

UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS
FACULTAD DE QUÍMICA Y FARMACIA



**TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL GRADO DE MÁSTER EN SEGURIDAD
TECNOLÓGICA Y AMBIENTAL EN PROCESOS QUÍMICOS**

Título: “Diseño de un humedal subsuperficial para la depuración de las aguas
residuales de la industria Lava Jeans”

Autor: Ing. Willian Israel Barreno Rojas

Tutoras. Dra.C. Maira María Pérez Villar
Dra.C. Margie Zorrilla Velazco

Santa Clara 2018

Dedicatoria

A mis padres que siempre me apoyaron a lo largo de mi carrera, por forjarme un hombre de bien, por hacer hasta lo imposible para ayudarme.

A mi esposa e hijo, por todo el apoyo que me brindaron, por esperar que cada vez vuelva, porque sin ellos no hubiera sido posible mi sueño.

A mis hermanos por siempre estar pendientes y brindarme su apoyo.

Agradecimientos

Por ser un pilar fundamental a lo largo de la Maestría agradezco:

Primeramente, a Dios por enviarme las fuerzas necesarias y permitirme seguir luchando día a día.

A mis tutoras: Dra. Maira María Pérez Villar y Dra. Margie Zorrilla Velazco, por brindarme toda su ayuda y paciencia.

Al Dr. Félix Abel Goya, por abrirme las puertas en la Universidad “Marta Abreu” de Las Villas, por su gran gesto de amabilidad y generosidad.

A todos los profesores del CEQA que me brindaron sus conocimientos y por todo el apoyo a lo largo de la Maestría.

A la industria Lava Jeans, por permitirme acceder a la información necesaria para la realización de la tesis.

A mis amigos en Cuba, Cristian, Diainelys y Dianelys, por abrirme las puertas de sus hogares y darme la mano cuando lo necesite.

A todo aquel que de una u otra manera se hicieron presentes con su apoyo en el transcurso de la maestría.

Resumen

En el presente trabajo, primeramente se evaluó la remoción de colorantes y materia orgánica en dos humedales experimentales, obteniéndose como resultado un mejor comportamiento del humedal plantado. Posteriormente se evaluó la cinética de remoción de dos colorantes y materia orgánica en un humedal subsuperficial experimental plantado con *Cyperus Alternifolius* y con suelo pardo como sustrato. Se obtuvieron las curvas de calibración de los colorantes, alcanzándose una linealidad adecuada en el rango de concentraciones evaluadas. El análisis cinético realizado mostró que la mayor remoción de colorantes en el humedal ocurrió en los primeros cinco minutos de tiempo de retención, observándose una tendencia a la desorción a partir de los doce minutos; mientras que la disminución de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) se estabilizó pasado los noventa minutos y mostró el mejor ajuste al modelo cinético de Saturación o Monod. El humedal experimental mostró eficiencias de 70 % de remoción de color y de 80 % de remoción de materia orgánica, logrando la disminución de la concentración de la DQO por debajo del límite de vertimiento. Se realizó el diseño del humedal subsuperficial como tratamiento secundario de las aguas residuales de la industria Lava Jeans. Se obtuvo un área necesaria para la remoción de DQO de 12 m², proponiéndose dos celdas para mayor facilidad de operación y mantenimiento. Finalmente, se realizó la evaluación económica del humedal subsuperficial, demostrándose la factibilidad del mismo, recuperándose la inversión al año de la puesta en funcionamiento.

Abstract

In the present research, firstly the removal of dyes and organic matter in two experimental wetlands was evaluated, obtaining in a better behavior of the planted wetland. Subsequently, the kinetics of removal of two dyes and organic matter in an experimental subsurface wetland planted with *Cyperus Alternifolius* and with brown soil as substrate was evaluated. The calibration curves of the dyes were obtained, reaching an adequate linearity in the range of evaluated concentrations. The kinetic analysis showed that the greatest removal of dyes in the wetland occurred in the first five minutes of retention time, observing a tendency to desorption after twelve minutes, while the decrease in Chemical Oxygen Demand (COD) stabilized after ninety minutes and showed the best fit to the kinetic model of Saturation or Monod. The experimental wetland showed efficiencies of 70 % of color removal and 80 % of organic matter removal, achieving a decrease in COD concentration below the discharge limit. The subsurface wetlands were designed as secondary treatment for the wastewater of the Lava Jeans industry. A necessary area for the removal of COD of 12 m² was obtained, proposing two cells for ease of operation and maintenance. Finally, the economic evaluation of the subsurface wetland was carried out, demonstrating the feasibility of the same, recovering the investment a year after the start-up.

Índice

Introducción.....	1
Capítulo I. Análisis bibliográfico.....	4
1.1 Aguas Residuales de la Industria Textil.....	4
1.1.1 Características de las aguas residuales industrial textil.....	4
1.1.2 Origen de las aguas residuales textil. Proceso de lavado y tinturado.....	6
1.1.3 Sistemas de tratamiento para aguas residuales de la industria textil.....	7
1.2. Humedales artificiales.....	12
1.2.1 Clasificación de los humedales.....	13
1.2.2 Componentes de los humedales.....	14
1.2.3 Mecanismos de remoción.....	18
1.2.4 Criterios de diseño.....	19
Conclusiones Parciales.....	22
Capítulo II. Evaluación de la remoción y estudio cinético a escala laboratorio.....	23
2.1. Evaluación preliminar de la remoción de colorante y materia orgánica en humedales experimentales.....	23
2.1.1 Sistema experimental.....	23
2.1.2 Evaluación de la remoción en los humedales experimentales.....	25
2.2. Evaluación de la cinética de remoción de colorantes y materia orgánica.....	29
2.2.1. Cinética de remoción de colorantes.....	30
2.2.2 Cinética de remoción de materia orgánica.....	30
2.3 Evaluación de la eficiencia de remoción de colorantes y materia orgánica en el humedal experimental.....	34
Conclusiones parciales.....	36
Capítulo III: Diseño y evaluación económica del humedal subsuperficial como tratamiento secundario.....	37
3.1 Diseño del humedal subsuperficial horizontal.....	37
3.1.1 Parámetros de diseño del humedal.....	37
3.2 Sistema de tratamiento propuesto para la depuración de las aguas residuales.....	39
3.1.3 Dimensionamiento del humedal subsuperficial horizontal como tratamiento secundario.....	40
3.2 Evaluación económica de las alternativas de tratamiento.....	42
3.2.1. Costo de la inversión.....	43
3.2.2 Costo de operación.....	44

3.2.3 Ingresos, considerando las externalidades	44
3.2.4 Análisis de los indicadores dinámicos de rentabilidad	44
Conclusiones parciales	47
Conclusiones	48
Recomendaciones	49
Bibliografía	50

Introducción

A nivel mundial, se han demostrado que las industrias contaminan y generan residuos que ponen en peligro los recursos hídricos, pues dañan y destruyen los ecosistemas del planeta. La industria textil ha presentado notables problemas medioambientales vinculados principalmente al uso y la gestión del agua. Las aguas residuales de la industria textil han llegado a ser un problema igual o mucho más grande que las domésticas. Esta industria debido a su demanda de producción, han aumentado la cantidad de aguas residuales proporcionalmente, por lo que hoy es uno de los mayores problemas de contaminación.

El impacto ambiental de los efluentes líquidos de la industria textil, que son descargados al sistema de alcantarillado o a un cuerpo de agua, es muy diverso, por la gran variedad de materias primas, reactivos (colorantes y auxiliares) y métodos de producción existentes en ellos. Esta industria, además de contaminar el medio consume diariamente grandes cantidades de agua. Dichos efluentes se caracterizan generalmente por su elevada Demanda Química de Oxígeno (DQO), debido a los compuestos orgánicos refractarios; Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), debida a la materia orgánica biodegradable, elevada temperatura, alto contenido en color, pH inestable y sólidos en suspensión (Salas, 2010).

A diferencia de las aguas urbanas, en las que la mayoría de los compuestos orgánicos son fácilmente biodegradables, el tratamiento de las aguas industriales textiles puede complicarse por contener compuestos difíciles de degradar biológicamente. Por lo tanto, son muchos los casos en los que se requieren tratamientos más específicos y avanzados.

Una gran proporción de los colorantes empleados en el teñido de tejidos, no son directamente tóxicos para los organismos vivos; sin embargo, la fuerte coloración que imparten a los medios de descarga pueden llegar a suprimir los procesos fotosintéticos en los cuerpos de agua e implica un alto riesgo a la salud humana y al ecosistema debido a que algunos de estos colorantes o sus subproductos son altamente tóxicos, mutagénicos o carcinogénicos, haciendo necesario que su presencia sea controlada (Salinas, 2011).

Torres (2012), mediante un estudio en 8 industrias textiles en el cantón Pelileo, provincia de Tungurahua, Ecuador, que se dedican al lavado y tinturado de jeans, determinó que varios parámetros estaban fuera de la legislación ambiental vigente, (TULAS) Texto Unificado de

Legislación Ambiental Secundaria (TULAS, 2012). Los parámetros que mostraron valores fuera de los límites de esta norma fueron: pH, DBO₅, DQO, sólidos suspendidos y sulfuros.

La industria “Lava Jeans”, ubicada en esta provincia de Tungurahua cantón Ambato, dedicada al lavado y tinturado de jeans, generan una gran cantidad de aguas residuales, que son conducidas al sistema de tratamientos de efluentes, este sistema de tratamiento fue diseñado con un tratamiento primario (coagulación y floculación), para remover la mayor concentración de contaminantes y verter a un cuerpo de agua con los límites máximos permisible, como lo establece el TULAS.

En consideración al sistema de tratamiento diseñado, que solo cuenta con un tratamiento primario, los límites máximos solo cumplen para el vertimiento a un sistema de alcantarillado y no a un cuerpo de agua dulce, por ende, se debe aplicar alternativas de solución, para implementar un método apropiado, con bajo costo y facilidad de construcción, operación y mantenimiento, para ello, entre las alternativas más apropiadas se encuentran los humedales subsuperficiales.

El uso de humedales para depurar aguas es una opción de tratamiento de aguas residuales reconocida y recomendada que se han demostrado mediante estudios realizados por Gonzáles et al., (2016) que son efectivos en la remoción de materia orgánica para transformar y asimilar nutrientes y retienen y/o eliminan sustancias tóxicas que de otra manera serían vertidas sin tratamiento alguno al medio ambiente. Este método natural de tratamiento es de bajo costo, con empleo bajo o nulo de energía eléctrica, no requiere personal altamente calificado para su operación y mantenimiento y se adapta a las características del terreno. Khazaleh and Gopalan, (2018), afirman que el uso de las plantas acuáticas en tratamientos de aguas residuales, han demostrado ser eficientes en la remoción de una amplia gama de sustancias orgánicas, así como nutrientes y metales pesados.

Salinas (2011); Davies et al. (2005); Soon-An et al. (2009) han desarrollado diversas investigaciones sobre la remoción de colorantes en aguas residuales de la industria textil mediante humedales subsuperficiales, los que han mostrado elevadas eficiencias de remoción, tanto de los colorantes como los diversos productos orgánicos que la componen. Estos resultados obtenidos junto a las ventajas antes mencionadas de los humedales revelan

a este método de tratamiento como una alternativa viable para la depuración de estas aguas residuales.

Problema Científico

La capacidad insuficiente de depuración del sistema de tratamiento de aguas residuales en la empresa Lava Jeans, conduce a un alto grado de sensibilidad, para el recurso hídrico, repercutiendo negativamente en el ecosistema y en la salud de las personas.

Hipótesis

Con la aplicación de humedales subsuperficiales de flujo horizontal como tratamiento secundario, se puede lograr la depuración de los contaminantes de las aguas residuales de la empresa Lava Jeans.

Objetivo general

Diseñar un humedal subsuperficial horizontal como tratamiento secundario de las aguas residuales generadas en la empresa Lava Jeans.

Objetivo específico

1. Evaluar a escala de laboratorio el comportamiento en la remoción de la materia orgánica y colorantes con humedales subsuperficiales horizontales.
2. Obtener los modelos cinéticos de la remoción de materia orgánica en el humedal experimental.
3. Diseñar un humedal subsuperficial horizontal como tratamiento secundario de las aguas residuales de la empresa Lava Jeans, utilizando los modelos obtenidos a escala de laboratorio.
4. Realizar una evaluación económica del humedal subsuperficial propuesto como tratamiento secundario.

