufre un proceso de amonificación, el nitrógeno orgánico es transformado a amonio por bacterias heterótrofas las cuales pueden encontrarse en condiciones aerobias o anaerobias, el proceso es más lento bajo condiciones anaerobias. Este amonio liberado y el que contienen las aguas residuales puede encontrarse en dos formas relacionadas: ion amonio (NH_4^+) o como gas amoníaco disuelto (NH_3), el balance entre estas dos formas depende del pH y de la temperatura. En la nitrificación el amonio es oxidado a nitrato por bacterias nitrificantes. Este proceso se efectúa en dos etapas y mediante dos grupos de bacterias. La primera etapa es la oxidación del amonio a nitrito, es llevado a cabo por bacterias del género *Nitrosomonas*, la oxidación posterior de nitrito a nitrato la realiza las bacterias del género *Nitrobacter*.

La nitrificación solo ocurre bajo condiciones aerobias y a concentraciones de oxígeno de 0,3 mg/l. Para que ocurra es necesario que: haya suficiente alcalinidad, una temperatura adecuada y una concentración de materia orgánica por debajo de 20 mg/l, esto último se debe a que es necesario que las bacterias heterótrofas no compitan con las bacterias nitrificantes por el oxígeno. (*Sun, 2007*); (*Stottmeister, 2003*).

En los humedales se ha comprobado que la nitrificación es limitada por la cantidad de oxígeno, teóricamente se requieren 4,6 g de oxígeno para oxidar 1 g de amonio. En el caso de los humedales construidos la cantidad de oxígeno utilizable está directamente relacionado con la aireación atmosférica para los humedales con flujo libre, y con la extensión en la penetración y la eficiencia en la transferencia del oxígeno por las raíces de las plantas, para el caso de los humedales con flujo subsuperficial. Para que ocurra la nitrificación- desnitrificación se necesitan condiciones aerobias y anaerobias. (*Vymazal, 2007*)

- **Remoción de fósforo**

Los mecanismos principales son: la adsorción, formación de complejos, precipitación y toma por las plantas. La remoción de fósforo inorgánico a través de la asimilación por la planta es una vía rápida; por otra parte debido a que la cosecha de las plantas o no se realiza o se hace cada cierto tiempo esto trae como consecuencia que gran cantidad de plantas mueran y gran parte del fósforo sea devuelto al agua por lo que la remoción real es baja.

Capítulo I: Revisión Bibliográfica

La adsorción del fósforo por las partículas del suelo depende de la presencia de hierro, aluminio o calcio en el suelo, así como de la presencia de minerales de arcilla o materia orgánica. Bajo condiciones aerobias y pH entre neutro y ácido el Fe^{3+} se une al fosfato para formar un complejo estable; sin embargo, si el suelo se vuelve anaerobio como resultado de estar inundado, el Fe^{3+} se reducirá a Fe^{2+} lo cual conduce a que la adsorción sea menos fuerte y se libere fosfato. La adsorción del fosfato con el calcio ocurre solamente bajo condiciones entre neutras y básicas; mientras que con el aluminio solo ocurre a pH neutros y ácidos. Además del proceso de adsorción-desorción, el fosfato también puede ser precipitado con hierro, aluminio y ciertos compuestos del suelo. Este proceso el cual incluye la fijación del fosfato a la matriz de minerales de arcilla y la formación de complejos con metales, tiene una velocidad mucho más lenta que el proceso de adsorción, pero no está sujeto a una saturación tan rápida. Otra forma de remoción del fósforo es mediante la acumulación y almacenamiento en la materia orgánica. (***Prochaska, 2006***)

- **Remoción de metales:**

Es semejante a la remoción del fósforo. Entre los mecanismos propuestos se incluyen la adsorción, sedimentación, precipitación química y toma por las plantas. Los metales pueden liberarse durante cierto periodo, los cuales se asocian a cambios en los potenciales redox dentro del sistema. (***Stottmeister, 2003***)

- **Remoción de patógenos:**

Son removidos por adsorción, sedimentación y filtración, debido a que las condiciones ambientales, las cuales no son favorables para el patógeno lo que trae como consecuencia su muerte. En el caso de los humedales con flujo superficial, las radiaciones ultravioletas pueden provocar la muerte de los patógenos. (***CENTA, 2005***)

1.2.5 Componentes

Los principales componentes del humedal que influyen sobre el proceso depurador son los siguientes:

- Las plantas
- El medio soporte.
- Los microorganismos y demás organismos
- El agua

Las plantas.

Capítulo I: Revisión Bibliográfica

En los humedales construidos se han utilizado una variedad de plantas emergentes semejantes a las encontradas en los humedales naturales. Las plantas que con más frecuencia se utilizan son: las espadañas o enneas (*Typha.*), la caña o junquillo (*Phragmites communis*), y los juncos (Juncos), (*Scirpus*) y (*Carex*). **(Silva, 2000)**. Numerosos trabajos hacen referencia a la productividad de las enneas, en medios naturales y en humedales artificiales, documentan que es una especie altamente productiva. En experiencias de fitodepuración se indica una productividad de 13 kg de biomasa total (aérea + sumergida, materia seca) por m² y año. Las extracciones se estiman en función de los contenidos de nutrientes en las distintas fracciones de la planta; pueden llegar a ser del orden de 180 g N/m² y 27 g P/ m². **(Curt, 2006)**.

Existen diferentes criterios en la literatura sobre el papel que juegan las plantas dentro de estos sistemas, aunque todos los autores coinciden en la importancia de las plantas para lograr la depuración de las aguas residuales en los humedales, jugando un papel primordial. Según **(Moreno y Col, 2003)** la vegetación presente proporciona superficies adecuadas para la formación de películas bacterianas, facilita la filtración y la adsorción de los constituyentes del agua residual, permite la transferencia del oxígeno a la columna de agua, y controla el crecimiento de algas al limitar la penetración de la luz solar. Por su parte **(Brix, 1999)** plantea que la función de mayor importancia de las macrófitas en relación con el proceso de tratamiento de las aguas residuales es el efecto físico que ellas producen. Las macrófitas estabilizan la superficie del lecho, proporcionando buenas condiciones para la filtración, y en el caso de los sistemas con flujo vertical previniendo las obstrucciones, además de proporcionar área superficial para el crecimiento de los microorganismos adheridos. Contrariamente a lo que al principio se creía, el crecimiento de las macrófitas en los sistemas con flujo subsuperficial, no incrementa la conductividad hidráulica del medio en los sistemas que utilizan suelo.

(Fernández, 2003) hace referencia que la selección de las especies vegetales se debe realizar de acuerdo a la adaptabilidad de las mismas al clima local, su capacidad de transportar oxígeno desde las hojas hasta la raíz, su tolerancia a concentraciones elevadas de contaminantes, su capacidad asimiladora de los mismos, su tolerancia a condiciones climáticas diversas, su resistencia a insectos y enfermedades y su facilidad de manejo. Además, las plantas ejercen una depuración directa por la absorción de iones contaminantes, tanto metales pesados como aniones eutrofizantes (nitratos y fosfatos principalmente).

Mientras que, **(Silva, 2000)** opina que las plantas acuáticas emergentes proporcionan superficie para el crecimiento de los microorganismos y permiten la filtración y adsorción de los contaminantes presentes en el agua residual, además de inhibir el crecimiento de las algas y

Capítulo I: Revisión Bibliográfica

favorecer la formación de zonas aerobias alrededor de las raíces debido a las características de estas plantas de trastocar el oxígeno desde las hojas hasta las raíces.

Las plantas de los humedales están morfológicamente adaptadas a crecer en los sedimentos saturados de agua en virtud de los espacios internos de aire que ellas presentan para el transporte del oxígeno desde las hojas hasta las raíces. El extenso sistema de lagunas internas, que ellas contienen normalmente, presentan constricciones a intervalos que le permiten mantener una estructura integra y resistir la invasión del agua. Este sistema de lagunas internas, dependiendo de la especie, puede ocupar más del 60% del volumen de tejido total. El movimiento interno del oxígeno hacia las raíces de las plantas no solamente sirve para la demanda de oxígeno que requieren las raíces para su respiración, sino que además permite la formación de una rizosfera oxidada alrededor de las raíces, pues a través de ellas fluye una cierta cantidad de oxígeno creando un ambiente aeróbico, mientras que a su alrededor las condiciones son anóxicas, permitiendo de esta forma la descomposición aerobia de la materia orgánica y el crecimiento de bacterias nitrificantes. Se ha estimado que estas plantas pueden transferir entre 0,02 y 12 gramos de oxígeno por día por cada m² de área superficial del humedal, este rango de valores tan amplio puede deberse a las diferentes técnicas experimentales utilizadas y en cierto modo a las variaciones estacionales.

Las plantas acuáticas de los humedales tales como carrizos, juncos, o enneas, (macrófitas emergentes) están adaptadas a vivir en aguas con elevada carga orgánica, debido principalmente a su sistema natural de aireación de las raíces. Utilizando su propia energía, procedente en última instancia de la energía solar captada por fotosíntesis, estas plantas son capaces de enviar el oxígeno hasta sus raíces a través de un sistema conductor muy especializado. Esto favorece la degradación de la materia orgánica del entorno de las raíces por medio de los microorganismos que viven asociados al sistema radicular de la planta.

Estudios realizados demuestran que la cosecha de las plantas no es la vía más eficiente para la remoción de los nutrientes de las aguas residuales y señalan que una cosecha al final de estación elimina menos del 10% del nitrógeno removido en el humedal. **(Reed, 1995)**. No obstante, hay que señalar que la presencia de las plantas en los humedales es esencial, pues en el caso de los sistemas con flujo subsuperficial sus raíces son una fuente fundamental de oxígeno y la presencia de sus hojas, tallos, raíces, rizomas y detritos regula el flujo de agua y proporciona superficie para el crecimiento microbiano.

La vegetación sirve de soporte para el desarrollo de películas bacterianas, estabiliza los sedimentos, ayuda a la infiltración, mantiene la permeabilidad del sustrato y transfiere oxígeno

Capítulo I: Revisión Bibliográfica

a la columna de agua. Además por medio de las raíces, sirven de soporte para el desarrollo de películas bacterianas, contribuyen a la estabilización del sedimento, ayudan a la infiltración y mantienen la permeabilidad del suelo, son fuente de oxigenación del suelo y crean microzonas aeróbicas. **(Calderón, 2005).**

Las macrófitas son el principal componente biológico de estos ecosistemas ya que no sólo asimilan los contaminantes directamente en sus tejidos, sino que además actúan como un catalizador para las reacciones de purificación, aumentando la diversidad del ambiente en la zona de las raíces y promoviendo una variedad de reacciones químicas y bioquímicas que mejoran la purificación. **(Jenssen y Col, 1993).** Las plantas translocan oxígeno desde la parte aérea hasta las raíces, de esta manera la rizofera ofrece un microambiente oxigenado que estimula la descomposición de materia orgánica y el crecimiento de bacterias. **(Gersberg y Col, 1986).**

El medio soporte.

En los humedales construidos el proceso de tratamiento de las aguas residuales es llevado a cabo, fundamentalmente, por un complejo grupo de microorganismos adherido a las raíces de las plantas, rizoma y sobre la superficie del medio. **(Reed, 1995).**

En los sistemas con flujo subsuperficial el medio puede ser suelo, arena o grava y los espacios libres del medio sirven como canales para el flujo del agua. Sobre la superficie del medio la masa de microorganismos crece semejante a lo que ocurre en un filtro percolador, sin embargo, se considera que el crecimiento microbiano en estos sistemas no debe provocar obstrucciones como ocurre en los filtros percoladores.

En el caso de los humedales con flujo subsuperficial horizontal que emplean suelo presentan un potencial de remoción de fósforo y amonio semejante al reportado en los sistemas con flujo libre. En los sistemas con flujo subsuperficial vertical debido a que el flujo es intermitente las condiciones aerobias se restauran periódicamente y el amonio adsorbido, por el suelo puede liberarse por la vía de la nitrificación bacteriana y los sitios de intercambio quedarían libres para futuras adsorciones. En los sistemas con flujo subsuperficial que emplean grava la capacidad de remoción de fósforo es muy limitada. **(Silva, 2000)**

(Frechen, 2005) refiere que el medio filtrante es usado como soporte para las bacterias y que el escogido finalmente depende de los requerimientos de la eficiencia del tratamiento, para lograr mayor eficiencia en la remoción de fósforo soluble suele emplearse el suelo mezclado con

Capítulo I: Revisión Bibliográfica

aditivos de hierro y aluminio mientras que para evitar la reducción del pH se emplean carbonatos.

(Calderón, 2005) afirma que los suelos sirven de soporte y “almacén” de todos los componentes, bióticos y abióticos y de sustento para el crecimiento de las plantas y los microorganismos, también tienen capacidad para remover algunas sustancias conservativas tales como el fósforo y metales pesados.

No se ha encontrado en la bibliografía consultada ningún reporte sobre el empleo de la zeolita como medio filtrante en este tipo de sistemas, sin embargo si existen numerosos trabajos sobre su empleo en sistemas tradicionales, mostrando muy buenos resultados. **(Foreman, 1984)** plantea que en la actualidad existen aplicaciones exitosas de las Zeolitas naturales en la purificación de aguas contaminadas. Pruebas experimentales reportadas muestran que la arena de cuarzo puede sustituirse por zeolita Clinoptilolita natural superándola en muchos aspectos.

El filtro zeolítico permite remover sólidos suspendidos, amonio y cationes de metales pesados e incrementa la viabilidad bacteriana como un pequeño reactor biológico, produciendo un mejor efluente. **(Pérez y Col, 2001).**

Los microorganismos y demás organismos.