Capítulo I. Análisis bibliográfico

1.1 Aguas Residuales de la Industria Textil

Las aguas residuales son de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, que hayan sufrido degradación en su calidad original. Se trata de aguas con un alto contenido en elementos contaminantes, que a su vez van a contaminar aquellos sistemas en los que son evacuadas. Las aguas residuales industriales se producen en cualquier actividad de producción, transformación y manipulación en la que se utilice agua. Poseen diferentes composiciones, caudales y características, debido a la diversidad de industrias que la generan (Salas, 2003).

Las aguas residuales de la industria textil provienen de una serie de procesos húmedos englobados bajo los términos de preparación, tintura y acabados, estos procesos son el origen de la mayor parte de los efluentes acuosos de esta industria. Dichas aguas residuales poseen elevadas concentraciones de colorantes, contaminantes orgánicos refractarios, compuestos tóxicos, componentes inhibidores, tensoactivos, componentes clorados, esto debido a todo el proceso que sufre las prendas mediante el lavado y teñido. Por lo tanto, se constituyen en uno de los efluentes más difícil a tratar (López and Crespi, 2015).

1.1.1 Características de las aguas residuales industrial textil

Las características de las aguas residuales generadas en una planta textil dependerán de las operaciones específicas que se realicen, principalmente del tipo de fibra tratada y de la maquinaria utilizada. A pesar de la gran variedad de procesos y de productos químicos utilizados, las aguas residuales producidas en la industria de fibras naturales presentan unas características comunes, a excepción de los procedentes del lavado de la lana. Los efluentes de fibras naturales se caracterizan por una gran variabilidad de caudal y de carga contaminante, así como un bajo contenido de materias en suspensión y coloidales. Generalmente son coloreadas, su carga orgánica media es aproximadamente el doble que la de un agua residual urbana y generalmente no presenta productos tóxicos ni microorganismos patógenos. La industria textil, como resultado de las diferentes actividades que realiza, genera aguas residuales de características muy variables, siendo deficientes en nutrientes, principalmente en nitrógeno (Bernal et al., 2017).

Los principales colorantes utilizados a escala mundial en la industria textil son del tipo azo, los cuales son compuestos químicos xenobióticos difíciles de biomineralizar por la alta estabilidad a la luz y al ataque microbiano. Está considerado que algunos compuestos que se derivan de ellos son, carcinogénicos y mutagénicos, razón por la cual es importante su biomineralización, además de los efectos antiestéticos que confiere al agua como factor secundario (Garcés and Peñuela, 2007).

Como consecuencia de las operaciones en la industria textil, el agua residual presenta características particulares como: almidones, dextrinas, gomas, glucosas, ceras, pectinas, alcoholes, ácidos grasos, ácido acético, jabones, detergentes, hidróxido de sodio, carbonatos, sulfuros, cloruros, colorantes y pigmentos, peróxidos etc., el pH varía entre 5 y 10, y predomina el color del colorante (Cortazar et al., 2012).

Además, las aguas residuales generadas en los procesos de tintura y acabados textiles presentan:

- Gran variabilidad de caudal y carga contaminante
- Bajo contenido de materia coloidal y en suspensión
- La mayor parte de contaminantes son solubles y moderadamente biodegradables
- Su carga orgánica media (DQO) es aproximadamente el doble que la de un efluente urbano
- Su toxicidad es baja comparada con otros sectores industriales
- A menudo son deficitarias en nutrientes (N, P)
- Exentas de microorganismos patógenos
- Sus principales características específicas son su elevada coloración y salinidad

Características físico-químicas de los colorantes

Los colorantes utilizados en la actualidad poseen diversas estructuras, las cuales llegan a ser muy variadas y complejas. Su origen es sintético, muchos poseen una alta solubilidad en agua, son altamente resistentes a la acción de sustancias químicas y en algunos procesos físicos y son poco biodegradables.

Los colorantes para textiles pueden ser clasificados de acuerdo a su aplicación a la fibra o por su constitución química: en ácidos, básicos, dispersos, mordientes, reactivos y a la tinta; esta clasificación se basa en las condiciones en las cuales se efectúa el proceso de tintura. La segunda clasificación se hace con base al grupo cromóforo principal que constituye el colorante; el Color

Índex usa la siguiente clasificación: nitroso, nitro, azo, azoico, estilbeno, diarilmetano, trialrilmetano, santeño, quinoleína, metino, acridina, azufre, tiazol, tiamina, indamina, azina, oxacina, lactona, antraquinona, indigoide y ftalocianina (Cortazar et al., 2012).

1.1.2 Origen de las aguas residuales textil. Proceso de lavado y tinturado

En la industria se realiza el lavado y tinturado a dos tipos de telas: jeans y cruda (tela blanca). Para el lavado y tinturado del jeans se realiza una serie de procesos:

Stone 1

Antes de empezar cualquier proceso de producción todas las paradas de prendas jeans son sometidas al pesaje de las mismas, de esta manera se programa la cantidad de agua, porcentajes y cantidades de auxiliares textiles a utilizar como de colorantes y productos químicos a utilizarse en cada una de las paradas establecidas.

Descripción del Proceso. - Dentro de este proceso intervienen los siguientes procesos unitarios:

- ✓ Desgomado. - proceso unitario que tiene como fin la eliminación de la goma de yuca, pectinas, grasas, del algodón (tela jeans), para esto se utiliza como materias primas: agua, desengomante (poliacrilamina), ácido acético para regular las condiciones de trabajo y la enzima alfa amilasa, esta operación unitaria se realiza a 60 °C por 12 minutos.
- ✓ Stone. - Cuyo propósito es dar los respectivos contrastes a la prenda jeans, para este se utiliza como materia prima: prendas jeans, agua, ácido acético para regular el pH y enzima celulósica, esta operación se realiza a 60 °C por 40 minutos.
- ✓ Brillo. - Proceso en el que se utiliza productos químicos como hidróxido de sodio, suavizante, detergente, y brillo neutro, se realiza a 50 °C por 15 minutos.

Lavado y teñido tela cruda (blanca)

Procesos unitarios:

- ✓ Blanqueo.- Las telas crudas, especialmente las concentradas como la mezclilla (jean), contienen impurezas, el blanqueamiento de la prenda se logra al reducir todas las impurezas. La mayoría de las empresas que realizan el sub proceso de blanqueo utilizan el peróxido de hidrogeno (H_2O_2), que es el principal blanqueador, aunque con menor frecuencia también se usan el hipoclorito de sodio ($NaClO$) o clorito de sodio ($NaClO_2$).

- ✓ Enjuague.- Permite retirar los productos químicos adicionados de los procesos anteriores con una cantidad necesaria de agua.
- ✓ Neutralizado.- La coloración amarillenta de las prendas en el caso de la utilización de cloro y manchas de color violeta en el caso de permanganato hace necesaria la incorporación de compuestos neutralizantes tales como el meta bisulfito de sodio, ácido oxálico, ácido fórmico, entre otros, cuya acción es convertir estos excedentes químicos en formas inactivas.
- ✓ Teñido y fijado. - Es el subproceso que mayor contaminación causa debido a que no solo se requiere el uso de colorantes y químicos, sino también otros productos como sulfuro, sal, que son considerados como auxiliares del tinturado. Estos productos incrementan las propiedades del producto terminado, mejorando considerablemente la calidad de la tintura. Es importante controlar el pH, que se logra con una solución buffer y agentes oxidantes, agentes humectantes que son fundamentales para un perfecto tinturado, los agentes igualantes facilitan una distribución uniforme del colorante sobre el textil, para obtener tonalidades e intensidades de coloración uniformes. El proceso de teñido se realiza a una temperatura de 86 °C durante 20 minutos.
- ✓ Suavizado.- Este proceso consiste en dar a la prenda una textura reluciente y suave por medio de químicos suavizantes y ácido fórmico durante 10 minutos a una temperatura de 30 °C.
- ✓ Centrifugado y secado.- Es utilizado para eliminar el exceso de agua. Es decir, ajustar la humedad de las prendas para un mejor empleo y distribución. Como resultado del proceso de lavado y tinturado se tiene agua residual con: DQO, DBO, sólidos suspendidos, aceites y grasa, alta temperatura, tensoactivos, fenoles, sulfuros.

1.1.3 Sistemas de tratamiento para aguas residuales de la industria textil

Los sistemas de tratamiento resultan de la combinación de procesos y operaciones unitarias en los que se pueden diferenciar distintos niveles para las aguas residuales. El objetivo principal de una planta de tratamiento de aguas residuales industriales es la remoción de contaminantes seleccionados (DQO, DBO, sólidos totales, color, tenso activos, entre otros). La selección del sistema de tratamiento depende de una serie de factores, dentro de los cuales se incluyen:

- Característica del agua residual: DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxígeno), materia en suspensión, pH, productos tóxicos, entre otros
- Calidad del efluente necesario para la descarga
- Costo y disponibilidad de terrenos
- Tecnologías disponibles

De acuerdo a esto, es posible encontrar tratamientos de tipo primario, secundario y terciario, antes de ello un pretratamiento necesario, los cuales se detallan a continuación

Pretratamiento:

Tiene como objetivo principal eliminar de las aguas residuales todos aquellos elementos de tamaño considerable que por su acción mecánica pueden afectar al funcionamiento del sistema depurador, así como las arenas y elementos minerales que puedan originar sedimentación a lo largo de las conducciones.

Tratamiento primario:

Tienen como propósito retirar sólidos suspendidos que lograron pasar el tratamiento preliminar para evitar su interferencia en el tratamiento secundario. Se hacen sedimentar los materiales suspendidos usando tratamientos físicos o físico-químicos, lográndose como mínimo el 60 % de remoción. Uno de los tratamientos más usados en esta industria es el físico/químico sobre la base de coagulación y floculación (Yue et al., 2008).

Coagulación y floculación

Este proceso se basa en la adición de polielectrolitos o floculantes inorgánicos (sales de hierro o aluminio), que forman flóculos con las moléculas de colorante facilitando su eliminación por sedimentación. Este proceso es eficiente al tener altos porcentajes de remoción de color. El equilibrio del sistema se alcanza en tiempos cortos de 2-4 horas. Este tratamiento trae consigo varias desventajas, el proceso genera lodos que deben ser eliminados. Los mejores rendimientos se logran al aplicar un exceso de coagulante, que aumenta la concentración de contaminante en el efluente. Este proceso no es eficiente para colorantes altamente solubles y el resultado con colorantes azoicos, ácidos, reactivos generalmente no son muy buenos (Zhou et al., 2008).

Entre los principales coagulantes utilizados a nivel mundial se encuentran:

- ✚ Sulfato de Aluminio Al₂(SO₄)₃

+ Aluminato Sódico NaAlO_2

+ Cloruro de Aluminio AlCl_3

+ Policloruro de Aluminio (PAC) Al_2O_3

El Policloruro de Aluminio (PAC) Al_2O_3 es un nuevo tipo de floculante de polímero inorgánico altamente eficiente, el mismo es utilizado por la industria Lava Jeans.

Tratamiento secundario:

Consiste en la degradación de la materia orgánica presente en el agua residual, y que no ha sido retirada durante el tratamiento primario, mediante un proceso biológico con microorganismos que utilizan dicha materia orgánica como nutriente.

El tratamiento secundario puede ser de naturaleza aeróbica o anaeróbica. La diferencia entre ellas está en la generación de metabolitos finales, las necesidades de oxígeno y la cantidad de biomasa producida. Por ejemplo, la productividad de la biomasa en condiciones aeróbicas es de 60 % más que la de un sistema anaeróbicos. El proceso secundario más habitual es un proceso biológico en el que se facilita que bacterias aerobias digieran la materia orgánica que llevan las aguas residuales. Dentro de los procesos biológicos convencionales empleados en el tratamiento de efluentes de la industria textil tenemos los siguientes: aerobios, anaerobios y acoplados.

Procesos aerobios

Pocos estudios han reportado que los colorantes azo pueden ser utilizados por las bacterias aerobias como fuente de carbono y energía. Por lo general, los tratamientos aerobios basados en consorcios de bacterias en sistemas convencionales no son capaces de degradar colorantes procedentes de efluentes textiles. Sin embargo se ha conseguido aislar cepas de bacterias que son capaces de degradar algunos colorantes (Robinson et al., 2001; Buitrón et al., 2004), resultando poco favorable al momento de utilizar debido a su mecanismo primario de remoción es la adsorción sobre la pared celular. La reducción de la DQO no está correlacionada con la decoloración del efluente necesitándose elevados tiempos de retención hidráulica y manifestándose la inhibición por compuestos recalcitrantes (Robinson et al., 2001).