En los humedales se desarrollan una gran variedad de organismos que abarcan desde microorganismos como bacterias y protozoos hasta pequeños animales; siendo las bacterias el grupo fundamental en el proceso depurador de las aguas residuales. Como se ha explicado anteriormente, los humedales son sistemas de tratamiento biológico de las aguas residuales con biomasa adherida, presentando características semejantes a las de un filtro percolador. Como en todo sistema de tratamiento biológico, en los humedales se requiere de un sustrato para el desarrollo de los microorganismos responsables del proceso depurador y que el agua permanezca por un tiempo para que se desarrolle esta masa microbiana, además el funcionamiento del sistema depende de una serie de factores ambientales, siendo los más importantes: la disponibilidad del oxígeno y la temperatura. **(Silva, 2000)**

Los microorganismos son importantes para el reciclaje de nutrientes y transformación de contaminantes, principalmente: bacterias, hongos y algas.

El agua.

Provendrá de dos fuentes:

- a) El sistema de alimentación de agua residual.
- b) La precipitación pluvial.

La salida será a través del efluente y del agua perdida por evaporación y transpiración. Es el vehículo que transporta y distribuye alimento y nutrientes a los componentes del humedal.

1.2.6 Criterios de Diseño

Los conocimientos sobre los procesos depuradores que intervienen en los humedales artificiales, así como los criterios de diseño y explotación son insuficientemente conocidos. Para implantar estos sistemas, con el nivel actual de conocimientos, es muy conveniente realizar un estudio propio. En este sentido los humedales artificiales experimentales a pequeña escala son una herramienta muy útil, ya que permiten mayor grado de control sobre las condiciones de estudio. **(Lahora, 1999).**

(Baeder, 2001) plantea que se está lejos de tener una comprensión profunda de los procesos de remoción bacteriana que ocurren en los filtros de suelo plantados. En concreto, necesitamos tener más conocimientos de las interacciones en la rizofera y el papel del filtro en la remoción de patógenos bajo condiciones climáticas y operativas distintas. Este vacío de información obstaculiza el rendimiento técnico óptimo de estos sistemas.

En el diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales por macrófitas se utilizan, entre otros, criterios relacionados con las características del agua a tratar y con las especies vegetales a implantar. Estos aspectos, son inter-dependientes, ya que de la interacción especie-agua residual depende la eficacia del sistema. Para que haya una buena implantación de las plantas y que la vegetación prospere, obviamente no deberán sobrepasarse los umbrales de tolerancia a la contaminación de las especies que intervienen en el humedal artificial. **(Valdés y Col, 2005)**

(García y Col, 2005) plantea que son difíciles de diseñar debido al alto número de procesos y mecanismos implicados en la eliminación de los contaminantes, y no existe un acuerdo claro en cuanto a los valores de parámetros necesarios para el diseño. Los humedales construidos son sistemas complejos en términos físicos, químicos y bióticos. Su funcionamiento es difícil de resumir en ecuaciones muy simplificadas.

Sin embargo **(Reed, 1995); (Kadlec y Knight, 1996); (Crites y Tchobanoglous, 1998)** afirman que los humedales construidos pueden ser considerados como reactores biológicos de biomasa adherida y su funcionamiento para la remoción de la DBO y el nitrógeno puede ser estimado de acuerdo con una cinética de primer orden para un reactor con flujo pistón.

Capítulo I: Revisión Bibliográfica

Por lo que a partir de datos obtenidos en sistemas que se encuentran en operación (**Reed, 1995**) plantean que se puede aplicar la siguiente ecuación para el diseño de estos sistemas:

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-Kt} \dots\dots\dots \text{Ec 1.1}$$

Siendo:

C_e : Concentración del contaminante efluente. (mg/L)

C_o : Concentración del contaminante afluente. (mg/L)

K : Constante de velocidad de reacción de primer orden, dependiente de la temperatura. (d^{-1})

t : Tiempo de retención hidráulica. (d)

A modo de ejemplo, en la Tabla 1.1 se muestran los valores de las constantes cinéticas de primer orden de eliminación de la DBO en humedales de flujo subsuperficial horizontal según diferentes autores.

Tabla 1.1. Valores de las constantes cinéticas de eliminación de la DBO en humedales de flujo subsuperficial horizontal según diferentes autores.

Referencia	Valor constante, d^{-1}	Comentarios
Kadlec y Knight (1996)	0,085-1	-
Vymazal y Col. (1998)	0,19	Según Kickuth
Kadlec y Knight (1999)	0,133	República Checa
García y Col. (2004)	0,011-0,091	En planta piloto
Reed (1995)	1,104	-

El tiempo de retención hidráulica en los humedales puede ser calculado usando la siguiente ecuación:

$$t = \frac{LWdn}{Q} \dots\dots\dots \text{Ec 1.2}$$

Donde:

L : Longitud del estanque. (m)

W : Ancho del estanque. (m)

d : profundidad del agua en el estanque. (m)

Capítulo I: Revisión Bibliográfica

n : porosidad, o espacio utilizado por el agua para fluir a través del humedal. En los humedales con flujo libre (FL) la vegetación y las plantas secas ocupan un espacio, mientras que en los humedales con flujo subsuperficial (FSS) el medio, las raíces y otros sólidos hacen lo mismo. La porosidad es un porcentaje y se expresa en forma decimal.

Q : Flujo promedio a través del humedal. (m³/d)

Combinando las ecuaciones anteriores se puede determinar el área superficial del humedal

$$As = L * W = \frac{Q \ln\left(\frac{Co}{Ce}\right)}{Kt * d * n} \dots\dots\dots Ec 1.3$$

La profundidad en estos humedales puede estar en un rango que va desde unos pocos centímetros hasta un metro.

Por otra parte (**Knight y Col, 1993**) propusieron la siguiente ecuación basándose en un análisis de regresión aplicando los datos obtenidos en distintos sistemas en operación en Norte América.

$$Ce = 0.192 * Co + 0.097 * Ch \dots\dots\dots Ec 1.4$$

Donde:

Ce : DBO efluente (mg/l)

Co : DBO afluente (mg/l)

Ch : Velocidad de carga hidráulica (cm/d).

Esta ecuación puede ser utilizada para predecir calidades de efluentes en humedales con configuraciones típicas y condiciones de temperatura ambiente semejante a las de los lugares donde fueron obtenidas. Sin embargo, tiene como inconveniente que no incluye un factor de corrección para la temperatura. (**Silva, 2000**)

En los humedales con flujo subsuperficial los mecanismos básicos de remoción son los mismos que para un sistema con flujo libre, sin embargo, en el sistema con flujo subsuperficial la velocidad de remoción puede ser mayor debido a en este tipo de sistema hay una mayor área superficial sumergida y por tanto presentará un potencial mayor para el crecimiento de los microorganismos adheridos.

Según (**Reed, 1995**) un metro cúbico de un lecho de un humedal conteniendo grava con tamaño de 25 mm presenta un área superficial de al menos 146 m², además de la superficie

Capítulo I: Revisión Bibliográfica

que proporcionan las raíces; mientras que en un sistema con flujo libre con un volumen semejante pudiera contener entre 15 y 50 m² de área superficial utilizable.

Las ecuaciones planteadas anteriormente pueden ser aplicadas para un sistema con flujo subsuperficial y las únicas diferencias son la magnitud de la porosidad (n) y la constante de velocidad de reacción. Para los sistemas con flujo subsuperficial la porosidad varía con el tipo de medio usado en el sistema.

Otra vía para el diseño de los humedales con flujo subsuperficial que utilizan como medio en el lecho, suelo o grava es usando la ley de Darcy que describe el régimen de flujo en un medio poroso. Dicha ecuación es la siguiente:

$$Q = k_s * A_s * S \dots\dots\dots \text{Ec 1.5}$$

Donde:

Q: flujo promedio a través del humedal (m³/d)

K_s: Conductividad hidráulica de un área unidad del humedal perpendicular a la dirección del flujo (m³/m²*d).

A_s: Área de la sección transversal perpendicular al flujo (m²)

S: Gradiente hidráulico o pendiente del lecho (como una fracción decimal).

Por lo tanto el área de la sección transversal del lecho en el humedal puede ser calculada por la siguiente ecuación:

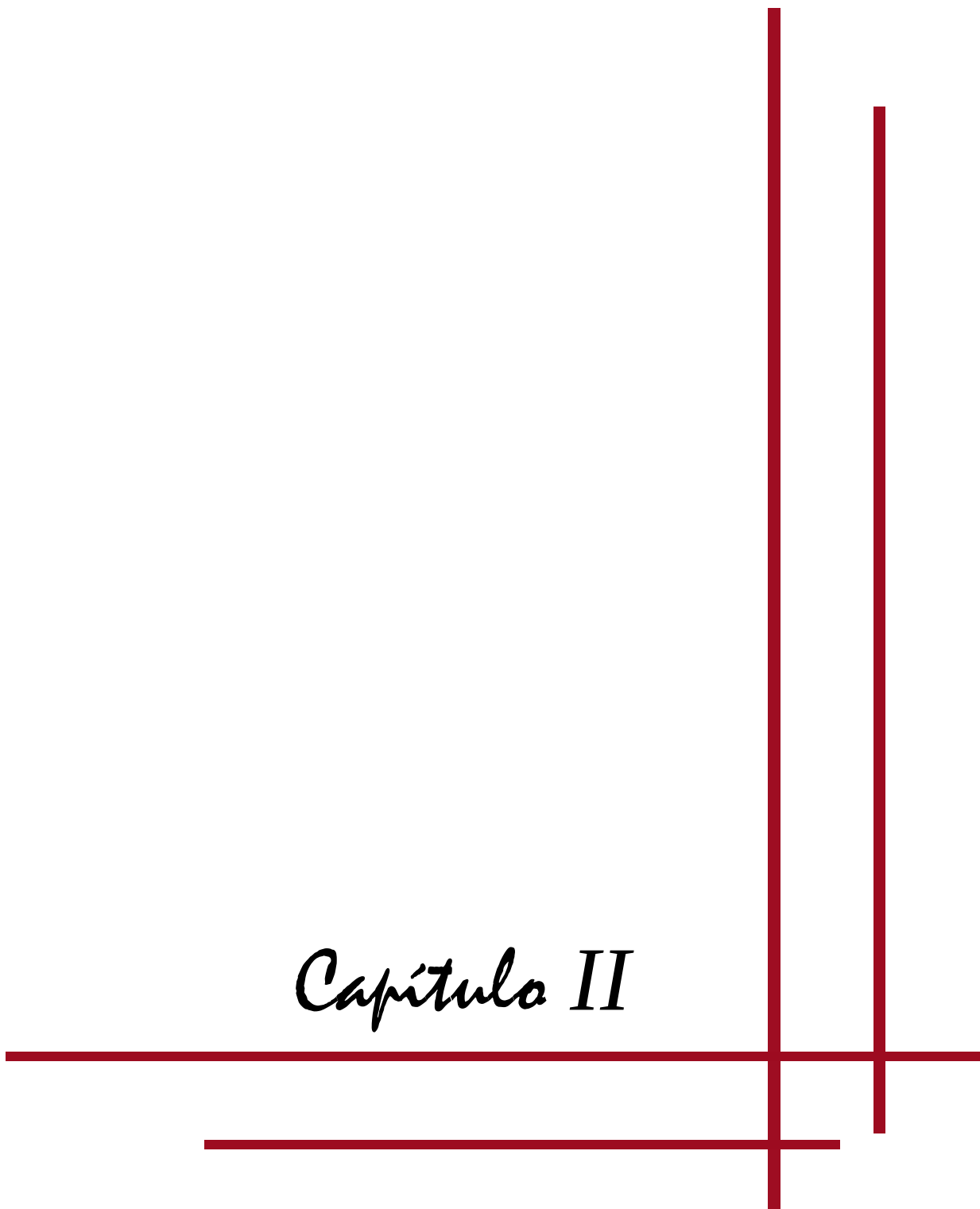
$$A_s = \frac{Q}{k_s * S} \dots\dots\dots \text{Ec 1.6}$$

Conclusiones Parciales

Conclusiones Parciales.

1. En los últimos años ha crecido el interés en el tratamiento de las aguas contaminadas con hidrocarburos debido a la dificultad que presentan estas aguas para ser sometidas a tratamientos como consecuencia de sus características fisicoquímicas y los efectos adversos que ocasiona al ambiente su vertimiento en los ecosistemas acuáticos y terrestres.
2. Las aguas oleosas generadas en el proceso de centrifugación del fuel oil son consideradas un residuo tóxico y peligroso debido a la presencia de hidrocarburos en las mismas, que al ser vertidas sin tratamiento alguno provocan afectaciones a la salud humana, los recursos naturales y el medio ambiente.
3. Las alternativas de tratamientos no convencionales (ATNC) como los métodos naturales de tratamiento se perfilan como soluciones tecnológicas factibles para el tratamiento de estos desechos, capaz de superar algunas de las deficiencias que los métodos tradicionales presentan (bajas eficiencias, altos costos de operación, insumos, etc.)
4. Los humedales construidos de flujo subsuperficial están considerados como instalaciones de tratamiento biológico que se caracterizan por presentar bajos costos, baja complejidad tecnológica, consumo energético mínimo y armonía con el medio ambiente.

Capítulo II



Capítulo II: Evaluación y estudio cinético del tratamiento de aguas oleosas con humedal subsuperficial horizontal.

Capítulo II: Evaluación y estudio cinético del tratamiento de aguas oleosas con humedal subsuperficial horizontal.

2.1 Descripción del proceso de centrifugación y sistema de tratamiento de las aguas oleosas en la CE fuel oil Santa Clara Industrial “Los Alevines”.

El fuel oil llega a la CE a través de pailas de CUPET con capacidades entre 20000 – 27000 L y es bombeado al tanque de recepción. El aceite llega a la CE en tanques de 55 galones en los cuales quedan almacenados. La bomba de fuel oil (HFO) que se encuentra en la estación de bombeo mueve el combustible en caliente desde el tanque de recepción, al tanque Setting que se encuentra encima del HTU (Unidad de tratamiento del Combustible) para ser suministrado a la centrífuga de forma automática. El proceso de centrifugación o lavado del fuel oil y el aceite se realiza de la forma automática de la siguiente forma: 30 minutos de centrifugado (tiempo establecido en el emplazamiento) y dos lavados con agua tratada en caliente a presión, con el objetivo de eliminar las impurezas separadas al fuel oil y al aceite que se encuentran en el interior de la centrífuga. La capacidad nominal de las centrífugas de HFO es de 1900 L/h y de la centrífuga de aceite es de 2000 L/h.

El residual líquido oleoso (lodo) proveniente de las dos centrífugas, es descargado al tanque de lodo HTU (capacidad de aproximadamente 1,34 m³) que está ubicado debajo de las mismas. Según estudios realizados por (**Martínez, 2010**) estas emisiones líquidas (aguas oleosas) están constituidas por dos fases fundamentalmente: una fase combustible (48% v/v) y una fase agua (52% v/v). Ambas fases son bombeadas automáticamente al tanque de recepción de lodo, cuando el tanque de lodo del HTU alcanza el volumen establecido por el fabricante.

En el tanque de lodo ocurre una primera separación debido a la diferencia de densidad de ambas fases. La fase combustible (lodo) es entregada a CUPET para su disposición final y la fase agua oleosa (con contenidos de grasas, aceites e hidrocarburos) es drenada a la trampa de grasa para una segunda separación. El efluente de esta trampa no cumple con los Límites Máximos Permisibles Promedios (LMPM) establecidos en las normas vigentes para su vertimiento (**NC 27:2012**) y son considerados residuos tóxicos y peligrosos. En la Figura 2.1 se muestra el diagrama de flujo del sistema de tratamiento de las aguas oleosas generadas en el proceso de centrifugación del fuel y el aceite.

Capítulo II: Evaluación y estudio cinético del tratamiento de aguas oleosas con humedal subsuperficial horizontal.

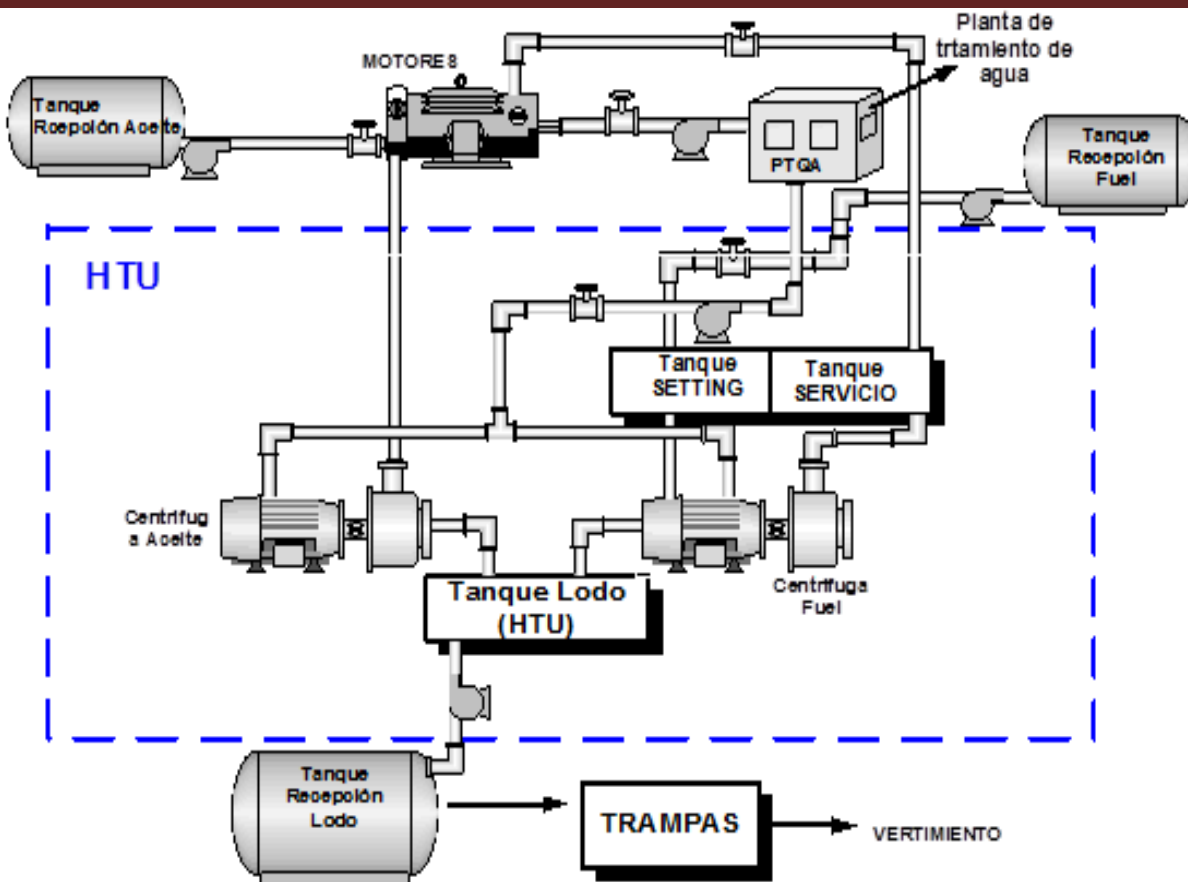


Figura 2.1. Diagrama de flujo del sistema de tratamiento del residual líquido oleoso (lodo) generado en el proceso de centrifugación del fuel y el aceite.

Teniendo en cuenta las características físico-químico de las aguas oleosas y estudios realizados por *(Izquierdo, 2013)*, se proponen como tratamiento secundario un humedal construido con plantas emergentes, que permita disminuir el poder contaminante de estas aguas, su carácter tóxico y peligroso y que el mismo sea factible desde el punto de vista técnico-económico y ambiental.

2.1.1 Descripción del sistema experimental.

Para la evaluación del sistema de tratamiento propuesto a escala de laboratorio se utilizó un humedal construido de flujo subsuperficial horizontal de 0,45 m de largo, 0,33 de ancho y 0,2 m de profundidad, logrando así una mayor oxigenación en los sistemas menos profundos. En la Figura 2.2 se puede observar la estación experimental utilizada para el tratamiento de las aguas oleosas.

Capítulo II: Evaluación y estudio cinético del tratamiento de aguas oleosas con humedal subsuperficial horizontal.



Figura 2.2. Estación experimental utilizada, compuesta por tanque estabilizador (1) y humedal construido (2).

Al afluente del humedal se le determinaron los parámetros: pH, color verdadero (CV), grasa, aceites (G, A) e hidrocarburo (HC), DQO, Sólidos totales (ST), y metales pesados (Pb, Cu, Zn y Fe). Al efluente final del sistema de tratamiento, se le determinaron los parámetros: pH, CV, DQO, ST, G, A e HC con el objetivo de evaluar la calidad de los mismos para su vertimiento. Estos parámetros se determinaron de acuerdo a *Standard Methods (APHA-AWWA-WEF, 2005)* y a estándares internacionales. (Ver Tabla 2.1). Para la determinación de estos parámetros el muestreo se realizó sobre la base del criterio de toma de muestras puntuales, según Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos. (INRH, 2004).

Tabla 2.1. Parámetros de calidad y métodos analíticos empleados.

Parámetros	Unidades	Método Empleado.
Potencial de hidrógeno (pH)	u de pH	Método electrométrico
Color verdadero (CV)	mg/L. Pt	Método escala platino-cobalto

Capítulo II: Evaluación y estudio cinético del tratamiento de aguas oleosas con humedal subsuperficial horizontal.

Sólidos totales (ST)	mg/L	Método gravimétrico.
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg O ₂ /L	Método dicromato. Reflujo abierto
Grasas y aceites (G,A)	mg/L	Partición gravimétrica con n-hexano
Pb	mg/L	Espectrometría de Absorción Atómica
Cu	mg/L	Espectrometría de Absorción Atómica
Zn	mg/L	Espectrometría de Absorción Atómica
Fe	mg/L	Espectrometría de Absorción Atómica

El agua a tratar (afluente): el sistema se alimentó con el agua oleosa drenada del tanque de lodo de la Central Eléctrica fuel oil Santa Clara Industrial “Los Alevines” (tratamiento primario de separación como se describió anteriormente) y antes de pasar al sistema de trampas. La misma fue trasladada al laboratorio, para su utilización en la investigación. Los valores de los parámetros determinados del agua oleosa utilizada se observan en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Valores medios y desviación estándar de los parámetros analizados al afluente y los parámetros normativos.

Parámetros	Unidades	Valores medios	LMPP NC 27:2012
Potencial de hidrógeno (pH)	u de pH	7.6	6 -9
Color verdadero (CV)	mg/L. Pt	100	-
Sólidos totales (ST)	mg/L	102	-
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg O ₂ /L	165,11	90
Grasas y aceites (G,A)	mg/L	77	10
Pb	mg/L	0.2240	-
Cu	mg/L	1.7890	-
Zn	mg/L	0.5170	-
Fe	mg/L	1.7730	-

Como se puede observar excepto el pH y el fósforo, los demás parámetros se encuentran por encima del Límite Máximo Permisible Promedio para el cuerpo receptor B (Ríos y embalses) según **(NC 27: 2012)**. En el caso de los hidrocarburos está prohibido el vertimiento (PV) a cualquier cuerpo receptor.

El flujo: Se aplica el flujo continuo, de 400 mL/h, el cual fue determinado de acuerdo a la ecuación cinética de primer orden para flujo pistón (ecuación 2.1), considerando la remoción de DQO **(Reed, 1995); (Kadlec and Knight, 1996)**.

Capítulo II: Evaluación y estudio cinético del tratamiento de aguas oleosas con humedal subsuperficial horizontal.

$$Q = (A_s k_T y n) / \ln(C_0 / C_e) \dots \dots \dots \text{Ec 2.1}$$

Donde:

Área Superficial (A_s): 0,15 m², calculada por las dimensiones del humedal experimental.

Porosidad (η): 0,35 Según **(García y Corzo, 2008)**

Profundidad (y): 0,2 m

Concentración de DQO afluente (C_0): 165 mg/L

Concentración de DQO efluente (C_e): 70 mg/L, de acuerdo con el LMPP de **(NC 27: 2012)**

Constante cinética (k): Se asume el valor reportado por **(Reed, 1995)** para humedales subsuperficiales que es 0,85 d⁻¹.

Medio poroso: Grava 10-15 mm

Planta emergente: *Cyperus Alternifolius*, estudios realizados por **(Blanco, 2009)** e **(Izquierdo, 2013)** mediante el empleo de humedales construidos de flujo subsuperficiales para el tratamiento de aguas oleosas utilizando un medio poroso con esta planta emergente, obtuvieron elevadas eficiencias de remoción de los principales contaminantes.

2.2 Estudios de la cinética de remoción de DQO en aguas residuales oleosas empleando humedal subsuperficial horizontal como tratamiento secundario.

2.2.1 Evaluación del comportamiento del humedal subsuperficial horizontal en la remoción de DQO en las aguas oleosas durante el período de estabilización.

Se realizaron monitoreos semanales al humedal para seguir su comportamiento en cuanto a la remoción de DQO y determinar cuándo se encontraba estabilizado para el estudio de la cinética de remoción. La Figura 2.3 muestra el comportamiento del humedal en la remoción de este parámetro durante las primeras 4 semanas de funcionamiento, observándose una estabilización de sus valores a partir de la segunda semana de funcionamiento con un 80% de remoción de DQO. En cuanto a las grasas, aceites e hidrocarburos se obtuvo una disminución significativa de este parámetro de 77 mg/L a menos de 10 mg/L que es el límite de detección de la técnica analítica, lo que imposibilitó realizar la cinética de remoción de este contaminante.

Capítulo II: Evaluación y estudio cinético del tratamiento de aguas oleosas con humedal subsuperficial horizontal.

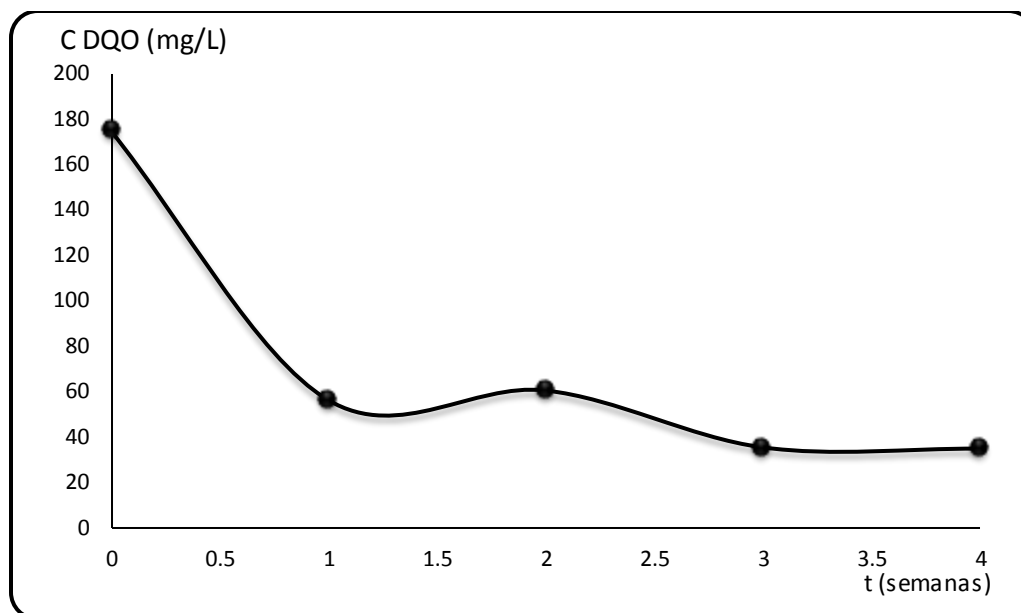


Figura 2.3. Comportamiento de la remoción de DQO

En la Tabla 2.3 se muestran los valores de los parámetros determinados del efluente del humedal subsuperficial horizontal a las 4 semanas de funcionamiento y los porciento de remoción obtenidos.