Proceso anaerobio

Este proceso ha sido empleado en gran medida para el tratamiento de colorantes ya que ha demostrado una gran eficiencia de decoloración. La decoloración de compuestos azo mediante este proceso no es considerada específica debido a que diversas cepas pueden romper el enlace azo de manera eficiente. Van der Zee and Villaverde (2005), realizaron investigaciones que han reportado trabajos con altas eficiencias de decoloración. Es importante destacar que el tipo de reactor, el tiempo de retención hidráulica, el origen y la estrategia de aclimatación del inóculo, la presencia de mediadores redox, así como el tipo y la concentración de co-sustrato juegan un papel importante en la eficiencia de decoloración (Rai et al., 2005).

Este proceso muestra algunas desventajas como la generación de subproductos tóxicos, el requerimiento de cepas específicas, las bajas remociones de materia orgánica expresada como DQO, el probable efecto recalcitrante de los auxiliares del proceso de tinción, los largos periodos de aclimatación, los colorantes y otros compuestos refractarios no se mineralizan y los micronutrientes presentes en las aguas residuales como N y P no se remueven mediante este sistema (Rai et al., 2005).

Procesos acoplados

Cuando se conocen las bondades, capacidades y limitaciones de diferentes tipos de tratamientos, físicos, químicos y biológicos, es conveniente utilizar las ventajas encontradas en cada uno de ellos y combinarlas en tratamientos que se denominan acoplados. Los tratamientos acoplados, ya sea combinando procesos fisicoquímicos y biológicos o sólo biológicos (anaerobio-aerobios) son una buena alternativa para el tratamiento de estos efluentes. Su inconveniente resulta que tiene tiempos elevados de residencias en fase anaerobia, requerimientos de cepas específicas para degradar colorantes específicos, uso de co-sustratos (Moller and Garzón, 2006).

Tratamiento terciario

El tratamiento terciario o avanzado tiene como objetivo eliminar los contaminantes específicos presentes en el agua residual, mediante procesos físicos, químicos y biológicos especiales.

Este proceso complementa las etapas anteriores que no fueron eficientes en la degradación de, nutrientes, fósforo y nitrógeno, con ello lograr efluentes más puros. Al efluente final se le puede dar diferentes usos como recarga de acuíferos, riego de cultivos, recreación, en zonas verdes, entre

otros. Es un tratamiento completo, pero su aplicación resulta ser muy cara. Entre ellos los más utilizados en la industria textil son: la adsorción, membranas de filtración y procesos de oxidación avanzada (Marín and Osés, 2013).

Adsorción

La eficacia del proceso de adsorción está influenciada por una gran variedad de parámetros, entre ellos la interacción entre el colorante y el soporte, superficie específica, tamaño de la partícula, temperatura, pH o tiempo de contacto. La eficacia del método depende en gran medida del tipo de soporte elegido. Se emplean tanto soportes inorgánicos como orgánicos. Los primeros tienen una gran estabilidad mecánica y química, alta superficie específica y alta resistencia a la degradación microbiana. Los soportes orgánicos se generan a partir de fuentes renovables o son residuos industriales (Hai et al., 2007).

Los procesos de adsorción generan efluentes de alta calidad, aplicable a diferentes colorantes (ácidos, básicos, reactivos), con posibilidad de reutilización del agua dentro del proceso, así como una elevada capacidad de tratamiento. Estos procesos además presentan varias desventajas, son procesos lentos; no selectivos, de manera que hay una competición entre las moléculas del colorante y otros compuestos presentes en el efluente; no destructivos, generándose un residuo que debe ser eliminado. La desorción es un proceso muy difícil y costoso. Los adsorbentes suelen ser caros y en ocasiones requieren un proceso de activación previo (Hai et al., 2007).

Membranas de filtración

Los métodos de tratamiento basados en el empleo de membranas permiten una separación efectiva de las moléculas de colorante y otros compuestos de tamaño mayor al del poro de la membrana seleccionada. Los métodos, tales como microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración, ósmosis inversa y la adsorción, son altamente eficientes (Zhang et al., 2009).

Este método brinda varias comodidades, es aplicable a un número amplio de colorantes. Resulta factible con la combinación de procesos biológicos y de oxidación avanzada. La fracción de rechazo de la membrana puede ser incinerada favoreciéndole balance energético del proceso. Este método así como otros métodos avanzados tiene un costo elevado, altos costos energéticos del tren de tratamiento, generación de lodos tóxicos y taponamiento de las membranas (Zhang et al., 2009).

Procesos de oxidación avanzada

- ✓ Fenton/UV Mejora las cinéticas de remoción del carbono orgánico y de disminución de DQO sobre los diferentes tipos de colorantes y pigmentos, manteniendo los porcentajes de decoloración cercanos al 100%.
- ✓ Sistemas de ozonación: Consiste en la oxidación del compuesto orgánico mediante la aplicación de ozono, es posible alcanzar porcentajes de remoción entre el 98 y 100 % para los diferentes tipos de colorantes, en periodos de tiempo inferiores a los 15 minutos. La reducción en los valores de DQO reportados para la ozonación, pueden variar en general, entre el 10 y el 48 %. Resulta ser un método costoso por los elevados precios del equipamiento a utilizar.
- ✓ La electrocoagulación: La tecnología utiliza valores de densidad de corriente, ha alcanzado porcentajes de remoción de color y disminución de DQO superiores al 90 y 80%, respectivamente.
- ✓ Procesos fotocatalíticos: Análogos al proceso fenton/UV, utilizan como principal catalizador el dióxido de titanio. Se remueve el color entre 90 y 100% (Barrios et al., 2015, Xin et al., 2014, Zodia et al., 2013).

Estos métodos muestran una gran eficiencia en la remoción de colorantes y DQO presentes en las aguas residuales de la industria textil, sin embargo, algunas limitaciones como la generación de lodos, el costo de operación y reactivos, y la generación de subproductos solubles, usualmente más tóxicos, impiden su uso extendido. Existe entonces una justificada necesidad de búsqueda de nuevas alternativas de tratamiento, económicas y técnicamente competitivas.

1.2. Humedales artificiales

Los humedales naturales son ecosistemas acuáticos, que cumplen múltiples funciones tales como captación y reciclaje de nutrientes, generación de hábitats, estabilización de costas, control y amortiguación de inundaciones, recarga de aguas subterráneas, entre otras. Así también, cumplen un rol importante en el tratamiento de agentes contaminantes en el agua, actuando como verdaderos riñones. Esto ha permitido que el hombre haya inventado sistemas artificiales que emulen estas funciones, creando humedales artificiales o construidos, para el tratamiento de efluentes de origen urbano como industrial (Dan et al., 2017, Feo and Gisi, 2010).

Estos sistemas presentan un sin número de ventajas comparativas sobre los tratamientos convencionales desde el punto de vista económico, debido a que presentan bajos costos de

construcción, operación y/o mantenimiento, siendo la mejor alternativa a la hora de tratar aguas residuales. El proceso de depuración en los mismos utiliza conceptos hidráulicos, microbiológicos y/o biológicos para simular y controlar los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en los humedales naturales. Su diseño se basa principalmente en el uso de plantas macrófitas emergentes, flotantes y/o sumergidas, dispuestas en lagunas, canales o zanjas a una profundidad inferior a 1 m; y en la introducción de parámetros climáticos tales como precipitaciones, temperatura y radiación. La compleja interacción entre los distintos componentes de estos sistemas (sustrato, columna de agua, vegetación y microorganismos) condicionan el grado de depuración que pueden ser alcanzado (Stottmeister et al., 2003).

1.2.1 Clasificación de los humedales

Los humedales se distinguen por dos tipos: Humedales de flujo superficial (HFS) y Humedales de flujo subsuperficial (HFSS), atendiendo a si la circulación del agua es de tipo superficial o subterránea, y a la vez estos últimos se clasifican en humedales horizontales o verticales, dependiendo de la dirección del flujo de agua a través del medio poroso (García and Corso, 2008).

Humedales de flujo superficiales: El flujo de agua está expuesto a la atmósfera y circula a través del sistema con un tiempo de retención hidráulico mínimo de 10 días. Procesos tales como sedimentación, mineralización, adsorción fisicoquímica, precipitación en el sedimento, asimilación de nutrientes y emisiones gaseosas, coexisten en estos sistemas, en general el agua fluye sobre la superficie del suelo desde una entrada hasta un punto de salida. Este sistema tiende a acumular olores y mosquitos.

Humedales de flujo subsuperficial: Normalmente incluyen uno o más cuencas o canales de poca profundidad de fondo, recubierto para prevenir la contaminación de la capa freática, en algunos casos son cubiertos por arcilla o por membranas de plástico, además, este sistema tiene la ventaja que no necesitan áreas grandes de terreno para su construcción. Debido a que el medio poroso brinda mayor área superficial para el crecimiento de los microorganismos la velocidad de remoción en los sistemas con flujo subsuperficial es mayor. Por otra parte, como el agua en estos sistemas fluye por debajo de la superficie del medio, no se presentan problemas con el desarrollo de los mosquitos y otros vectores. Además proporcionan protección térmica, lo que hace que estos sistemas puedan ser utilizados en lugares donde ocurran grandes nevadas (Reed, 1995); (Wittgren and Maehlum, 1997). Sin embargo, a pesar de todas las ventajas antes expuestas hay que señalar

que los humedales con flujo subsuperficial tienen como desventajas el costo del medio soporte utilizado, así como su traslado y colocación.

Sistemas con flujo horizontal, 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, siendo más efectivos los de menor profundidad, predominando en el diseño de los mismos 0,4 y 0,6 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/m²día. 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 et al., 2007).

Sistemas de flujo vertical, 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. Estos sistemas tienen como principales desventajas la colmatación, dado que operan a cargas mayores y la complejidad de los sistemas de distribución del agua residual, ya que esta debe ser distribuida uniformemente en toda la superficie del humedal. Están constituidos por los mismos elementos que los horizontales y los aspectos relacionados con la impermeabilización y la vegetación son idénticos a los descritos para los sistemas horizontales (Cooper et al., 1996).

1.2.2 Componentes de los humedales

Vegetación

El mayor beneficio de las plantas es la transferencia de oxígeno a la zona de la raíz. Su presencia física en el sistema (tallos, raíces y rizomas) permite la penetración a la tierra o medio de apoyo y transporta el oxígeno de manera más profunda, de lo que llegaría naturalmente a través de la sola

difusión. Lo más importante en los humedales artificiales es que las porciones sumergidas de las hojas y tallos muertos se degradan y se convierten en lo que hemos llamado restos de vegetación, que sirve como sustrato para el crecimiento de la película microbiana fija que es la responsable de gran parte del tratamiento que ocurre (Yarrow et al, 2009).

Según Stottmeister et al., (2003); Lee and Scholz, (2007); Vasudevan et al., (2011), Yao et al, (2011), la vegetación juega un papel primordial en los procesos de tratamiento en los humedales, mediante la introducción de oxígeno al lecho a través de los rizomas, que sirven como sustrato para la biopelícula microbiana. Las plantas, crean buenas condiciones para la sedimentación de los sólidos suspendidos, además el crecimiento de las raíces con agregados ayuda a descomponer la materia orgánica y prevenir la colmatación.

Las plantas emergentes que frecuentemente se encuentran en la mayoría de los humedales para aguas residuales son las espadañas, carrizos, juncos y juncos de laguna. Los juncos de laguna y las espadañas o una combinación de estas dos especies, son las dominantes en la mayoría de los humedales artificiales en los Estados Unidos. También existen algunos estudios en sistemas con carrizos, siendo esta especie la dominante en los humedales artificiales europeo (Yarrow et al, 2009).

Typha

La Espadaña es una planta robusta, capaz de crecer bajo diversas condiciones medio ambientales, de fácil propagación, por lo que representa una planta ideal para un humedal artificial. También es capaz de producir una biomasa anual grande y tiene un potencial pequeño de remoción de nitrógeno y fósforo. Los rizomas de espadaña plantados a intervalos de aproximadamente 0,6 m pueden producir una cubierta densa en menos de un año (Romero 2005). Tiene una relativamente baja penetración en grava aproximada a los 0,3 m, por lo que no es recomendable para sistemas de flujo subsuperficial, además son poco resistentes a condiciones adversas y difícil de mantener (Pérez et al., 2009).

Scirpus

Son de la familia de las ciperáceas y crecen en grupos, generalmente en aguas interiores y costeras, pantanos salobres y humedales. Los juncos son capaces de crecer bien en agua desde 5 cm a 3 cm de profundidad. Las temperaturas deseables son entre 16 a 27° C. Se encuentran juncos creciendo en un pH de 4 a 9, donde la mayoría de las especies tienen un crecimiento moderado y pueden

lograr un buen cubrimiento en alrededor de un año con separaciones cercanas a 0,3 m. Penetra en grava aproximadamente 0,6 m por lo que son muy usadas en humedales de flujo subsuperficial, existiendo en la actualidad muchas variedades de *Scirpus*, esta especie presenta buena adaptación a condiciones adversas y generalmente presentan un buen desarrollo en los humedales (Pérez et al.,2014).

Phragmites

Son plantas de crecimiento anual, con rizomas extensos, logrando un buen recubrimiento en un año, con separación de 0,6 m. En Europa se han usado carrizos y han sido las plantas acuáticas emergentes más extensas. Los sistemas que utilizan carrizos pueden ser más eficientes en la transferencia de oxígeno porque penetran verticalmente y a mayor profundidad que las espadañas, pero menos que los juncos en aproximadamente 0,4 m. Son muy usados para humedales artificiales debido a la ventaja de tener una bajo valor alimenticio y por tanto, no se ven atacadas por animales como sucede con otros tipos de plantas (Martínez, 2000).

Sustrato (medio granular)

En los humedales el sustrato está formado por el suelo: arena, grava, roca, sedimentos y restos de vegetación que se acumulan en el humedal debido al crecimiento biológico. La principal característica del medio es que debe tener la permeabilidad suficiente para permitir el paso del agua a través de él. Esto obliga a utilizar suelos de tipo granular, principalmente grava seleccionada con un diámetro de 5 mm aproximadamente y con pocos finos (Llagas and Gómez, 2006).

El tamaño del medio granular afecta directamente al flujo hidráulico del humedal y por ende en el caudal de agua a tratar. Si el lecho granular está constituido por elevadas cantidades de arcilla y limo, se consigue una mayor capacidad de absorción y una mejor filtración, ya que la adsorción es alta y el diámetro de los huecos es pequeño. Pero también este medio presenta una elevada resistencia hidráulica y requiere velocidades de flujo muy bajas, limitando el caudal a tratar. Por el contrario, si el lecho granular está formado por gravas y arenas, disminuye la capacidad de adsorción y el poder filtrador del medio, pero aumenta la conductividad hidráulica (Llagas and Gómez, 2006).

La acumulación de restos de vegetación aumenta la cantidad de materia orgánica en el humedal. La materia orgánica da lugar al intercambio de materia, fijación de microorganismos y es una fuente de carbono que es a la vez, la fuente de energía para algunas de las más importantes reacciones biológicas en el humedal.

Microorganismos

En los humedales construidos, el papel principal en la transformación y mineralización de nutrientes, contaminantes orgánicos e inorgánicos es llevado a cabo por los microorganismos. Dependiendo del oxígeno introducido por las plantas y de la disponibilidad de electroceptores, los contaminantes en el agua residual son metabolizados por diferentes vías (Stottmeister et al., 2003).

La población microbiana en los humedales incluye bacterias, hongos y algas que son importantes para el ciclo de nutrientes y las transformaciones de contaminantes. La variedad de especies microbianas en los humedales funciona en una amplia gama de condiciones físicas y químicas, debido a esta variedad de especies los humedales pueden tratar diversas aguas residuales. Los requerimientos de crecimiento y las características de la población microbiana son conocidos, ya que muchos de estos organismos son los mismos que los que se utilizan en los sistemas convencionales de tratamiento (Kadlec and Zmarthie, 2010; Kadlec et al., 2012).

Dentro de estas especies microbianas las bacterias son el grupo fundamental en el proceso depurador de las aguas residuales. Como se ha explicado anteriormente, son sistemas de tratamiento biológico de las aguas residuales con biomasa adherida, presentando características semejantes a las de un filtro percolador. 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.

Revestimiento

El requisito de revestimientos en los humedales artificiales depende de los requerimientos reglamentarios y de cada lugar de las características de la superficie y el subsuelo. En general, si los suelos son porosos (por ejemplo, arena), bien drenados, y contienen pequeñas cantidades de margas, arcillas y limos, el revestimiento es un requisito para los humedales construidos. Por otra parte, si los suelos son de drenaje pobre y compuesto principalmente de arcillas, entonces, el revestimiento no es necesario. Estos sistemas tienden a producir una capa de turba en el fondo, lo que reduciría la infiltración con el tiempo. El concepto de un humedal de "fugas", que puede tomar ventaja de los procesos naturales de purificación de aguas residuales, ya que se mueve hacia abajo

a través del suelo para recargar las aguas subterráneas, puede considerarse como un beneficio potencial en algunas áreas.

1.2.3 Mecanismos de remoción

Los procesos de remoción de contaminantes en un humedal ocurren por la interacción entre la vegetación, la columna de agua y el sustrato o empaque. Los procesos pueden ser físicos, químicos o biológicos.

Sólidos Suspendidos

Son removidos fundamentalmente en las unidades de pretratamiento, las cuales usualmente se instalan antes 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 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 las concentraciones de los sólidos suspendidos en el efluente, son menores (Solano, 2004; Calderón, 2005).

Materia orgánica

La eliminación de la materia orgánica en los humedales es compleja ya que es el resultado de la interacción de numerosos procesos que suceden de forma simultánea. La materia orgánica particulada es retenida por filtración cerca de la entrada en sistemas horizontales y cerca de la superficie en verticales.

En los sistemas horizontales hay supuestamente pocos lugares con condiciones aeróbicas, y por tanto en una parte muy importante del lecho las bacterias fermentativas facultativas crecen originando ácidos grasos como el acético y el láctico, alcoholes como el etanol y gases como el hidrógeno. Estos compuestos representan sustratos para las bacterias sulfatoredutoras y metanogénicas, todas ellas anaeróbicas. En los sistemas verticales la presencia de oxígeno en todo

el lecho inhibe las reacciones de tipo anaeróbico, predominando la degradación por vía aeróbica, por lo que se alcanzan mejores rendimientos de eliminación (Baptista et al., 2003). Ya sea por vía aeróbica o anaeróbica, la mayoría de los autores (Brix and Arias, 2005; Molle et al., 2006; Lee et al., 2007; Vasudevan et al., 2011) coinciden en que el mecanismo de remoción fundamental en la reducción de la materia orgánica en los humedales es la degradación biológica y la filtración, alcanzándose eficiencias de remoción de un 90 %.

Kadlec et al., (2000) plantean que el rendimiento de eliminación de la materia orgánica en sistemas de humedales horizontales y verticales es óptimo si están bien diseñados, construidos y explotados. Tanto para la DQO como para la DBO₅ se alcanzan rendimientos que oscilan entre 75 y 95% produciendo efluentes con concentración de DQO menor de 60 mg/l y de DBO menor de 20 mg/l

1.2.4 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 (Reed, 1995).

García et al., (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.

Sin embargo, la mayor parte de los autores (Reed et al., 1995); (Mitchell et al., 1998) (Cooper et al., 1996); (Vymazal et al., 1998); (Kadlec and Knight, 1996) coinciden en 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. Diversos autores (Kadlec and Knight, 1996); (Mitchell and McNevis, 2001); (Saeed and Sun, 2011) también consideran que el modelo seguido puede estar influenciado por diferentes parámetros como la concentración de los contaminantes en el agua residual, el tipo de humedal y el clima, entre otros. Para lograr un diseño efectivo de los humedales es importante la obtención del modelo cinético seguido para la remoción

de cada contaminante y las constantes cinéticas de acuerdo a las condiciones climáticas y operativas específicas.

Como se explicó anteriormente, el modelo de primer orden representa la ecuación de diseño básica para los humedales construidos (ecuación 1.1), empleada ampliamente en Australia (Mitchell et al., 1998), Europa (Cooper et al., 1996); (Vymazal et al., 1998) y los EE.UU. (Reed, 1995)

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-k*t} \quad (1.1)$$

Siendo:

C_e : Concentración del contaminante efluente, mg/l.

C_o : Concentración del contaminante afluente, mg/l.

k : Constante de velocidad de reacción, d^{-1}

t : Tiempo de retención hidráulica, d.

El modelo ofrece un perfil exponencial de la concentración de las aguas residuales afluentes y efluentes. Este enfoque ha sido utilizado para el diseño de humedales y para predecir la eliminación de todos los contaminantes de interés en los mismos: materia orgánica, sólidos suspendidos, nitrógeno y fósforo. Sus deficiencias son reconocidas, principalmente para la eliminación de fósforo (Kadlec and Knight, 1996) pero sigue siendo vista como la más apropiada ecuación de diseño que describe la eliminación de contaminantes en estos sistemas.

La Tabla 1.1 muestra los valores de las constantes cinéticas de primer orden de eliminación de la DBO en humedales de flujo subsuperficial horizontal, según diferentes autores, observándose una marcada diferencia en los valores de las mismas ($0,011-1,104 d^{-1}$), a pesar de no existir diferencias en el tipo de humedal. Estos resultados demuestran la necesidad de obtener las constantes de acuerdo a las condiciones climáticas y operativas específicas de cada lugar.

En el modelo de primer orden, no hay límite teórico en la tasa de eliminación. Mientras la carga aumenta, ya sea en términos de concentración o de velocidad de flujo, la tasa de eliminación también aumentará. En la práctica, no sucede así (Mitchell and Mcnevin, 2001). Debido a esto diversos autores (Mitchell and Mcnevin, 2001, Saeed and Sun, 2011) plantean que, con el incremento de la concentración en el afluente, la tasa de degradación eventualmente dejará de ser de primer orden y se convertirá en orden cero.

Tabla 1.1 Constantes cinéticas de eliminación de la DBO

Referencia	Constante, d ⁻¹	Comentarios
Kadlec and Knight (1996)	0,085-1	-
Vymazal et al. (1998)	0,19	Según Kickuth
Kadlec and Knight (1996)	0,133	República Checa
García et al. (2004)	0,011-0,091	En planta piloto
Reed (1995)	1,104	-

La transición de la cinética de degradación biológica de primer orden a la de cero órdenes, debido al aumento de la carga, puede ser representada por una cinética tipo Monod (ecuación 1.2), es decir comportándose como primer orden para bajas concentraciones y orden cero para concentraciones relativamente altas (Mitchell and McNevis, 2001). Este modelo cinético proporciona una estrecha relación entre la disponibilidad del sustrato y el crecimiento de la biomasa (Saeed and Sun, 2011).

$$k * t = K \ln \frac{C_o}{C_e} + (C_o - C_e) \quad (1.2)$$

Siendo:

k: Constante de velocidad de reacción, mg l⁻¹

K: Constante de saturación, mg l⁻¹d⁻¹

En la actualidad existe gran experiencia en el diseño de humedales horizontales, estableciéndose ecuaciones básicas de diseños para los mismos a partir de los modelos cinéticos obtenidos en diferentes regiones y sustituyendo el tiempo de retención hidráulico (ecuación 1.3) en la ecuación cinética correspondiente, se puede obtener el área necesaria para la remoción de cada contaminante, escogiéndose finalmente la mayor área requerida para el diseño del humedal:

$$t=(A*y*\eta)/Q \quad (1.3)$$

Siendo:

A: Área superficial, m²

Q: Caudal, m³/d

y: Profundidad

η: Porosidad

Conclusiones Parciales

1. Las aguas residuales de la industria textil generalmente son coloreadas con grandes variaciones de caudal y carga contaminante y presentan un alto contenido en materia orgánica por los productos que contienen.
2. Las alternativas de tratamiento natural como los humedales subsuperficiales se perfilan como soluciones tecnológicas factibles para el tratamiento de las aguas residuales de la industria textil por sus bajos costos y facilidad de operación y mantenimiento.
3. El papel de las plantas en la remoción de los contaminantes con humedales subsuperficiales ha sido ampliamente estudiado por diferentes autores, coincidiendo en su importancia para el buen funcionamiento de los mismos.
4. Existe una gran complejidad en los mecanismos de depuración de los contaminantes en los humedales subsuperficiales, planteándose principalmente degradación biológica para la remoción de materia orgánica.
5. Los procesos depuradores que ocurren en los humedales se encuentran altamente influenciados por las condiciones climáticas y operativas, de ahí la importancia de la obtención de modelos y constantes cinéticas para el diseño de los mismos.

Capítulo II. Evaluación de la remoción y estudio cinético a escala laboratorio

2.1. Evaluación preliminar de la remoción de colorante y materia orgánica en humedales experimentales

2.1.1 Sistema experimental

El sistema experimental consistió en dos humedales subsuperficiales horizontales (Figura 2.1) de 0,45 m de largo; 0,33 m de ancho y 0,2 m de profundidad con un área superficial: 0,15 m². Los mismos poseen una capa de suelo pardo con carbonato de 0,15 m de espesor y la capa restante de grava 5-10 mm de diámetro. Un humedal sembrado con *Cyperus Alternifolius* (H1) y el otro sin plantas (H2), con el objetivo de conocer el efecto de la planta en la remoción de los contaminantes.