Tabla 2.3. Valores medios y desviación estándar de los parámetros analizados al efluente a las 4 semanas de funcionamiento.

Parámetros	Unidades	Afluente	Efluente	% R
Potencial de hidrógeno (pH)	u de pH	7.6	7.34	-
Color verdadero (CV)	mg/L. Pt	100	20	80
Sólidos totales (ST)	mg/L	102	34	67
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg O ₂ /L	165,11	37.2 (4 semanas)	77,5
Grasas y aceites (G,A)	mg/L	80	< 10	>87
Pb	mg/L	0.2240	0.0110	95
Cu	mg/L	1.7890	0.0750	96
Zn	mg/L	0.5390	0.0259	95
Fe	mg/L	1.7730	0.0875	95

Los resultados obtenidos evidencian la eficiencia del sistema de tratamiento evaluado y muy similares a los obtenidos por (**Blanco 2004**), (**Quilice, 2005**) e (**Izquierdo 2013**). Esto es imputable a una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que se efectúan en el

Capítulo II: Evaluación y estudio cinético del tratamiento de aguas oleosas con humedal subsuperficial horizontal.

ambiente natural, entre estos procesos se encuentran la sedimentación, la adsorción a las partículas del suelo, la asimilación por las plantas y la transformación microbiana, que juegan un papel fundamental en estos sistemas las cuales logran reducir *in situ* la concentración o peligrosidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos, sedimentos y agua, a partir de procesos bioquímicos realizados por las plantas y microorganismos asociados a su sistema de raíz que conducen a la reducción, mineralización, degradación, volatilización y estabilización de los diversos tipos de contaminantes. En la Figura 2.4 se muestra el agua residual afluyente y efluente del humedal experimental, observándose la efectividad del tratamiento en la disminución del color, sólidos suspendidos y sedimentables, mejorando la calidad de la misma.



Figura 2.4. Agua residual oleosa afluyente (1) y efluente (2) del humedal.

2.2.2 Estudio cinético de la remoción de DQO en el humedal subsuperficial horizontal.

Para el estudio cinético de la remoción de los principales contaminantes y la determinación de las constantes cinéticas se evaluó la remoción de DQO a diferentes tiempo de retención del agua residual en el humedal, el experimento se llevó a cabo con un flujo discontinuo, pasando el agua residual al humedal por gravedad desde un tanque estabilizador colocado a un nivel superior, y tomando muestras del agua residual afluyente (C_0) y efluente (C_e) cada 0,1; 1; 3; 5; 9 y 24 horas respectivamente, fueron realizadas 3 réplicas de estos experimentos. El promedio y la desviación estándar de los resultados de los ensayos realizados se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Valores medios y desviación estándar de los ensayos realizados.

Tiempo (horas)	C(DQO) promedio (mg/L)	Desviación estándar (mg/L)
0	165,11	11,49
0,1	115,82	10,58

Capítulo II: Evaluación y estudio cinético del tratamiento de aguas oleosas con humedal subsuperficial horizontal.

1	93,77	16,18
3	88,97	23,98
5	82,89	23,58
9	81,28	21,56
24	53,23	13,34

Se realizó el ajuste de los datos determinados experimentalmente a los modelos cinéticos: de primer orden que es el modelo más utilizado para estimar la remoción de los contaminantes en estos sistemas **(Reed, 1995); (Kadlec and Knight, 1996)**, el de cero orden que se reporta principalmente para altas concentraciones de los contaminante en el agua residual, el de saturación o Monod que según diferentes autores **(Mitchell and McNevis, 2001); (Sun, 2011)** puede explicar el comportamiento cinético de primer orden para bajas concentraciones y de cero orden para altas concentraciones. Estos modelos son aplicados esencialmente a procesos de remoción biológicos **(Sikdar, 2007); (Kumar, 2011)** y por último al de segundo orden, reportado principalmente para procesos de remoción químicos **(Sikdar, 2007)**.

En la Tabla 2.4, se muestran la ecuación de la recta y el coeficiente de correlación para los cuatro modelos estudiados, y en las Figuras 2.5; 2.6; 2.7 y 2.8 se exponen los gráficos correspondientes a cada uno de ellos, observándose un mejor ajuste para el modelo de saturación.

Tabla 2.4. Modelos cinéticos

Modelo cinético	DQO
Cero orden $C_o - C_e = k * t$	$y = 2,0791x + 64,533$ $R^2 = 0,8305$
Primer orden $\ln \frac{C_o}{C_e} = -k * t$	$y = -0,028x - 0,4998$ $R^2 = 0,9017$
Segundo orden $\frac{1}{C_e} - \frac{1}{C_o} = k * t$	$y = 0,0003x + 0,0102$ $R^2 = 0,9212$
Saturación $\frac{1}{t(\ln \frac{C_e}{C_o})} = \frac{k}{K} + \frac{1}{K}(\frac{C_e - C_o}{t})$	$y = 0,0072x + 0,0292$ $R^2 = 0,9998$

Capítulo II: Evaluación y estudio cinético del tratamiento de aguas oleosas con humedal subsuperficial horizontal.

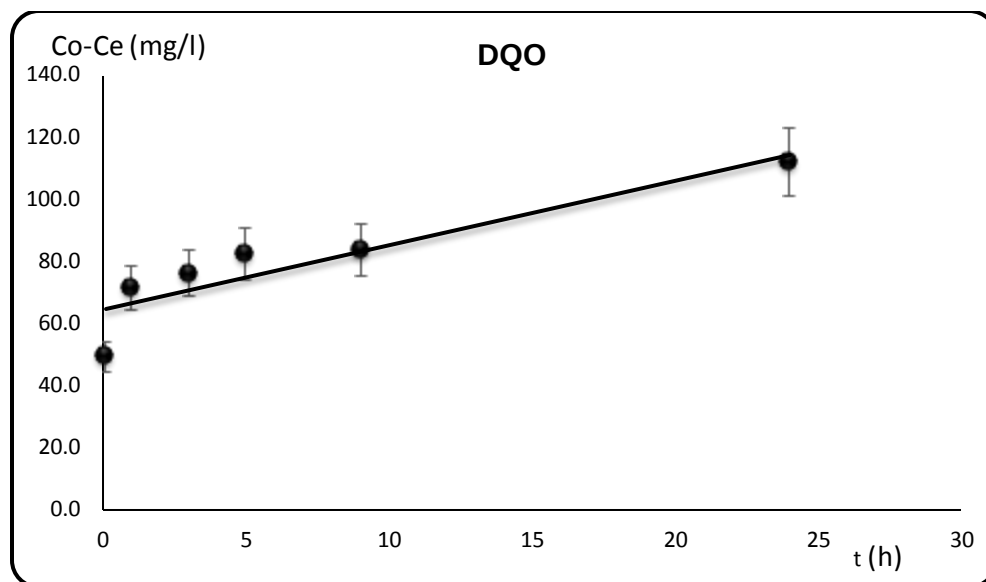


Figura 2.5. Comportamiento del modelo de cero orden.

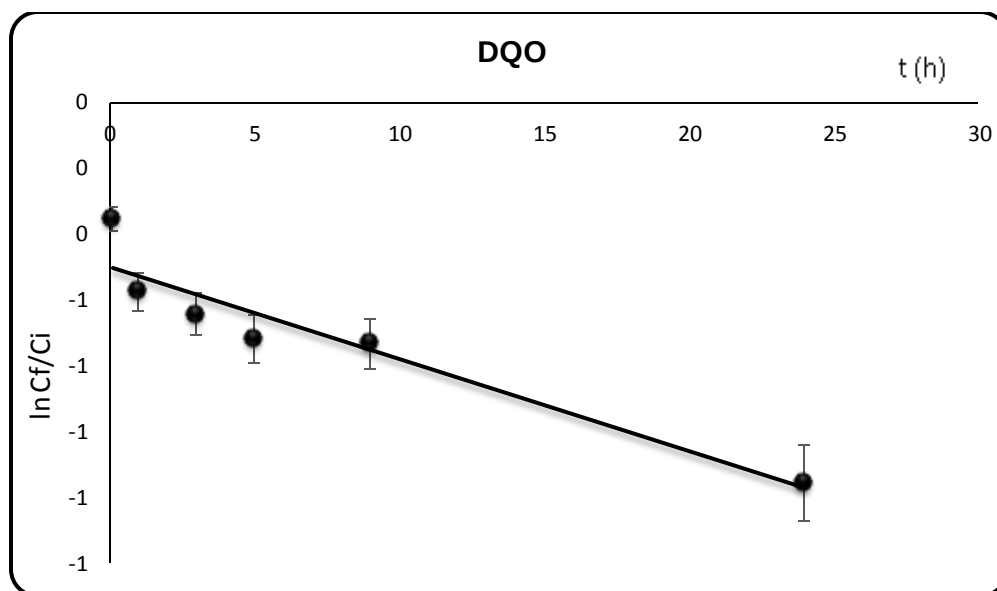


Figura 2.6. Comportamiento del modelo de primer orden.

Capítulo II: Evaluación y estudio cinético del tratamiento de aguas oleosas con humedal subsuperficial horizontal.

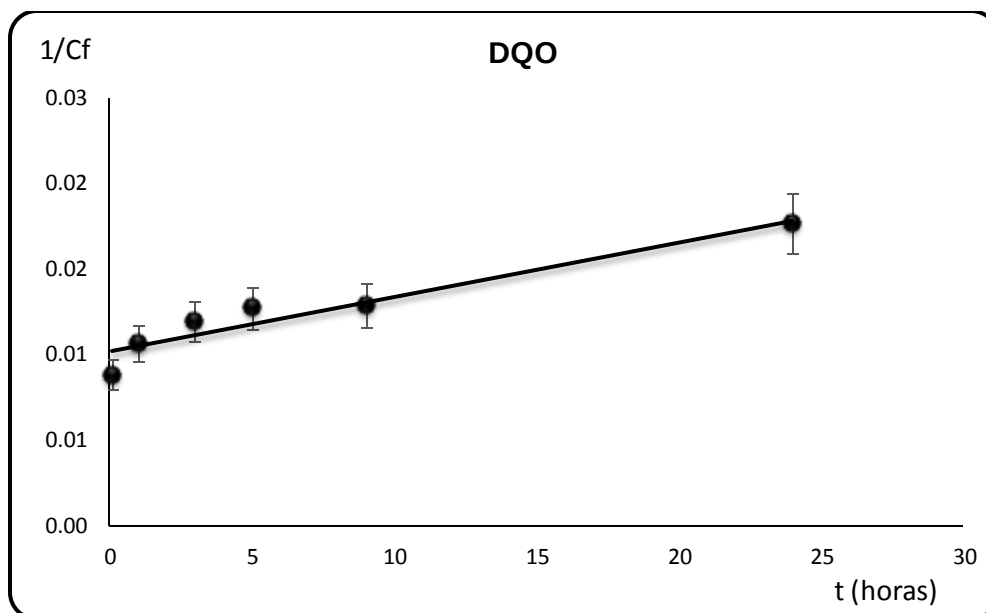


Figura 2.7. Comportamiento del modelo de segundo orden.

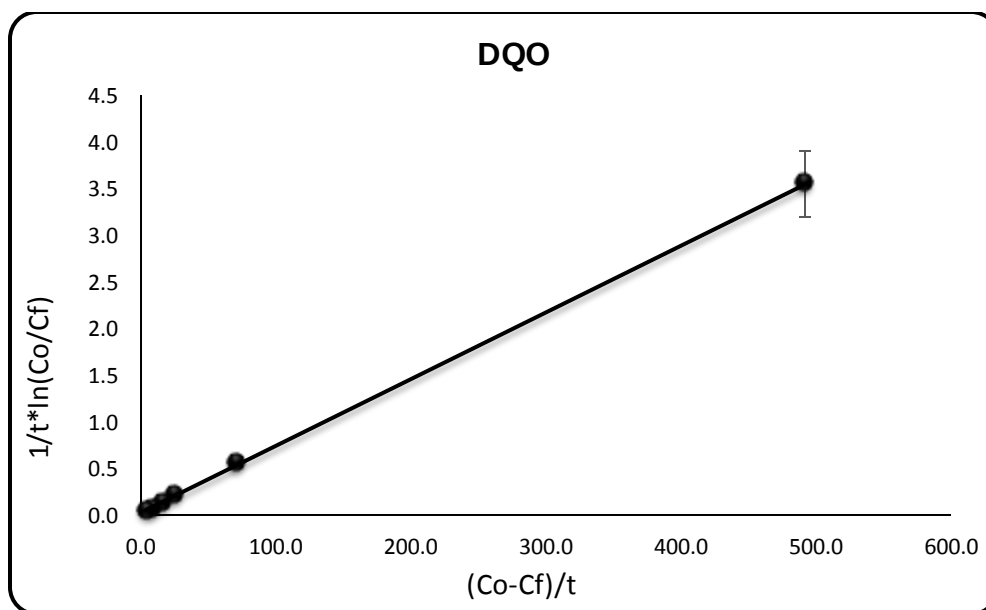


Figura 2.8. Comportamiento del modelo de saturación.