Figura 2.1. Humedales subsuperficiales a escala de laboratorio

Selección y caracterización de los componentes del humedal

Plantas:

La planta emergente seleccionada fue *Cyperus Alternifolius*. La misma fue escogida por ser estudiada en este país anteriormente mostrando altos porcentos de remoción a los contaminantes expuestos y elevada resistencia a condiciones adversas (González et al., 2016). Es una especie perenne, herbácea y se desarrolla bien bajo condiciones de estrés. Las plantas de dicha especie fueron tomadas en zonas aledañas a la Universidad Central “Marta

Abreu” de Las Villas. Esta planta existe naturalmente en diversas regiones de Ecuador, incluido la zona de estudio, también puede ser adquirida en viveros, ya que se usa como planta ornamental.

Suelo:

El suelo pardo fue tomado a 20 cm de profundidad en zonas aledaña a la a la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, fue escogido este tipo de suelo por tener características similares al existente en Ecuador, donde se debe implementar el sistema evaluado. Se determinaron el pH, la conductividad eléctrica y la materia orgánica a ambos suelos (Tabla 2,1) según Manual para la química del suelo y laboratorio de fertilizantes (Van Ranst et al., 2005).

Tabla 2.1. Parámetros y métodos analíticos empleados

Parámetros	Unidades	Método Empleado
pH	u de pH	Electrométrico
Conductividad eléctrica (CE)	$\mu\text{S/cm}$	Electrométrico
Materia orgánica (MO)	%	Gravimétrico

Como se observa en la Tabla 2.2, los parámetros analizados presentan valores similares para el suelo cubano, utilizado en el experimento a nivel de laboratorio, y el ecuatoriano que es el que debe ser utilizado en el sistema a mayor escala, realizándose un análisis estadístico donde se demuestra que no existen diferencias estadísticamente significativas en cuanto a pH ($p=0,0695$), conductividad eléctrica ($p=0,0851$) y materia orgánica ($p=0,0510$). En el Anexo 1 se muestra un resumen del análisis estadístico realizado por Statgraphics centurión software XV.II.

Tabla 2.2. Caracterización de los suelos pardos

Parámetros	Suelo Cubano	Suelo Ecuatoriano
pH	$8,39 \pm 0,03$	$8,23 \pm 0,06$
Conductividad eléctrica (CE)	$305,00 \pm 5,00$	$285,93 \pm 13,62$
Materia orgánica (MO)	$10,62 \pm 0,31$	$8,53 \pm 0,65$

Preparación de las soluciones para evaluar la remoción en los humedales

Se evalúa la remoción de dos colorantes (627 negro y el pardo o negro) en el humedal con soluciones patrones de concentraciones inicial cercanas al valor medio de las curvas de calibración, preparándose 5 l de cada colorante y haciéndose pasar por los humedales, recolectándose muestras a los 40 minutos de retención en los mismos, para lograr el contacto con los componentes del humedal.

La remoción de DQO se realiza a través de un agua residual sintética, la cual se prepara mezclando todos los compuestos orgánicos que se utilizan en el proceso de producción, además de los colorantes. Se mide la concentración de DQO inicial, la que es superior a 386 mg l⁻¹ que es la concentración media emitida por la entidad, para conocer preliminarmente la capacidad de depuración de los humedales experimentales en condiciones extremas.

2.1.2 Evaluación de la remoción en los humedales experimentales

Primeramente, se realizó el barrido en un espectrofotómetro UV-VIS (*Genesys Thermo Electron Corporation*) para obtener la longitud de onda de máxima absorción con menor interferencia del blanco para cada colorante (Figura 2.2), obteniéndose para ambos 430 nm.

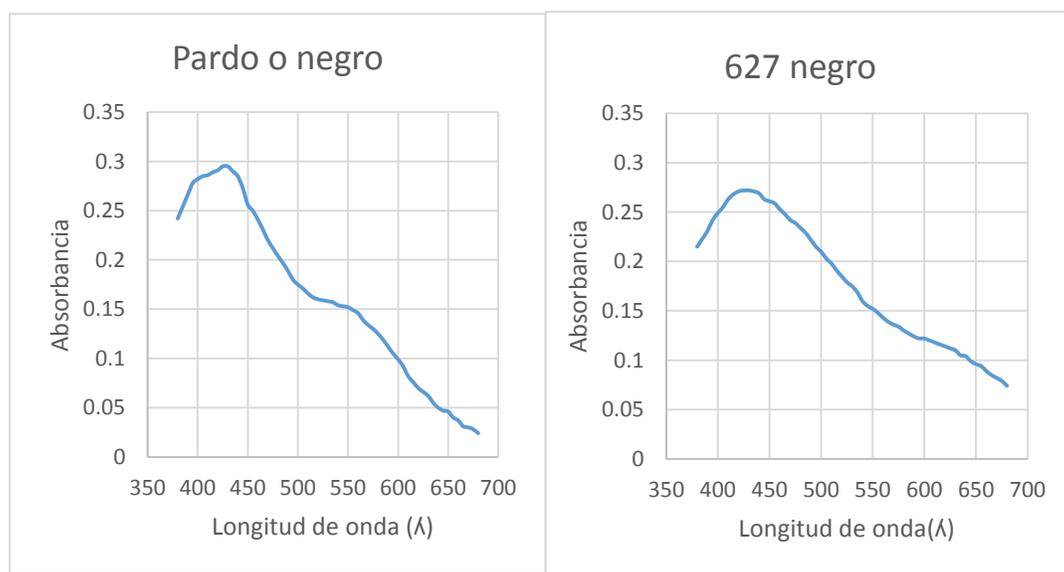


Figura 2.2. Espectro de absorción de los colorantes

Los valores medios (cinco réplicas) obtenidos para las curvas de calibración de los colorantes se muestran en la Figura 2.3 y 2.4 y el resumen del análisis estadístico en las Tablas 2.3 y

2.4. Se realizó además la Prueba de Q de Dixon para determinar valores atípicos. Los coeficientes de correlación mayores de 0,99 demuestran que no existen diferencias apreciables entre los valores experimentales de absorbancia obtenidos y los puntos de concentración de las curvas; por tanto, se puede afirmar que la linealidad es adecuada y las curvas de calibración permiten obtener los valores de concentración de los colorantes midiendo la absorbancia de las muestras.

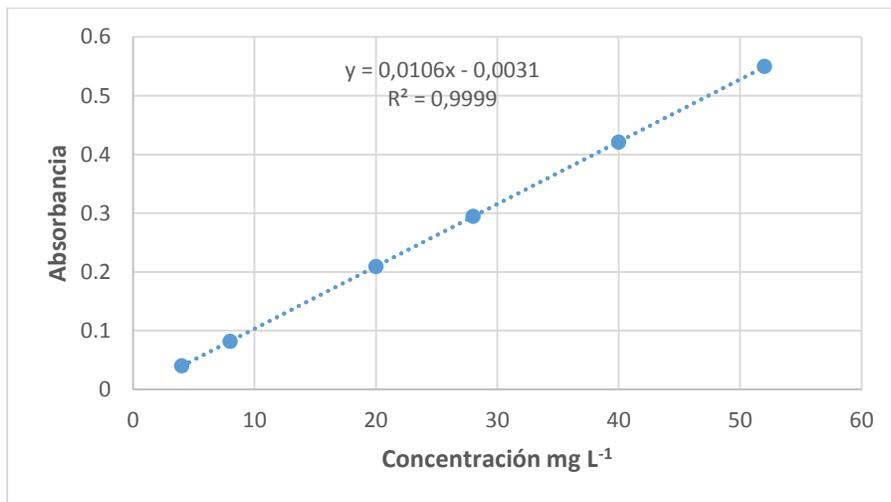


Figura 2.3. Curva de calibración del colorante 627 negro.

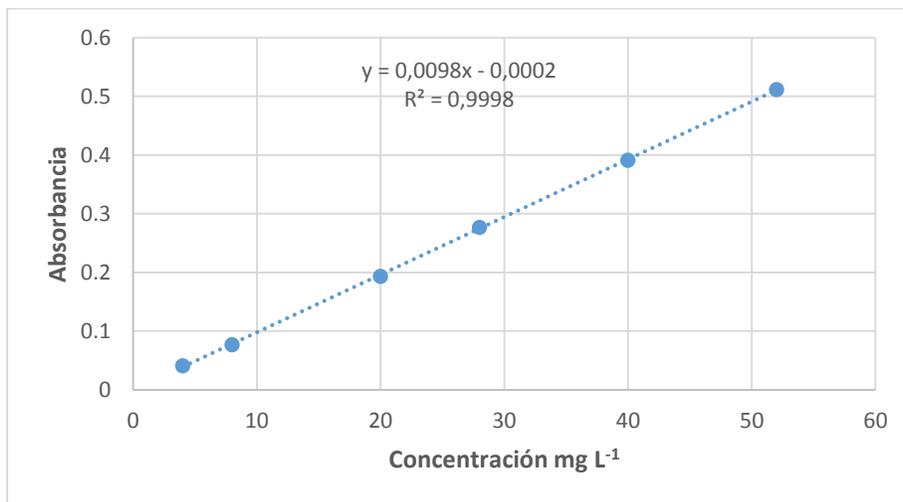


Figura 2.4 Curva de calibración del colorante pardo o negro.

Tabla 2.3. Resumen estadístico de las curvas de calibración del colorante 627 negro

C (mg l ⁻¹)	V(ml)	Abs 1	Abs 2	Abs 3	Abs 4	Abs 5	Media	DE	CV %
4	1	0,041	0,038	0,039	0,042	0,040	0,040	0,001	3,95
8	2	0,084	0,083	0,08	0,082	0,079	0,082	0,002	2,54
20	5	0,201	0,205	0,205	0,210	0,223	0,209	0,009	4,10
28	7	0,283	0,300	0,297	0,298	0,294	0,294	0,007	2,29
40	10	0,411	0,416	0,434	0,421	0,421	0,421	0,009	2,03
52	13	0,550	0,540	0,543	0,561	0,555	0,550	0,009	1,56

Tabla 2.4. Resumen estadístico de las curvas de calibración del colorante pardo o negro

C (mg l ⁻¹)	V(ml)	Abs1	Abs2	Abs3	Abs4	Abs5	Media	DE	CV %
4	1	0,040	0,043	0,042	0,043	0,039	0,041	0,002	4,39
8	2	0,073	0,078	0,078	0,095*	0,079	0,077	0,003	3,52
20	5	0,194	0,193	0,193	0,195	0,193	0,194	0,001	0,46
28	7	0,287	0,270	0,270	0,271	0,288	0,277	0,009	3,40
40	10	0,392	0,383*	0,392	0,390	0,392	0,391	0,001	0,25
52	13	0,506	0,520	0,520	0,501	0,511	0,512	0,008	1,65

*Valores atípicos

Estos resultados se corroboran con el análisis de los gráficos de los residuales, donde se observa que los puntos están distribuidos al azar alrededor de eje-X (Figuras 2.5 y 2.6).