Capítulo II: Evaluación y estudio cinético del tratamiento de aguas oleosas con humedal subsuperficial horizontal.

Las constantes obtenidas para la remoción de DQO con el modelo de saturación o Monod se reportan en la Tabla 2.5. En las referencias bibliográficas revisadas no se han encontrado reportes de estudios cinéticos para este tipo de sistema de tratamiento de aguas oleosas, por lo que no se puede hacer una comparación de las mismas.

Tabla 2.5. Constantes del modelo cinético de saturación

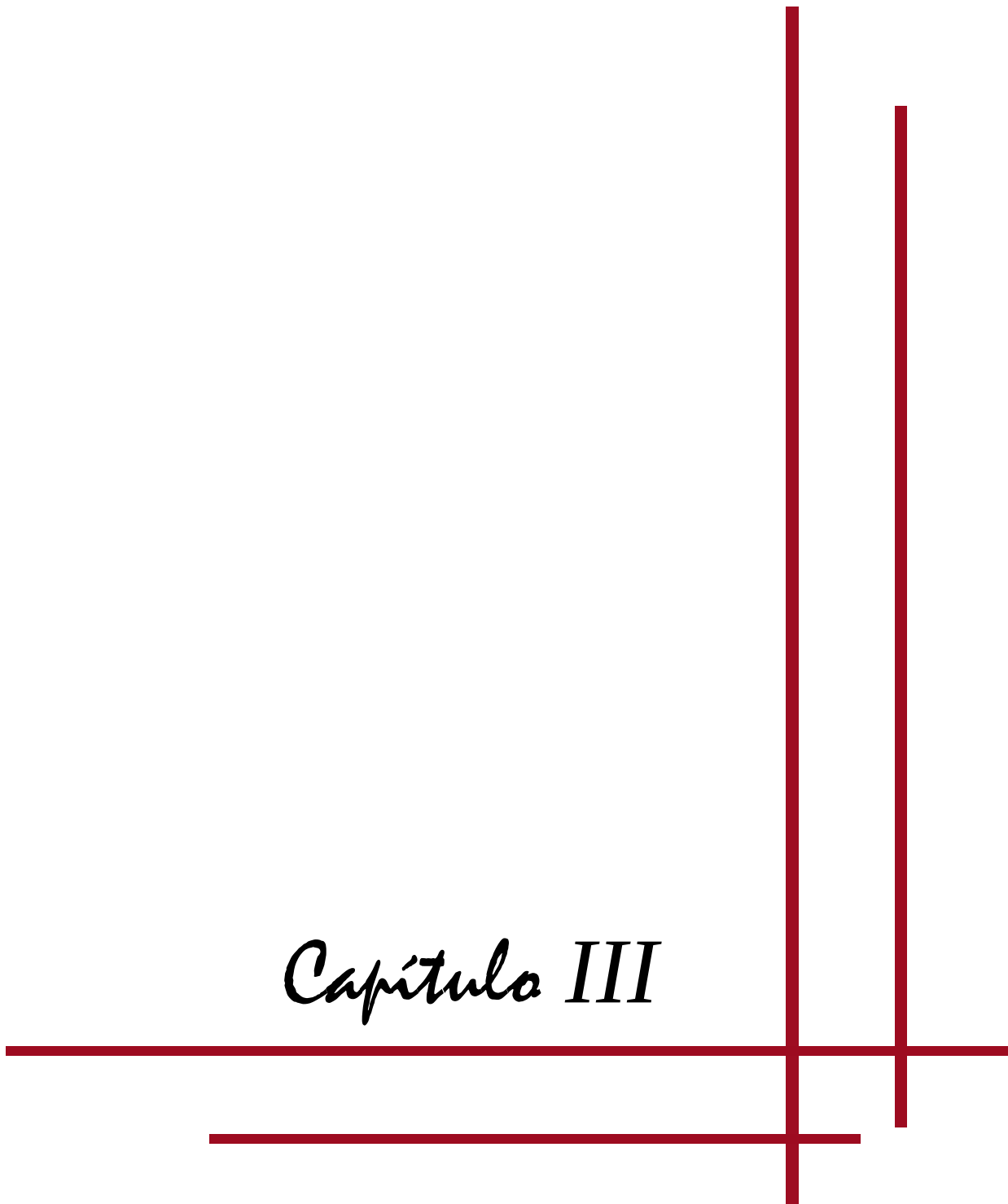
Constante de Saturación (K)	138,9 mg/L
Constante cinética (k)	4,06 mg/L

Conclusiones Parciales

Conclusiones Parciales

1. El sistema de tratamiento de las aguas residuales oleosas de la Central Eléctrica fuel oil Santa Clara Industrial “Los Alevines”, implementado actualmente, no logra el cumplimiento de la norma cubana de vertimiento.
2. El empleo de un humedal subsuperficial horizontal experimental plantado con *Cyperus Alternifolius* mostró elevadas eficiencias de remoción de los contaminantes.
3. La remoción de la DQO mediante un humedal subsuperficial horizontal se ajustó al modelo cinético de saturación o Monod.

Capítulo III



Capítulo III: Diseño del humedal subsuperficial horizontal.

3.1 Diseño del sistema de tratamiento

Después de un análisis de la situación existente en el sistema de tratamiento de residuales de la Central Eléctrica fuel oil Santa Clara Industrial “Los Alevines” en las condiciones actuales, expuesto en el capítulo anterior y de los resultados satisfactorios obtenidos con el empleo de un humedal subsuperficial horizontal en el tratamiento secundario de las aguas residuales oleosas, a nivel de laboratorio, donde se obtienen porcentajes de remoción elevados para los principales contaminantes en estudio, se procede a diseñar el humedal tomando en consideración el flujo de agua residual que debe ser tratado.

El sistema de tratamiento propuesto estará compuesto por un tanque horizontal (tanque de lodo) y una trampa de grasas para garantizar que el efluente final tenga una mejor calidad para su vertimiento como tratamiento primario, seguido de un humedal subsuperficial horizontal como tratamiento secundario. El esquema propuesto se muestra en la Figura 3.1.

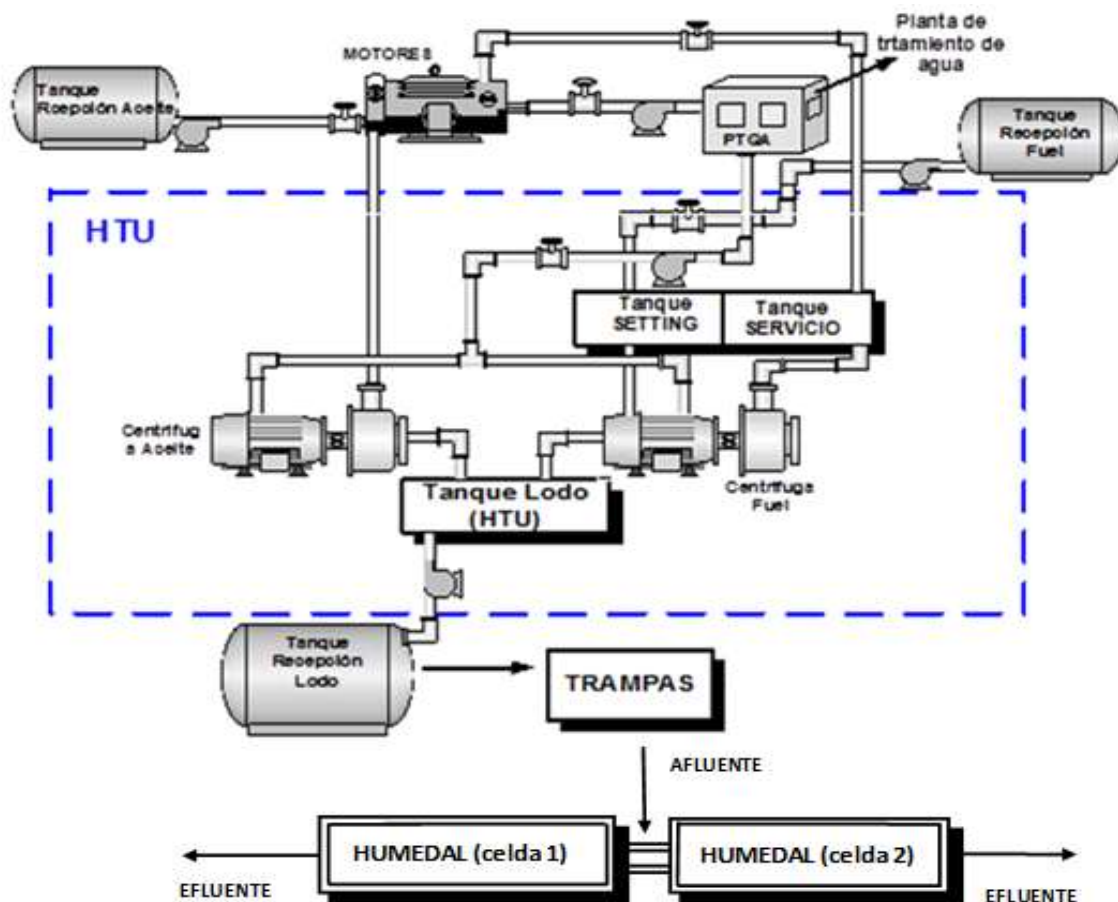


Figura 3.1. Esquema de tratamiento propuesto.

3.1.1 Parámetros de diseño del humedal

- **Planta emergente**

Como planta emergente se propone la misma planta usada en el humedal experimental a escala de laboratorio *Cyperus Alternifolius*, por brindar buenos resultados en cuanto a la remoción de los contaminantes en el mismo y encontrarse con gran abundancia en la zona, por lo que se puede lograr una mejor adaptación de la misma a las condiciones del humedal. En la Figura 3.1 se muestra dicha planta emergente.



Figura 3.1. Planta emergente (*Cyperus Alternifolius*) utilizada.

- **Impermeabilización**

Se propone como impermeabilizante la arcilla compactada, ya que este impermeabilizante disminuye los costos de construcción del humedal y se integra mejor al entorno natural.

- **Sustrato**

El medio soporte en el lecho del humedal se mantiene el utilizado en el humedal experimental, compuesto por grava de 10-15 mm, el cual presentó buenos resultados en la remoción de grasas, aceites e hidrocarburos y por ende de la DQO.

- **Altura**

Se propone una altura de 0,4 m; la misma es recomendada para sistemas horizontales donde los procesos depuradores transcurren horizontalmente en el lecho y se logra una mayor oxigenación en los sistemas menos profundos.

3.1.2 Dimensionamiento del humedal

- **Dimensionamiento biológico**

Capítulo III: Diseño del humedal subsuperficial horizontal

El dimensionamiento biológico del humedal se realizó, usando el modelo cinético de saturación para la remoción de DQO, con las constantes obtenidas en el humedal experimental a escala de laboratorio, siendo este modelo cinético el que mejor ajuste mostró a los datos experimentales obtenidos. Sustituyendo las constantes obtenidas experimentalmente en la ecuación del modelo (ecuación 3.1), se obtiene el tiempo de retención (t) y mediante la ecuación 3.2 se obtiene el área superficial (As) necesaria para lograr la remoción de este contaminante.

$$\frac{1}{t(\ln \frac{C_e}{C_o})} = \frac{k}{K} + \frac{1}{K} \left(\frac{C_e - C_o}{t} \right) \dots \text{Ec 3.1}$$

$$As = \frac{Q * t}{y * n} \dots \text{Ec 3.2}$$

Donde:

Flujo de agua residual (Q): 6 m³/día

Porosidad (n): 0,35 (Reportada para grava 10-15mm) (*Kadlec y Knight, 1996*)

Profundidad (y): 0,4 m

Concentración DQO efluente (Ce): 40 mg/L (LMPP según (*NC 27: 2012*))

Constante cinética (k): 4,06 mg/L (Obtenida en el humedal experimental para la remoción de DQO con el modelo de saturación)

Constante de saturación (K): 138,9 mg/Lh

Concentración DQO afluente (Co): 165 mg/L

En la Tabla 3.1 se muestran los resultados del tiempo de retención y el área calculados para el humedal subsuperficial horizontal.

Tabla 3.1. Tiempo de retención y Área superficial

Tiempo de retención (d)	1,34
Área superficial (m ²)	57,4

Obteniéndose un área superficial de **57 m²**, con un tiempo de retención hidráulico de 1,3 días, considerando un sobrediseño del 5% se proponen **dos celdas de 30 m²** de área superficial, que corresponde a un área superficial total de **60 m²**.

- **Dimensionamiento Hidráulico**

Capítulo III: Diseño del humedal subsuperficial horizontal

El dimensionamiento hidráulico sirve para determinar las dimensiones del sistema (anchura y longitud) una vez conocida su área superficial. El dimensionamiento hidráulico se realiza aplicando la Ley de Darcy, que describe el régimen del flujo en un medio poroso, mediante la ecuación 3.3:

$$A_{st} = \frac{Q}{k_s \cdot s} \dots\dots\dots \text{Ec 3.3}$$

Donde:

k_s la conductividad hidráulica del medio en una unidad de sección perpendicular a la dirección del flujo, $2\,500\text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$, con una reducción de 5 como factor de seguridad, el cual se emplea por la reducción de la conductividad hidráulica con el tiempo en el humedal

s es el gradiente hidráulico o pendiente (dh/dL), $0,01\text{ m/m}$.

Q flujo de agua residual afluyente al humedal $6\text{ m}^3/\text{d}$, se divide a la mitad para proponer dos celdas en el tratamiento.

Obteniéndose un área de la sección transversal (A_{st}) de $0,60\text{ m}^2$

Calculada el área de la sección trasversal, y dividiendo este valor entre la profundidad se determina el ancho, obteniéndose $1,5\text{ m}$. Conocido el ancho y teniendo en cuenta el área superficial determinada con el dimensionamiento biológico se determina la longitud del sistema dividiendo dicha superficie entre el ancho, obteniéndose un largo de 20 m . A partir de estos resultados se proponen dos celdas de **$1,5\text{ m}$** de ancho por **20 m** de largo. Un esquema del humedal subsuperficial horizontal se presenta en la Figura 3.2.

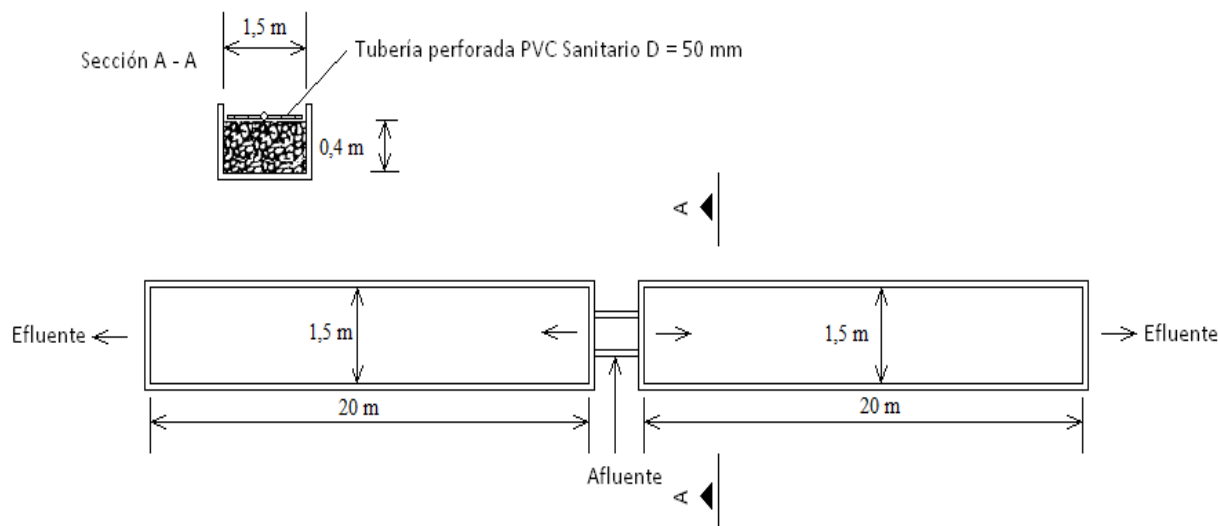


Figura 3.2. Humedal subsuperficial horizontal.

3.2 Evaluación económica del sistema propuesto

En este epígrafe se presenta una valoración económica del sistema de tratamiento propuesto, donde se evalúan los costos de inversión y operación así como las externalidades asociadas. Se realiza un estudio de sensibilidad basado en la asignación de valores a las externalidades y se presentan los indicadores dinámicos según **(Peters & Timmerhaus, 2003)**. Esta evaluación económica permite tomar decisiones sobre la realización o no del proyecto, a través de una evaluación monetaria de las implicaciones medioambientales del mismo.

3.2.1 Costo de la inversión

Los costos de inversión para el humedal se estimaron de los reportados en el manual de la Agencia de Protección de Medio Ambiente de los Estados Unidos **(EPA, 2000)** y de los precios del PRECONS para los materiales de construcción. En la Tabla 3.2 se presenta un resumen de los mismos.

Tabla 3.2. Costos de inversión de una celda del humedal

Elemento	Cantidad	Costo unitario (\$)	Costo (\$)
Movimiento de tierra.	60 m ²	2,5	152
Recubrimiento.	-	-	15 200
Medio Grava/Suelo	-	-	1 800
Estructura de entrada y descarga.	60 m ²	1,3	77
Costos de ingeniería.	60 m ²	0,7	42
Total			17 271

3.2.2 Costo de operación

Para estimar los costos de operación se tendrán en cuenta:

- Análisis de laboratorio: \$1 886 (considerando una frecuencia anual de análisis de 5 muestras)
- Mantenimiento: \$311 al año.

3.2.3 Ingresos, considerando las externalidades

- Daños evitados a la salud de las personas: **\$5 400**, teniendo en cuenta que el benceno es una de las sustancias presente en el petróleo y sus destilados y se conoce que la exposición al mismo causa leucemia y reduce los leucocitos en la sangre humana, dejando a las personas más susceptibles a infecciones; además muchos de estos compuestos son altamente tóxicos y pueden causar irritación en la piel, eflorescencia y cáncer.

Capítulo III: Diseño del humedal subsuperficial horizontal

- Daño evitado a la fauna acuática: \$10 600, teniendo en cuenta que el petróleo o sus destilados (fuel oil) son muy letales para los peces, los mata rápidamente a una concentración de 4000 partes por millón (ppm) (0.4%).

3.2.4 Análisis de los indicadores dinámicos de rentabilidad

Según los valores obtenidos para el Valor Actual Neto (VAN) de **\$53 452** y una Tasa Interna de Rentabilidad (TIR) del **91%**, el sistema de tratamiento propuesto es viable desde el punto de vista económico y según el período de recuperación (PRD) que se muestra en la Figura 3.3 su inversión se recupera antes de los dos años de la puesta en funcionamiento.

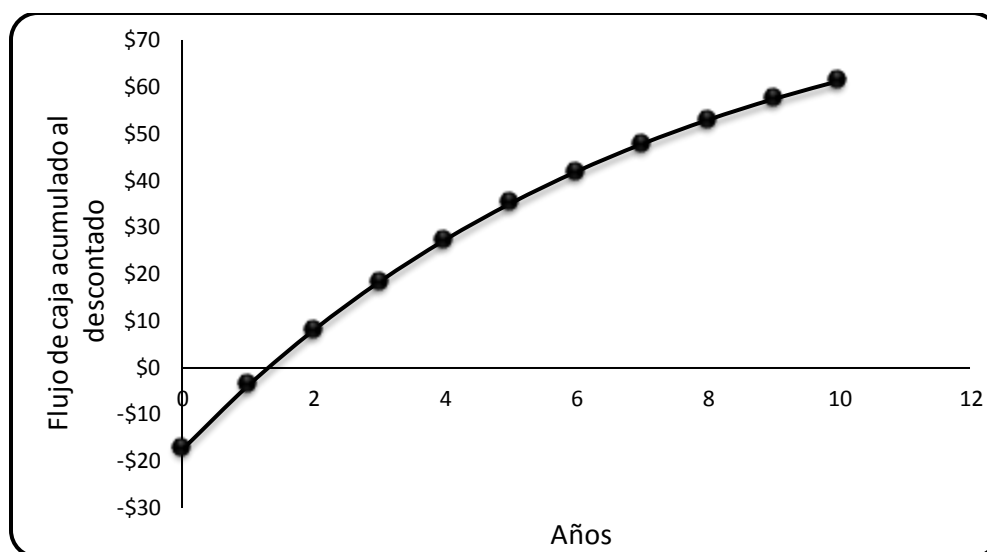


Figura 3.3. Período de recuperación (PRD)

Considerando el grado de subjetividad de las externalidades estimadas, se decide realizar un análisis de sensibilidad a los ingresos, obteniéndose como resultado que se pueden aceptar variaciones de hasta un 50% de disminución de los mismos sin afectar la factibilidad del proyecto. (Figura 3.4). En el anexo A se muestra un resumen de los cálculos económicos.

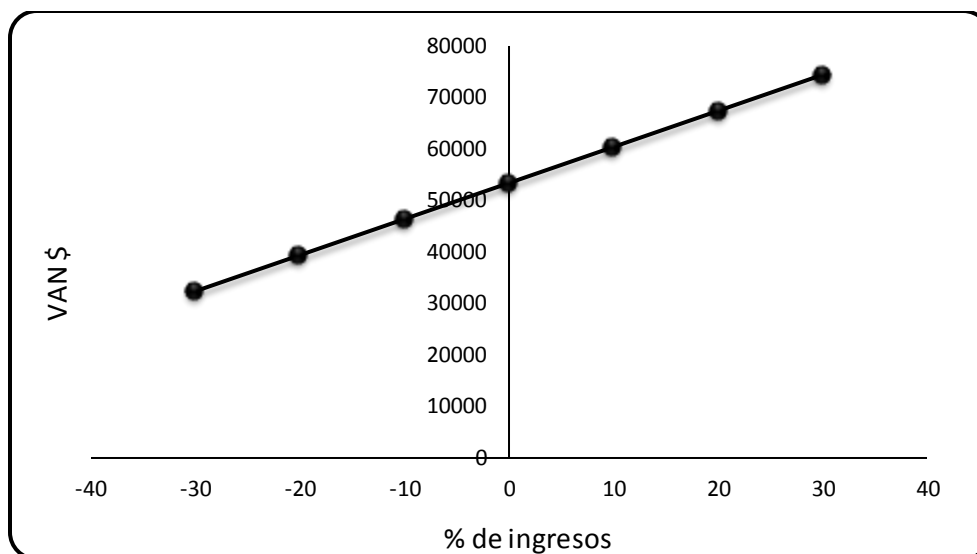


Figura 3.4. Sensibilidad a los ingresos.

El valor de los costos de inversión está sujeto a variaciones constantes, por lo que se realizó un análisis de sensibilidad a la inversión, obteniéndose que hasta con un 50% de aumento de la inversión el sistema sigue siendo viable (Figura 3.5).