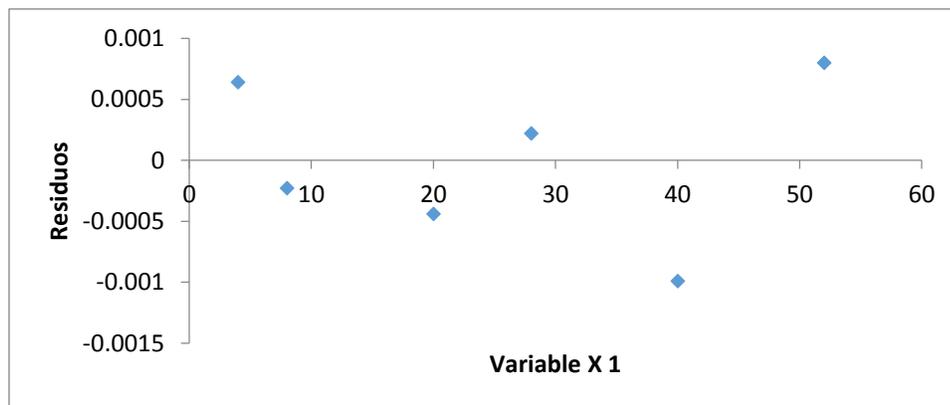


Figura 2.5. Análisis de los residuos de las curvas de calibración del colorante 627 negro

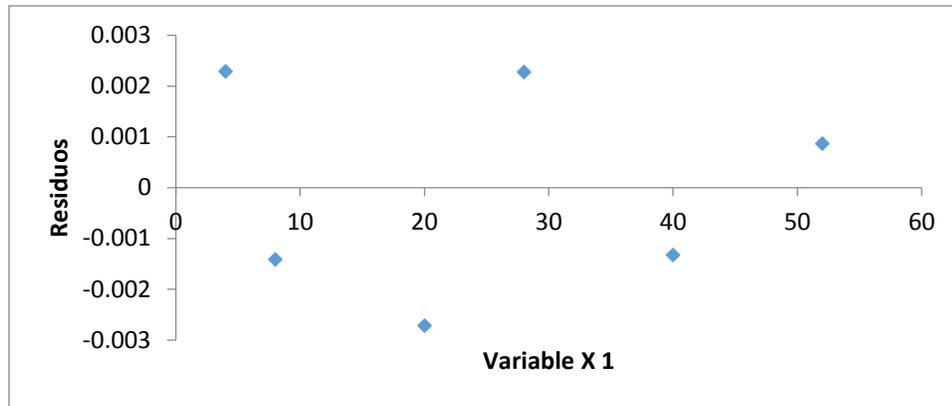


Figura 2.6. Análisis de los residuos de las curvas de calibración del colorante pardo o negro

Se observó una disminución apreciable de la coloración para los dos colorantes, tanto en el humedal plantado (H1) como sin plantar (H2) (Figuras 2.7). En todos los casos se obtuvo un agua residual más transparente en el humedal plantado, ya que las raíces de las plantas favorecen los procesos de filtración y degradación biológica.

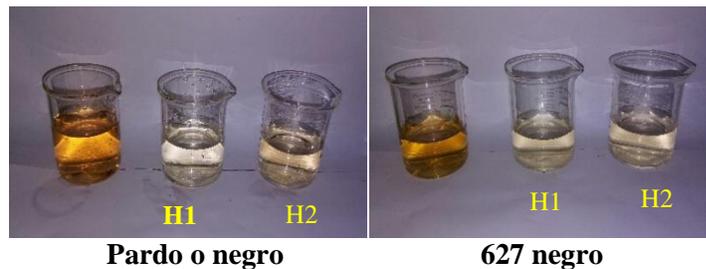


Figura 2.7. Soluciones patrones afluentes y efluentes a los humedales.

Para evaluar la remoción de materia orgánica en el humedal se realiza el ensayo de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), el cual se basa en la oxidación de la materia orgánica en cantidades conocidas de dicromato de potasio y ácido sulfúrico. Esa mezcla se somete a reflujo por un tiempo de 2 horas en presencia de sulfato de plata como catalizador y sulfato de mercurio para eliminar las interferencias de cloruros, bromuros y yoduros.

Los valores medios ($n=3$) de la concentración de la solución afluente y efluente a los humedales y las eficiencias de remoción de color y DQO alcanzadas se muestran en las Tablas 2.5 y 2.6. Se observa una mayor disminución tanto del color como de la DQO en el humedal plantado, corroborando lo planteado por (Wu et al., 2015), (Wang et al., 2016) y

(Carballeira et al., 2016) acerca de la importancia de las plantas en los procesos de remoción en los humedales.

Los valores de DQO efluente en el humedal plantado se encuentran por debajo del límite de vertimiento establecido en el TULAS (250 mg l^{-1}). Estos resultados no se alcanzan en el humedal sin planta donde la concentración de DQO efluente se encuentra por encima de este límite.

Se alcanzaron eficiencias de remoción superiores al 65 % para los dos colorantes y mayores de 85 % para la DQO en el humedal plantado, siendo inferiores en el humedal sin planta. Se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas para la remoción los dos colorantes (627 negro $p=0,0146$, pardo o negro $p=0,0008$) y la materia orgánica como DQO ($p=0,0001$) entre el humedal plantado y el que no tiene plantas, demostrando la importancia de las plantas en el proceso de depuración. Los resultados del análisis estadístico se presentan en el Anexo 2.

Tabla 2.5. Valores medios y eficiencia de la remoción de color en los humedales

	627 negro	Pardo o negro
C Afluente (mg L^{-1})	22,84	18,69
C Efluente H1(mg L^{-1})	$7,53 \pm 0,14$	$5,53 \pm 0,41$
C Efluente H2(mg L^{-1})	$7,93 \pm 0,09$	$8,12 \pm 0,26$
Eficiencia de remoción color H1 (%)	67,05	70,41
Eficiencia de remoción color H2 (%)	65,26	56,59

Tabla 2.6. Valores medios y eficiencia de remoción de DQO en los humedales

C DQO Afluente (mg L^{-1})	1248
C DQO Efluente H1 (mg L^{-1})	$168,0 \pm 10,2$
C DQO Efluente H2 (mg L^{-1})	$316,8 \pm 12,5$
Eficiencia de remoción DQO H1 (%)	86,54
Eficiencia de remoción DQO H2 (%)	74,62

Teniendo en cuenta estos resultados obtenidos en la evaluación preliminar de la remoción de colorantes y materia orgánica en ambos humedales, los estudios cinéticos y de eficiencia de

remoción solo se realizaron en el humedal plantado que brindó mejores resultados en la depuración de estos contaminantes.

2.2. Evaluación de la cinética de remoción de colorantes y materia orgánica

2.2.1. Cinética de remoción de colorantes

Para evaluar la cinética de remoción de los colorantes se utilizan las soluciones preparadas anteriormente, recolectándose muestras a los 2; 4; 6; 8; 10; 13; 16; y 19 min de retención en el humedal plantado.

Ambos colorantes muestran un comportamiento cinético similar (Figura 2.8), se observa una disminución de la concentración de los colorantes antes de los cinco minutos de tiempo de retención en el humedal. Este comportamiento muestra un ligero incremento a partir de los 12 min. Estos resultados se corresponden con estudios realizados (Núñez et al., 2003) sobre la remoción de colorantes con cepas de microorganismos, donde también se observa una disminución de la coloración en los primeros 5 minutos de contacto.

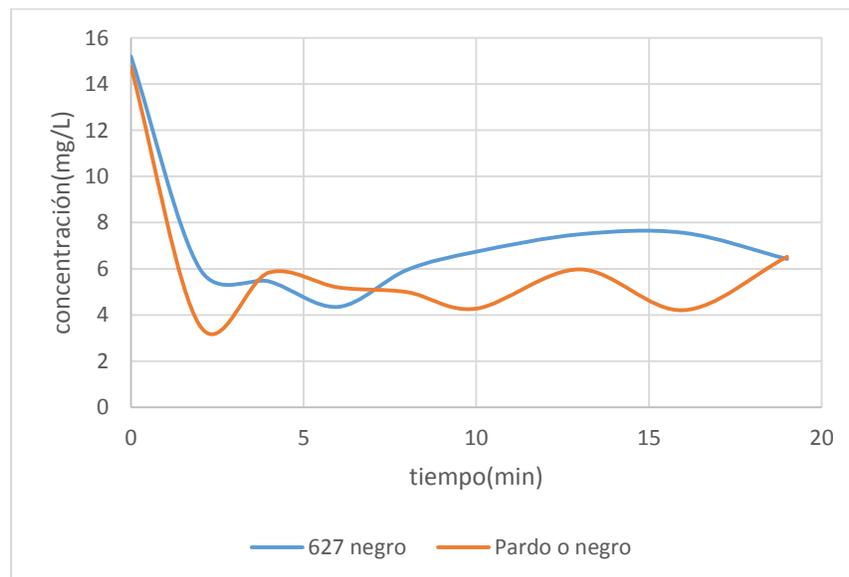


Figura 2.8. Comportamiento cinético de la remoción de los colorantes en el humedal

2.2.2 Cinética de remoción de materia orgánica

A partir de los resultados obtenidos en la remoción de colorantes se procede a realizar la cinética de remoción de la materia orgánica, ya que las aguas residuales efluentes de la industria Lava Jeans están compuestas por los diferentes productos orgánicos que se utilizan

en el proceso de producción, dentro de los que se encuentran los colorantes. Para estudiar la disminución del valor de DQO se prepara un agua residual sintética, para lo cual son mezclados todos los compuestos orgánicos empleados en el proceso de producción además de los colorantes, midiendo la concentración de DQO inicial, la que se corresponde aproximadamente con la concentración media emitida por la entidad, y tomando muestras del efluente a los 2; 10; 40; 60; 90 y 120 min respectivamente en el humedal plantado. Fueron realizadas 3 réplicas de cada uno de estos ensayos.

Los resultados obtenidos para el estudio cinético de la remoción de materia orgánica en el humedal experimental, a través de la determinación de la DQO, se muestran en la Tabla 2.7, como se observa, las tres réplicas realizadas presentan el mismo comportamiento, con una disminución de la DQO desde los primeros dos minutos de tiempo de retención del agua residual en el humedal. También se muestra una estabilización de la remoción a partir de los 90 min, siendo menos significativa la disminución de la DQO a partir de este tiempo. Los valores elevados de la desviación estándar están determinados por la preparación del agua residual sintética para cada experimento, donde el agua residual afluente no presenta la misma concentración de DQO.

Tabla 2.7. Resultados obtenidos para el estudio cinético de la remoción de materia orgánica

t(min)	DQO 1 (mg/L)	DQO 2 (mg/L)	DQO3 (mg/L)	Promedio	D.E
0	307,77	340,91	347,79	332,16	21,40
2	118,37	108,90	85,76	104,34	16,78
10	108,90	104,17	80,99	98,02	14,94
40	108,90	94,70	71,46	91,69	18,90
60	89,96	85,23	61,94	79,04	15,00
90	71,02	66,29	50,50	62,60	10,75
120	66,29	61,55	52,41	60,08	7,06

En la Figura 2.9 se muestra el comportamiento promedio (n=3) de la remoción de DQO con el tiempo de contacto del agua residual en el humedal. Se observa una disminución de la concentración de materia orgánica desde los primeros minutos de contacto, alcanzándose

valores de DQO cercanos a 100 mg/l desde los primeros minutos, con una estabilización alrededor de 50 mg/l a partir de los 90 minutos. El comportamiento es similar al observado en la remoción de los dos colorantes, solo que para la materia orgánica se observa menor tendencia a la desorción, siendo estable la concentración de DQO efluente en el periodo de tiempo estudiado.

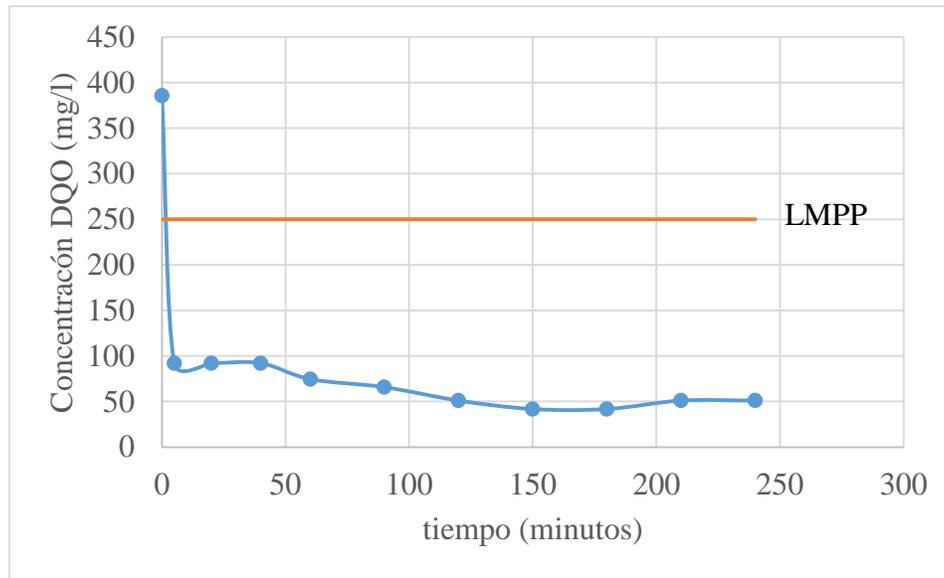


Figura 2.9. Remoción de DQO en el humedal con el tiempo

Se realizó el ajuste de estos datos determinados experimentalmente a los modelos cinéticos más reportados (Mitchell and Mcnevin, 2001; Saeed and Sun, 2011; Sanz, 2009) para la remoción de contaminantes mediante humedales subsuperficiales. Ambos modelos describen el comportamiento de la remoción de contaminantes cuando predominan los procesos biológicos sobre los químicos y físicos, siendo reportado por estos autores que el mecanismo de remoción de materia orgánica en los humedales está determinado, principalmente por la degradación microbiana, similar a lo que ocurre en un filtro percolador.