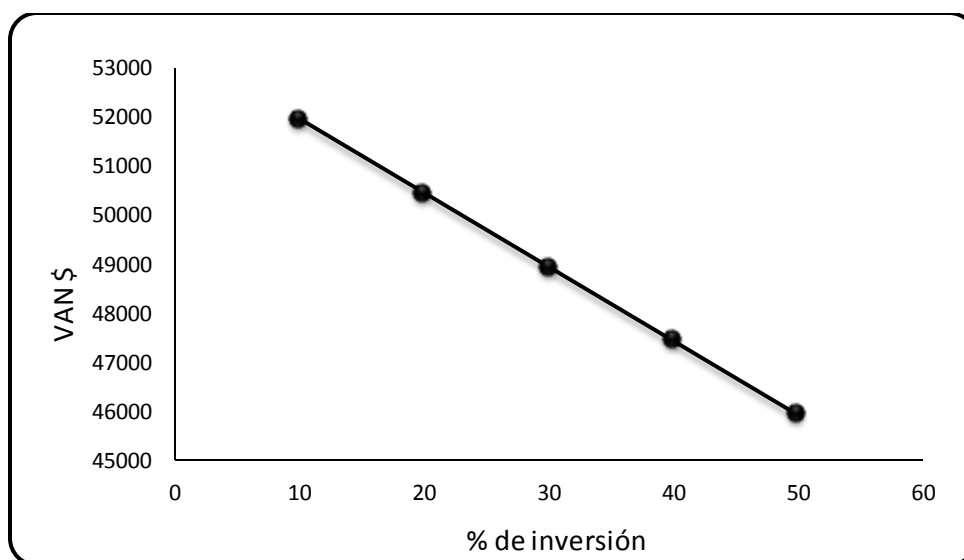


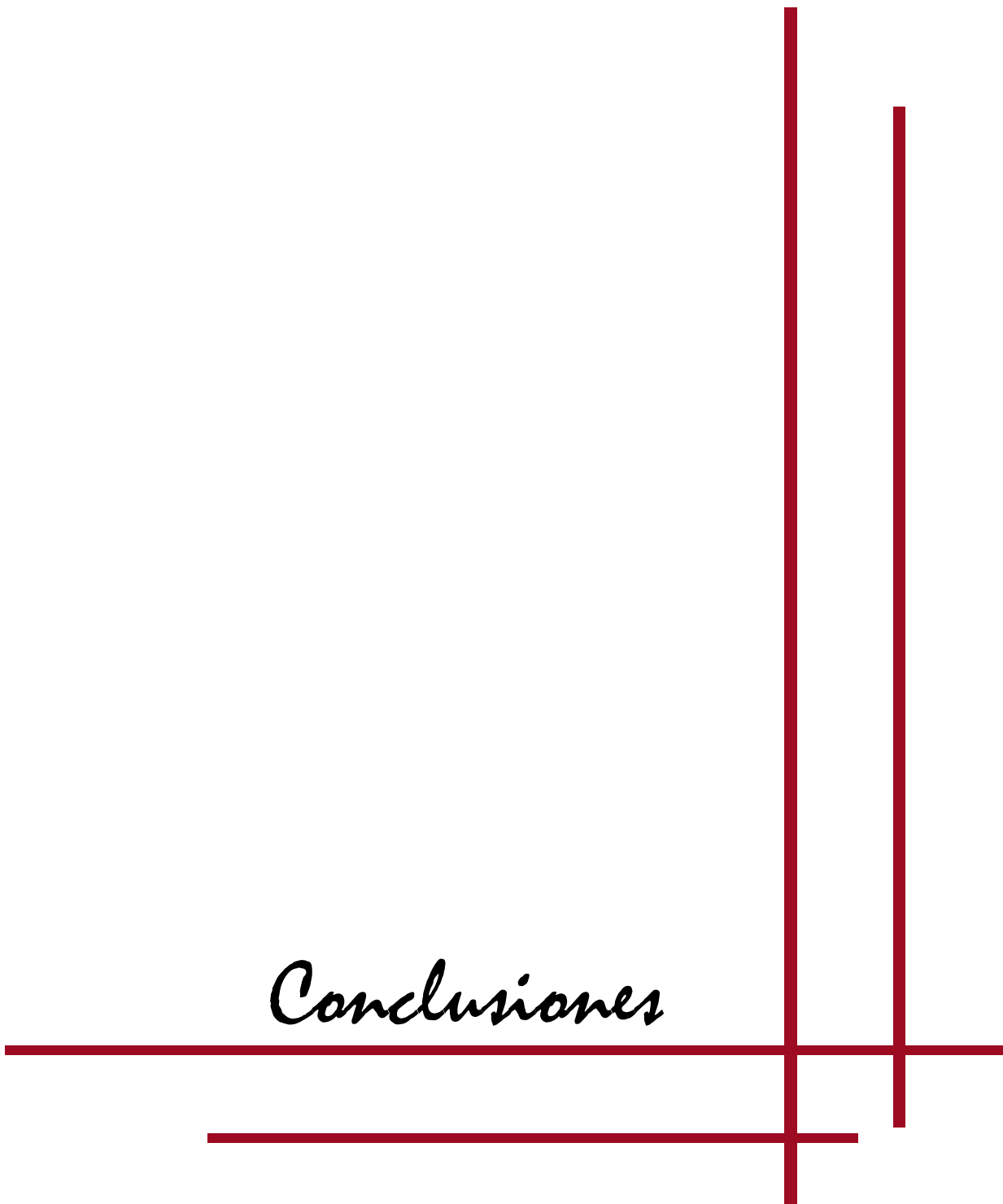
Figura 3.5. Sensibilidad a la inversión

Conclusiones Parciales

Conclusiones parciales

1. El área necesaria del humedal para lograr la depuración de la DQO por debajo del límite de vertimiento es de 60 m² para un tiempo de retención de 1,3 días.
2. Del análisis económico realizado se demostró que el sistema es factible con un VAN de \$53 452 y una TIR del 91%, lográndose la recuperación en un período menor de dos años.
3. El sistema de tratamiento propuesto para la depuración de las aguas oleosas en la Central Eléctrica fuel oil Santa Clara Industrial “Los Alevines” es sustentable y consta de tratamiento primario ya existente, seguido de un humedal subsuperficial horizontal.

Conclusiones

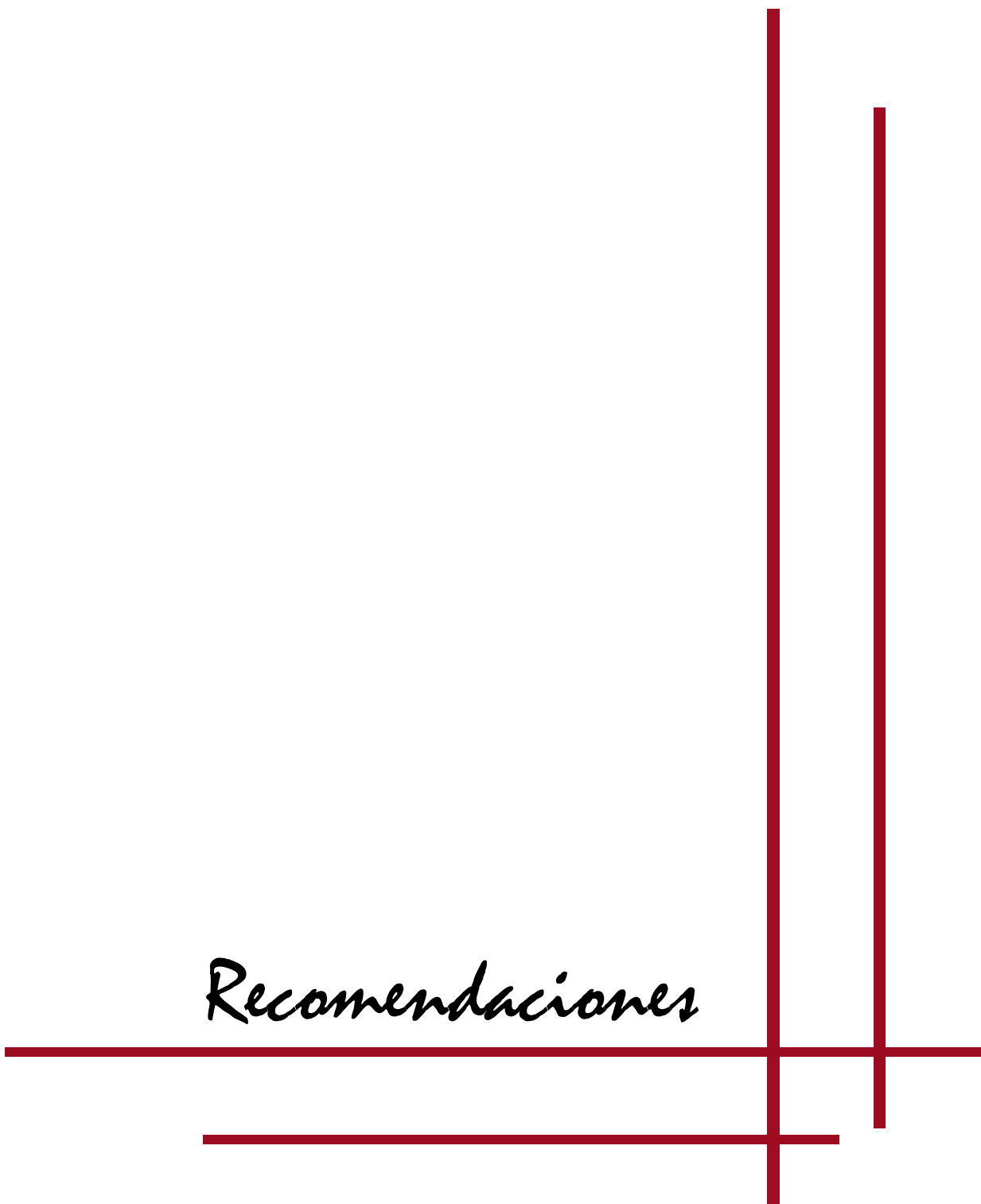


Conclusiones

Conclusiones

1. El humedal experimental logró la estabilización al cabo de las 4 semanas de puesta en funcionamiento, lográndose una buena adaptación de la vegetación en el mismo y porcentajes de remoción considerable de los parámetros determinados (DQO 77,5%; GA mayor de 87%).
2. El comportamiento cinético de la remoción de DQO mostró un mayor ajuste al modelo cinético de saturación o Monod, obteniéndose una constante de saturación de 138,9 mg/Lh y una constante cinética de 4,06 mg/L.
3. Se calculó el área necesaria del humedal subsuperficial horizontal para la depuración de las aguas oleosas de la Central Eléctrica fuel oil Santa Clara Industrial “Los Alevines” que fue de 60 m², con un tratamiento primario previo.
4. Los indicadores dinámicos de rentabilidad indican que la inversión se puede recuperar antes de los dos años de la puesta en funcionamiento, con un VAN de \$53 452 y una TIR del 91%, demostrándose que el sistema de tratamiento propuesto para la depuración de las aguas oleosas en la Central Eléctrica fuel oil Santa Clara Industrial “Los Alevines” es sustentable.

Recomendaciones



Recomendaciones

Recomendaciones

1. Realizar el estudio cinético de la remoción de grasas, aceites e hidrocarburos, para obtener los modelos y constantes cinéticas para este contaminante.
2. Construir el sistema de tratamiento propuesto en la Central Eléctrica fuel oil Santa Clara Industrial “Los Alevines” y evaluar el comportamiento del mismo.

Bibliografia



Bibliografía

Bibliografía

1. Agenda 21, 1992. *Conferencia de la ONU sobre medio ambiente y desarrollo*. Río de Janeiro, s.n.
2. ANCAP, 2003. *Planta de Tratamiento de Residuos Oleosos Sólidos y Líquidos. Informe Ambiental Resumen*, Montevideo: s.n.
3. APHA, AWWA, WEF, 2005. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21th ed. Washington, DC, USA: s.n.
4. Baeder Bederski, O., 2001. *Punto de mira: Las necesidades del Tercer Mundo*, Alemania: s.n.
5. Berkel, V. R. & Lafleur, M., 1997. Development of an Industrial ecology toolbox for the introduction of industrial ecology in enterprises. *II Journal of Cleaner Production*, vol. 5(No. 1-2).
6. Berkel, V. R., Willems, E. & Lafleur, M., 1997. Development of an Industrial, ecology toolbox for the introduction of industrial ecology in enterprises. *I Journal of Cleaner Production*, vol. 5(No. 1-2).
7. Betancourt, C., Labaut, Y. & Bonachea, M., 2011. Propuestas para el tratamiento de los residuales líquidos generados en la fabricación de aceites en la refinería Sergio Soto. *Cub@: Medio Ambiente y Desarrollo; Revista electrónica de la Agencia de medio Ambiente*, Issue No. 21.
8. Blanco, E., 2009. *Tratamiento de aguas de producción a través de humedales construidos de flujo subsuperficial a escala piloto*, Venezuela: s.n.
9. Brix, H., 1993. *Treatment of wastewater in the rhizosphere of wetland plants-the root zone method*, s.l.: Water Science Technology.
10. Calderón, C., Romero, F. & Gómez, L., 2005. *Salud Ambiental y desarrollo*. Colombia: Ed. ECOSOLARLTDA.
11. Castillo, Y., Mata, M. & López, E., enero-abril 2012. Prodedimiento metodológico para la evaluación expost de un sistema de tratamiento de residuales. *Revista Universidad y Sociedad*, vol. 5(No. 1).
12. Castro, J. & Perdomo, S., 2003. *Los sistemas naturales como herramienta costo-efectiva para el tratamiento de aguas residuales*, s.l.: s.n.
13. CENTA, Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua, 2005. *Mejora de la calidad de las aguas costeras y de recreo*, Sevilla. España: s.n.
14. Chávez Chávez, L., 2012. *Evaluación del sistema de tratamiento de aguas oleosas residuales de la UEB Matanzas Transcupet*, La Habana: Instituto Politécnico José Antonio Echevarría (CUJAE). Tesis de Maestría.
15. Chudoba, J., Menéndez, C. & Pérez, J., 1986. *Fundamentos teóricos de algunos procesos para la purificación de aguas residuales*. La Habana: Editorial ISJAE.
16. Crites, R. & Tchobanoglous, G., 1998. *Small and Decentralized Wastewater Management Systems*. New York: McGraw Hill.

Bibliografía

17. Curt, M. D., Valdés, I. & Fernández, J., Julio 2005. *Tolerance of phragmites australis (cav.) trin and Typha Domingensis (pers.) steudel to water contamination by municipal wastewater in Noblejas (Toledo, España)*. Lorca, Murcia, España, Encuentro Nacional de Fitodepuración.
18. De Luís Calabuig, E., 2001. *Experiencias de Tratamiento de Efluentes con macrófitas en España*. Montevideo, Uruguay: Conferencia del Curso Internacional Tecnologías de Bajo Costo para el Tratamiento de Efluentes Agroindustriales. LATU (Laboratorio Tecnológico del Uruguay).
19. Degremont, 1979. *Water Treatment Handbook*. Fifth Edition ed. Francia: s.n.
20. Díaz, R., 1997. *Tratamiento de aguas residuales*. La Habana: Editorial ISPJAE.
21. EPA, 2000. Parameters and norms for water pollutions. *Interamerican Forum*, pp. 23-36.
22. Fernández, G., 2003. *Procesos de estabilización para residuos peligrosos. Segunda parte*, Universidad de Andalucía, España: s.n.
23. Folch, M., Salgot, M. & Huertas, E., 2004. *Combinación de tecnologías no convencionales en el tratamiento de Aguas Residuales de pequeñas comunidades: Los Hoteles de Pierola. Separación en humedales contruidos*. Barcelona: s.n.
24. Foreman, G. & Sims, R., 1984. *Slow sand filtration with and without zzeolite; a comparison of water treaatment efficent and filtration economics: Abstr. Ann. Meeting. Intermtn. Sect. Amer. Water works. Assn*, Jackson Hole, Wyoming, USA: s.n.
25. Frechen, F., Schier, W. & Felmeden, J., 2005. *Plant-covered retention soil filters (RSF). Fulda Fellenweg for advanced CSO treatment-a ten year field report*. Copenhagen, Denmark, 10th International Conference on Urban Drainage.
26. García, J. et al., 2001. Wastewater treatment by pond systems: experiences in Catalonia. In: Spain: Water Science Technology, pp. 35-42.
27. Germain, L., 1982. *Tratamiento de aguas*. Ediciones Omega ed. Barcelona: s.n.
28. Gersberg, R., Elkins, B., Lyon, S. & Goldman, C., 1986. Role of aquatic plants in wastewater treatment by artifical wetland. *Water Research*, Volumen vol. 20.
29. http://en.wikipedia.org/wiki/fuel_oil, s.f. [En línea].
30. <http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/fulltex>, s.f. [En línea].
31. <http://www.gov.ar/acciones/produccionlimpia>, s.f. [En línea].
32. <http://www.mediambiente.geoscopio.com>, s.f. [En línea].
33. <http://www.quiminet.com>, s.f. [En línea].
34. http://www.ubp.edu.pr/todo_ambiente, s.f. [En línea].
35. <http://www.zeusspetroleum.com/articulo.html>, s.f. [En línea].
36. INRH Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, Mayo 2004. Procedimiento para la aplicación de la norma NC 27-1999. Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado. Especificaciones. En: s.l.:s.n.