1. Modelo de primer orden: es el modelo más utilizado para estimar la remoción de los contaminantes en estos sistemas (Mitchell et al., 1998; Cooper et al., 1996; Vymazal et al., 1998; Reed, 1995).
2. Modelo de saturación o Monod: según diferentes autores (Mitchell and Mcnevin, 2001; Saeed and Sun, 2011); puede explicar el comportamiento cinético de primer orden para bajas concentraciones y de cero orden para altas concentraciones.

La ecuación de la recta y el coeficiente de correlación para dichos modelos se muestran en la Tabla 2.8, observándose un mejor ajuste al modelo de Saturación o Monod. En la Figura 2.10 se observa el gráfico correspondiente al modelo de Saturación.

Tabla 2.8. Modelos cinéticos

Modelo cinético	DQO	
Primer orden	$\ln \frac{C_e}{C_0} = -0,05 * t - 1,1459$	$R^2 = 0,9605$
Saturación	$\frac{1}{t(\ln \frac{C_e}{C_0})} = 0,0038 * (\frac{C_e - C_0}{t}) - 0,0048$	$R^2 = 0,9999$

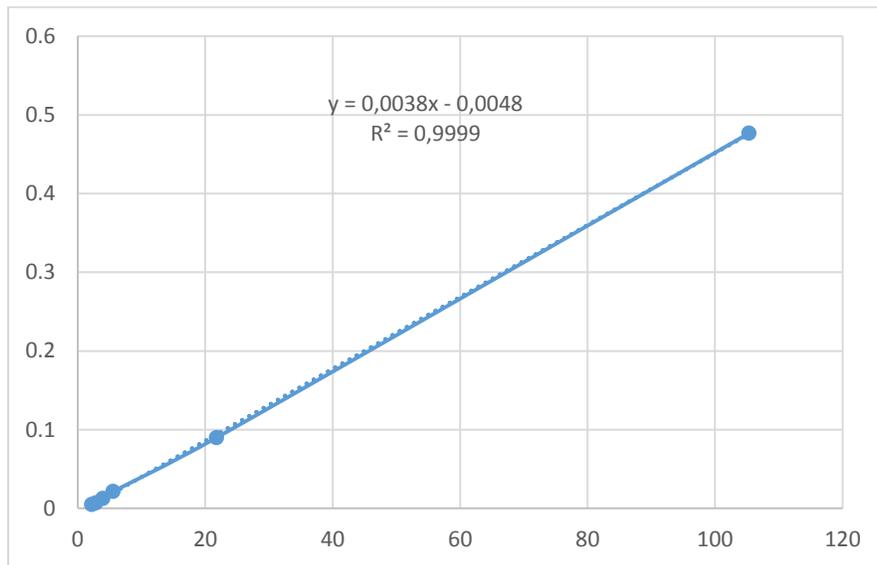


Figura 2.10. Modelo de Saturación para la remoción de la DQO

Las constantes obtenidas para la DQO con el modelo de saturación o Monod, se reportan en la Tabla 2.9. Estas constantes permiten el diseño de humedales subsuperficiales horizontales para la remoción de materia orgánica a mayor escala para las condiciones específicas en que fueron obtenidas, siendo de gran utilidad para el empleo de estos métodos naturales de tratamiento en industrias textiles.

Tabla 2.9. Constantes cinéticas para DQO

Constante de Saturación (K)	263,2 mg L ⁻¹
Constante cinética (k)	-1,3 mg L ⁻¹ min ⁻¹

2.3 Evaluación de la eficiencia de remoción de colorantes y materia orgánica en el humedal experimental

Los valores medios (n=3) de la concentración de la solución afluente y efluente una vez alcanzada la estabilización en el tiempo y las eficiencias de remoción de color y DQO alcanzadas se muestran en la Tabla 2.10. Se observa una disminución tanto del color como de la DQO en el humedal experimental, alcanzándose eficiencias de remoción superiores al 70 % para los dos colorantes y mayores de 80 % para la DQO en el humedal. Estos resultados corroboran lo planteado por (Carballeira et al., 2016; Wang et al., 2016; Wu et al., 2015) acerca de las eficiencias de remoción de materia orgánica en humedales subsuperficiales. Se observa un valor de la concentración de la DQO efluente del humedal muy por debajo de 250 mg l⁻¹ que es el límite de vertimiento para cuerpos de agua dulce establecido en el TULAS.

Tabla 2.10 Valores medios y eficiencia de la remoción de color y materia orgánica en el humedal experimental

	Color 627 negro	Color pardo o negro	DQO
C Afluente (mg L⁻¹)	15,20 ± 1,74	14,75 ± 0.62	332,16 ± 21,40
C Efluente (mg L⁻¹)	4,35 ± 1.06	3,52 ± 0.33	62,60 ± 10,74
Eficiencia de remoción (%)	71,38	76,11	81,15

El comportamiento de la eficiencia de remoción con el tiempo se observa en la Figura 2.11, alcanzándose eficiencias mayores del 70 % desde los primeros minutos de contacto del agua residual con el lecho del humedal.

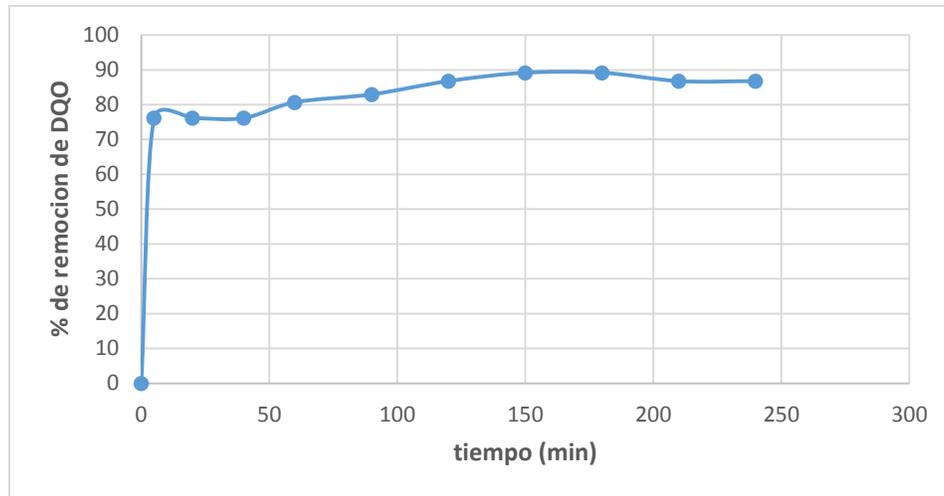


Figura 2.11. Eficiencia de remoción de DQO

Conclusiones parciales

1. El humedal plantado mostró mayor eficiencia de remoción de colorantes (70 %) y materia orgánica (86 %), siendo esta diferencia estadísticamente significativa, lo que demuestra la importancia de las plantas en los procesos de depuración.
2. La mayor remoción de colorantes en el humedal experimental ocurre en los primeros cinco minutos de tiempo de retención, observándose una tendencia a la desorción a partir de los doce minutos.
3. La remoción de materia orgánica en el humedal mostró el mejor ajuste al modelo cinético de Saturación o Monod, obteniéndose las constantes cinéticas y de saturación, las que permiten el diseño de estos sistemas de tratamiento.
4. El humedal experimental plantado mostró eficiencias de 70 % de remoción de color y de 80 % de remoción de materia orgánica, después de la estabilización, demostrando las ventajas de estos métodos de tratamiento.

Capítulo III: Diseño y evaluación económica del humedal subsuperficial como tratamiento secundario

3.1 Diseño del humedal subsuperficial horizontal

Para el diseño del humedal como tratamiento secundario se tuvo en cuenta:

- ✚ La situación existente en la industria Lava Jeans, con un tratamiento primario instalado de coagulación floculación el cual logra la reducción de los contaminantes a niveles asimilables por un tratamiento natural como los humedales.
- ✚ Los resultados satisfactorios obtenidos con en el empleo de humedales subsuperficial horizontales en la remoción de colorantes y materia orgánica en el humedal experimental a nivel de laboratorio.

3.1.1 Parámetros de diseño del humedal

- *Planta emergente*

Como planta emergente se propone la misma planta utilizada en el humedal experimental a escala de laboratorio *Cyperus Alternifolius*, por: los resultados obtenidos a nivel de laboratorio con el empleo de esta planta, obteniéndose eficiencias de remoción mayores del 70 % para todos los contaminantes evaluados y existir esta planta con gran abundancia en la zona donde se va a implementar el humedal, lo que permite una mejor adaptación de la misma. En la Figura 3.1 se muestra dicha planta emergente.



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

- **Impermeabilización**

Se propone como impermeabilizante la geomembrana, ya que este impermeabilizante está disponible en el mercado donde se va a implementar el humedal y presenta facilidad de implementación y durabilidad.

- **Sustrato**

El medio soporte propuesto para el lecho del humedal a mayor escala, es el utilizado en el humedal experimental (suelo pardo), el cual presentó buenos resultados en la remoción de los contaminantes evaluados y las plantas se adaptaron al mismo, mostrando buen crecimiento y abundancia.

Se determinó la porosidad del suelo (η), parámetro necesario para el diseño, por el método de desplazamiento de agua, donde se vierten 50 ml de suelo (V_i), previamente secado, en una probeta de 100 ml y se agregan lentamente 50 ml de agua, midiendo el volumen alcanzado finalmente (V_f), la porosidad se determina por la ecuación 3.1.

$$\eta = \frac{(V_f - V_i)}{V_i}$$

Se obtuvo un volumen final de 75 ml, con una porosidad de 0,5

- **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 (Kadlec y Knight, 1996; Reed, 1995).

- **Caracterización del agua residual a tratar**

El agua residual afluyente al humedal presenta las características típicas de la industria textil, descritas anteriormente en el Capítulo 1, en la industria actualmente se encuentra instalado un tratamiento primario de coagulación floculación que disminuye los valores de la mayoría de los parámetros, pero aún son vertidas con valores por encima del límite de vertimiento. En la Tabla 3.1 se muestra la caracterización realizada por un laboratorio especializado en análisis de agua de Ecuador (Iacquanalisis) al agua residual efluente del sistema de tratamiento primario. Como se observa, las aguas residuales a tratar presentan valores de materia orgánica por encima del límite de vertimiento, por lo que el humedal que se propone

como tratamiento secundario debe ser diseñado, principalmente para lograr la remoción de este contaminante a valores inferiores a este límite.

Tabla 3.1. Caracterización del agua residual afluyente al humedal

Parámetros	Resultado	LMPP cuerpos de agua dulce (TULAS)
Caudal (l/s)	1,087	-
pH (u pH)	7,03	5-9
DQO (mg/l)	386	250
DBO₅ (mg/l)	251	100
Solidos suspendidos (mg/l)	55	100
Fenoles (mg/l)	0,06	0,2
Detergentes (mg/l)	2,245	-
Sulfuros (mg/l)	0,505	0,5
Sulfatos (mg/l)	22	1 000

- **Caudal de agua residual a tratar**

Se fijó un caudal de 94 m³/día por ser el caudal medio diario de agua residual que se genera en la industria Lava Jeans, objeto de estudio.

3.2 Sistema de tratamiento propuesto para la depuración de las aguas residuales

El sistema de tratamiento propuesto estará compuesto por un sistema de tratamiento primario de coagulación floculación, instalado actualmente en la industria y un humedal subsuperficial horizontal como tratamiento secundario, ya que el efluente del tratamiento primario no cumple con la legislación ambiental. El esquema propuesto se muestra en la Figura 3.2.



Figura 3.2. Esquema de tratamiento propuesto

3.1.3 Dimensionamiento del humedal subsuperficial horizontal como tratamiento secundario

El dimensionamiento del humedal se realizó, empleando el modelo cinético de saturación para la remoción de DQO, con las constantes obtenidas en el humedal experimental a escala de laboratorio. Este modelo cinético fue 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.

$$\frac{1}{t} \ln \frac{C_0}{C_e} = \frac{k}{K} - \frac{1}{K} \left(\frac{C_0 - C_e}{t} \right) \dots\dots\dots 3.1$$

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

Donde:

Flujo de agua residual (Q): 94 m³/día

Porosidad (n): 0,50. Reportada para grava 10-15 mm por (Kadlec y Knight, 1996)

Profundidad (y): 0,4 m

Concentración DQO efluente (Ce): 115 mg/l (por debajo del LMPP según TULAS)

Constante cinética (k): -1,3 mg l⁻¹ min⁻¹ (Obtenida en el humedal experimental para la remoción de DQO con el modelo de saturación)

Constante de saturación (K): 263,2 mg/l

Concentración DQO afluente (Co): 386 mg/l

En la Tabla 3.1 se muestran los resultados calculados: tiempo de retención y el área para el humedal subsuperficial horizontal, siendo necesario un tiempo de retención del humedal de al menos 1 día para lograr la remoción de la materia orgánica.