Bibliografía

37. Izquierdo, V., 2013. *Evaluación de una alternativa sostenible a escala de laboratorio para el tratamiento de los residuos líquidos de las centrales eléctricas que operan con diésel*, Universidad Central Martha Abreu de Las Villas: Trabajo de Diploma.
38. Jenssen, P., Mahlum, T. & Krogstad, T., 1993. potential use of constructed wetlands for wastewater treatment in northern environments. *Wate Science & Technology*, Issue No. 28.
39. Kadlec, R. & Knight, R., 1996. Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation. In: *IWA Specialist Group on use of Macrophytes in Water Pollution Control*. s.l.:IWA Publishing, p. 156.
40. Knight, R., Kadlec, R. & Reed, S., 1993. Database: Northamerican wetland for water quality treatment, US Environmental Protection Agency, Risk reduction environmental laboratory. In: Cincinnati, OH: s.n., pp. 133-150.
41. Kumar, K. V., Subanandam, K., Ramamurthi, V. & Sivanesan, S., 2011. Solid Liquid Adsorption for Wastewater treatment: Principle Design and Operation. *Ecological Engineering*, pp. 33-49.
42. Lahora Cano, A., 2007. *Los humedales artificiales como tratamiento terciario de bajo costo en la depuración de aguas residuales*, España: Encuentro medioambiental almeriense: En busca de soluciones.
43. Martínez, P. y otros, 1 al 4 de Junio 2010. *Caracterización físico-química de las aguas oleosas generadas en el proceso de centrifugación del diésel.*. Santa Clara, Villa Clara, Cuba: Memorias del IV Simposio Internacional de Química (SIQ 2010) y II Seminario Latinoamericano de Análisis de Ciclo de Vida.
44. Mayanga, C., s.f. <http://www.ingenieriaquimica.org/articulos/disenio-planta-aguas-residuales>. [En línea] [Último acceso: Marzo 2014].
45. Mesa, D. y otros, 2007. *Selección de microorganismos capaces de biodegradar fracciones pesadas del petróleo*, s.l.: Recopilación bibliográfica.
46. Metcalf & Eddy, 1995. *Tratamiento y depuración de aguas residuales*. España: Editorial Labor SA.
47. Mitchell, C. & McNevis, D., 2001. Alternative analysis of BOD removal in subsurface flow constructed wetlands employing Monod kinetics. *Water Research*, vol. 35(No. 5), pp. 1295-1303.
48. Moreno, M. y otros, 2003. *La depuración de aguas residuales urbanas de pequeñas poblaciones mediante infiltración directa en el terreno. Fundamentos y casos prácticos*, s.l.: s.n.
49. Norma Cubana, NC: 27, 2012. *Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado. Especificaciones*. Cuba, s.n.
50. Perdomo, S. y otros, 2000. *Constructed wetland: a more suitable alternative for wastewater purification in uruguayan dairy processing industry*. Florida, USA: 7th International Conference On Wetland Systems for Water Pollution Contamination, IAWQ, Proc. 1407-1415.

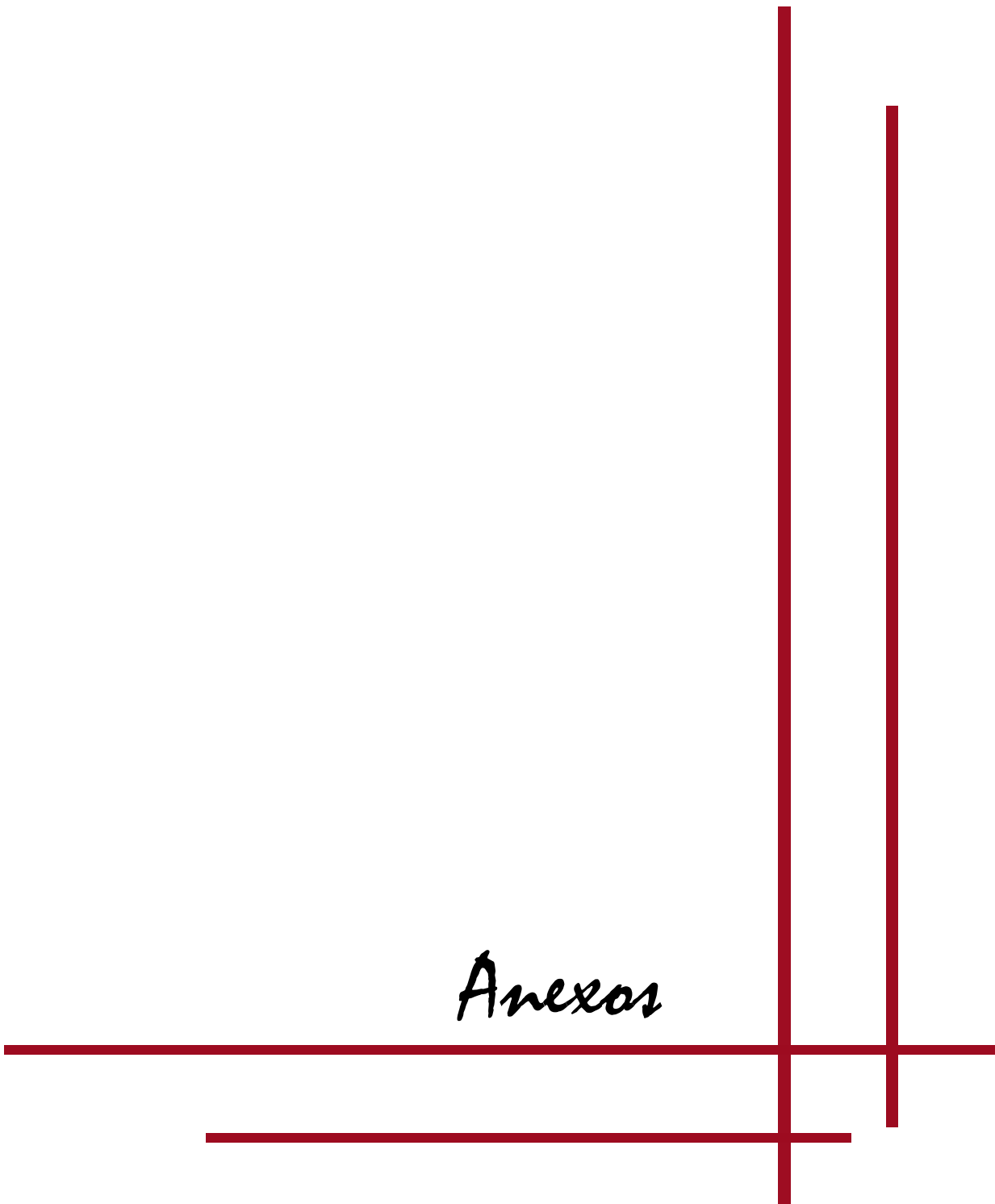
Bibliografía

51. Pérez Villar, M. M., 2006. *Evaluación preliminar del uso de filtros de suelo en la depuración de aguas residuales urbanas en la Universidad Central "Martha Abreu" de Las Villas*, Tesis presentada en opción al grado de Máster en Seguridad Tecnológica y Ambiental en Procesos Químicos. Universidad Central "Martha Abreu" de Las Villas: s.n.
52. Pérez Villar, M. M., Domínguez, E. R., Hernández Ruiz, J. M. & Cachaldora, I. J., febrero-mayo 2012. Humedal subsuperficial vertical para el tratamiento de aguas residuales: diseño, construcción y evaluación. *Revista Cubana de Química*, vol. XXIV(No. 2), pp. 147-154.
53. Pérez, J., 1995. *Estudio sanitario del agua*. s.l.:s.n.
54. Peters, M., 1991. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. International ed. s.l.:s.n.
55. Peters, M. & Timmerhaus, K., 2003. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers Internacional*. s.l.:s.n.
56. Prochaska, C. & Zouboulis, A., 2006. Removal of phosphates by pilot vertical flow constructed wetlands using a mixture of sand and dolomite as substrate. *Ecological Engineering*, vol. 26(No. 3).
57. Quilice, A., Camacho, F., Urquiola, A. & Mendoza, J., 30 de Julio 2005. *Evaluación piloto del proceso de "humedales construidos" para el tratamiento de aguas de producción..* Maracaibo, Venezuela: Memorias Técnicas VI Congreso Venezolano de Ecología.
58. Ramírez, C., 1992. *Tratamiento de aguas residuales industriales*. UNUM. Colección de texto ed. s.l.:s.n.
59. Reed, S., Crites, R. & Middlebrooks, E., 1995. *Natural Systems For Waste Management and Treatment*. 2nd Edition ed. New York: McGraw-Hill.
60. Russell, D. L., 2006. *Tratamiento de aguas residuales*. Global Environmental Operations, Inc. ed. Lilburn, Georgia: Reverté.
61. Salgot, M., Brissaud, F. & Campos, C., 1996. Disinfection of secondary effluents by infiltration-percolation. *Water Science & Technology*, vol. 29(No. 4).
62. Seoanez, M., 1995. *Aguas residuales: Tratamiento por humedales artificiales*, España: Ingeniería del Medio Ambiente.
63. Servín, V., 2000. *Tratamiento de Aguas Residuales*, s.l.: s.n.
64. SIDASA, Retos de las tecnologías de tratamiento de agua, 2012. <http://www.inerco.com/sidasa>. [En línea] [Último acceso: Marzo 2014].
65. Sikdar, A., 2007. *Quantification of complex phosphorus removal reactions occurring within wetlands filtration treatment systems*, Ontario, Canadá: Doctor of philosophy thesis, Department of Civil Engineering, Queen's University, Kingston.
66. Silva, J. P., 2000. *Humedales construidos*. Colombia: s.n.
67. Solano, M., Soriano, P. & Ciria, M., 2004. Constructed Wetlands as a Sustainable Solution for Wastewater Treatment in Small Villages. *Biosystems Engineering*, vol. 87(No. 1).

Bibliografía

68. Stottmeister, U. et al., 2003. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnology Advances*, vol. 2(No. 1).
69. Sun, G. & Austin, D., 2011. Completely autotrophic nitrogen removal over nitrite in lab-scale constructed wetlands: Evidence from a mass balance study. *Chemosphere*, vol. 68(No. 6), pp. 1120-1128.
70. Valdez Iriarte, C. W., 2011. *Tratamiento físico químico de residuales oleosos*, Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería. Tesis para optar por el título de Ingeniero en Petróleo.
71. Vymazal, J., 2007. removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the total environment*, vol. 380(No. 1-3), pp. 48-65.
72. Watson, J.T; Reed, S.C, Kadlec, R.H, Knight, R.L; Whitehouse, A.E, 1989. *Performance Expectations and loading Rates for Constructed Wetlands. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. Municipal, Industrial and Agricultural*. Lewis Publishers ed. Chelsea: Hammer D.A .

Anexos



Anexos

Anexo A

Resumen del Cálculo Económico

Concepto	0 años	1 año	2 años	3 años	4 años	5 años
Ingresos		\$16,000.00	\$16,000.00	\$16,000.00	\$16,000.00	\$16,000.00
Costos Operacionales		\$310.87	\$310.87	\$310.87	\$310.87	\$310.87
Beneficio Operacionales		\$15,689.13	\$15,689.13	\$15,689.13	\$15,689.13	\$15,689.13
Depreciación		\$1,554.35	\$1,554.35	\$1,554.35	\$1,554.35	\$1,554.35
Beneficios antes Impuestos		\$14,134.78	\$14,134.78	\$14,134.78	\$14,134.78	\$14,134.78
Impuestos						
Beneficios después Impuestos		\$14,134.78	\$14,134.78	\$14,134.78	\$14,134.78	\$14,134.78
Inversión	\$17,270.60					
Pago de deuda		\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Flujo de caja	-\$17,270.60	\$15,689.13	\$15,689.13	\$15,689.13	\$15,689.13	\$15,689.13
Flujo de caja Actualizado	-\$17,270.60	\$13,642.72	\$11,863.24	\$10,315.86	\$8,970.31	\$7,800.27
Flujo de caja al descontado	-\$17,270.60	-\$3,627.88	\$8,235.36	\$18,551.21	\$27,521.52	\$35,321.79
Concepto		6 años	7 años	8 años	9 años	10 años
Ingresos		\$16,000.00	\$16,000.00	\$16,000.00	\$16,000.00	\$16,000.00
Costos Operacionales		\$310.87	\$310.87	\$310.87	\$310.87	\$310.87
Beneficio Operacionales		\$15,689.13	\$15,689.13	\$15,689.13	\$15,689.13	\$15,689.13
Depreciación		\$1,554.35	\$1,554.35	\$1,554.35	\$1,554.35	\$1,554.35
Beneficios antes Impuestos		\$14,134.78	\$14,134.78	\$14,134.78	\$14,134.78	\$14,134.78
Impuestos						
Beneficios después Impuestos		\$14,134.78	\$14,134.78	\$14,134.78	\$14,134.78	\$14,134.78
Inversión						
Pago de deuda		\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Flujo de caja		\$15,689.13	\$15,689.13	\$15,689.13	\$15,689.13	\$15,689.13
Flujo de caja Actualizado		\$6,782.84	\$5,898.12	\$5,128.80	\$4,459.83	\$3,878.11
Flujo de caja al descontado		\$42,104.64	\$48,002.76	\$53,131.57	\$57,591.40	\$61,469.51
VAN	\$53,451.75					
TIR	91%					
Interés	15%					