Tabla 3.1. Tiempo de retención y Área superficial.

Tiempo de retención (h)	0,6
Área superficial (m ²)	11,9

En la Figura 3.3 se muestra el diseño propuesto para una celda del humedal con un área superficial de 12 m² y una relación largo ancho 3:1, según Reed, (1995), con 6 m de largo por 2 m de ancho, proponiéndose la construcción de dos celdas para una mayor facilidad de operación y mantenimiento del sistema.

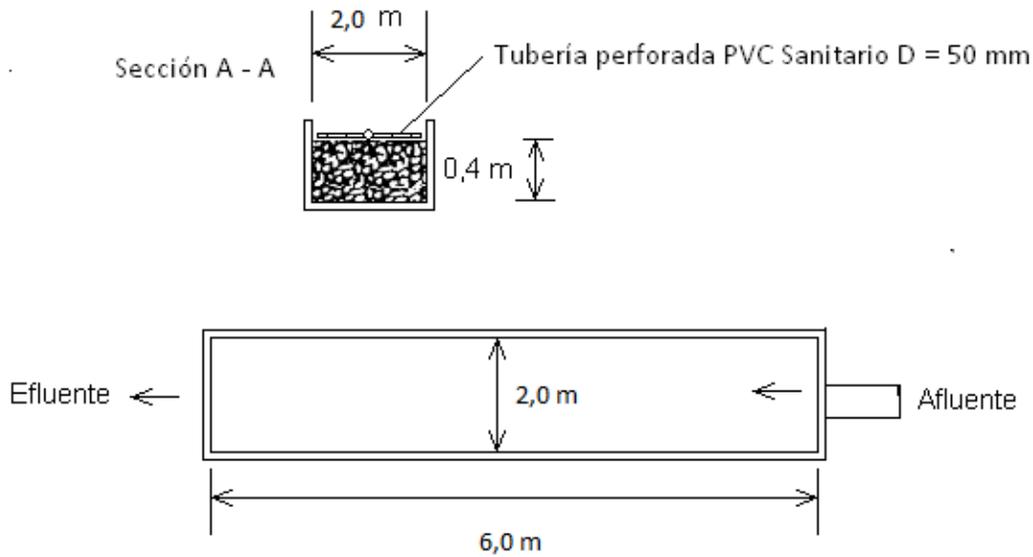


Figura 3.3. Humedal subsuperficial horizontal.

En la Tabla 3.2 se presenta un resumen de los principales parámetros de diseño de una celda del humedal.

Tabla 3.2. Parámetros de diseño del humedal subsuperficial horizontal

Parámetros de Diseño	
Planta emergente	<i>Cyperus Alterniufolius</i>
Medio poroso	Suelo pardo
Profundidad	0,4 m
Largo	6 m
Ancho	2 m
Área superficial	12 m ²
Pendiente	0,02 m/m
Caudal	94 m ³ /d
Tiempo de retención hidráulico	0,6 h

3.2 Evaluación económica

El análisis económico de un proyecto, constituye un estudio complejo de cada uno de los eslabones que contribuyen a la actividad económico-productiva. Dicho análisis, permite

determinar si la inversión proyectada es capaz de satisfacer los requerimientos que la han originado y si es o no, económicamente factible, valorando objetivamente los resultados.

En este epígrafe se presenta una valoración económica del humedal subsuperficial propuesto como tratamiento secundario, donde se evalúan los costos de inversión y operación sin tener en cuenta el tratamiento primario, por estar implementado actualmente en la entidad. Para el análisis de los ingresos se consideran las externalidades asociadas por daños evitados ya que el residual líquido vertido en la actualidad presenta alto contenido de materia orgánica, con productos que son considerados tóxicos y peligrosos.

Se realiza un estudio de sensibilidad basado en la asignación de valores a las externalidades y los indicadores dinámicos de rentabilidad VAN (valor actual neto) y TIR (tasa interna de rentabilidad) según (Peters and Timmerhaus, 2003). Esta evaluación económica permite tomar decisiones sobre la viabilidad del proyecto. En el anexo se muestran un resumen de los cálculos económicos obtenidos.

3.2.1. Costo de la inversión

Los costos de inversión se estimaron de los reportados en el manual de la Agencia de Protección de Medio Ambiente de los Estados Unidos (EPA, 2000), donde se presenta un costo unitario por metro cuadrado de humedal subsuperficial (Tabla 3.3).

Tabla 3.3. Costos de inversión del humedal

Elemento	Área (m ²)	Costo unitario (\$)	Costo (\$)
Evaluación del sitio	24	0,28	6,6
Limpieza del sitio	24	0,51	12,2
Plantas	24	0,39	9,2
Siembra	24	0,51	12,2
Movimiento de tierra	24	2,54	60,9
Recubrimiento	24	2,10	50,4
Medio Grava/Suelo	24	10,90	261,6
Estructura de entrada y descarga	24	1,28	30,6
Costos de ingeniería	24	0,70	16,7
Total			460,5

3.2.2 Costo de operación

Para estimar los costos de operación se tendrán en cuenta lo reportado en la Tabla 3.4:

Tabla 3.4. Costos de operación del humedal

Mantenimiento (2% del costo de inversión)	\$8,3/año
Mano de obra (Considerando 1 obrero con un salario mensual de 500 USD)	\$6 000/año
Análisis de Laboratorio (Caracterización del agua residual efluente)	\$200/año
Total	\$6 208,3/año

3.2.3 Ingresos, considerando las externalidades

Daño evitado al medio (agua, suelo, flora, fauna): \$5 500, ya que el vertimiento de aguas residuales contaminadas con colorantes y otros compuestos orgánicos pueden ocasionar la contaminación de un área considerable, afectando tanto la flora y fauna del lugar como los cuerpos de agua y el suelo. El ahorro vendrá dado por la cantidad de dinero que habría que invertir en la recuperación de dicha área y por los daños irremediables que se pueden evitar al implementar el sistema de tratamiento.

No pago de multas impuestas por el Ministerio del Ambiente de Ecuador (MAE): \$1 200 dinero que la empresa no tiene que reembolsar por cumplir con la legislación ambiental.

3.2.4 Análisis de los indicadores dinámicos de rentabilidad

Se determinan los indicadores de rentabilidad:

El Valor Actual Neto (VAN), es un indicador que muestra la riqueza adicional que genera un proyecto luego de cubrir todos sus costos en un tiempo determinado, cuando se analiza una inversión, lo mínimo que se debe obtener es cubrir sus costos. Desde el punto de vista matemático el VAN acumula los beneficios y costos en el periodo cero (Andía, 2011).

$$\text{Valor Actual Neto} = \sum_{k=1}^n \frac{\text{Flujo de caja}}{(1+i)^k} - \text{Inversión total}$$

Tasa Interna de Rentabilidad (TIR), tasa de descuento con la que el valor actual neto es igual a cero, puede utilizarse como indicador de la rentabilidad de un proyecto: a mayor TIR, mayor rentabilidad (Mascareñas, 2008)

Período de Recuperación al Descuento de la inversión (PRD), el número de años que se requieren para recuperar una inversión, a partir de los flujos de caja al descuento (Mascareñas, 2008)

En la Tabla 3.5 se muestran los resultados de los indicadores dinámicos de rentabilidad (VAN y TIR) del tratamiento propuesto, observándose que es viable desde el punto de vista económico. En el Anexo 3 se muestra un resumen del análisis económico.

Tabla 3.5. Indicadores dinámicos de la rentabilidad

VAN (\$)	TIR (%)
1 745	107

El periodo de recuperación se muestra en la Figura 3.4, observándose que la inversión se recupera aproximadamente al año de la puesta en funcionamiento. El breve periodo de recuperación está determinado fundamentalmente por los bajos costos, tanto de inversión como de operación de estos sistemas de tratamiento.

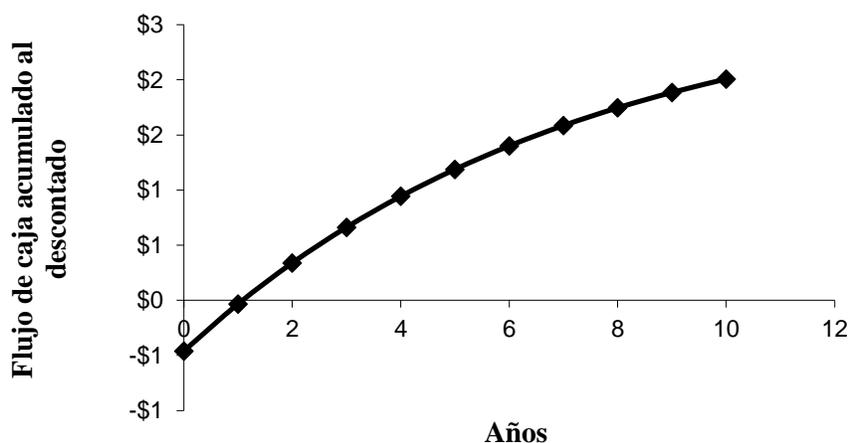


Figura 3.4. Periodo de recuperación

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 6 % de disminución de los mismos sin afectar la factibilidad del proyecto. (Figura 3.5).

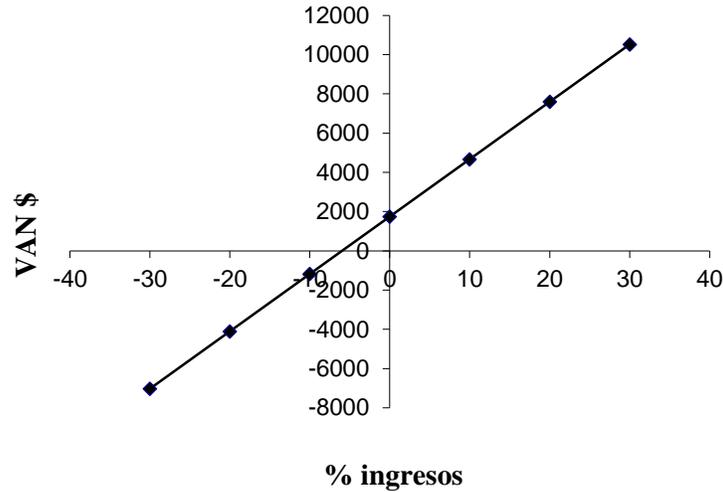


Figura 3.5. Sensibilidad a los ingresos

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 55% de aumento de la inversión el sistema sigue siendo viable (Figura 3.6).

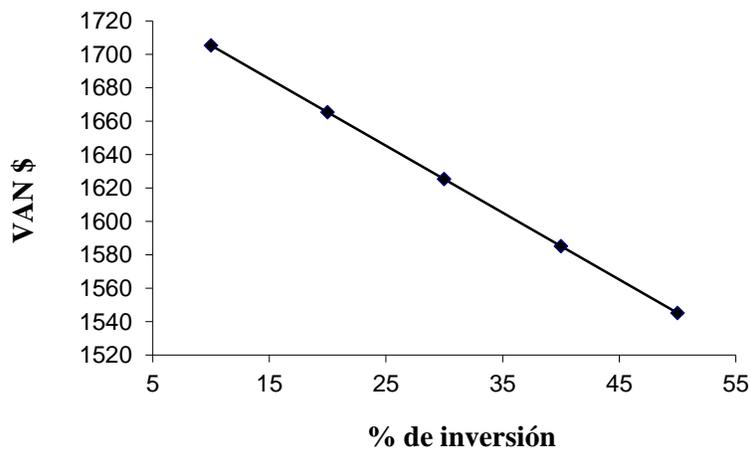


Figura 3.6. Sensibilidad a la inversión

Conclusiones parciales

1. El tratamiento primario de coagulación floculación, instalado actualmente en la industria Lava Jeans no permite la remoción de materia orgánica por debajo del límite de vertimiento.
2. Se proponen dos celdas de humedal subsuperficial de 12 m² de área como tratamiento secundario de las aguas residuales de la industria Lava Jeans y de esta forma lograr el cumplimiento de la legislación.
3. El análisis económico realizado demostró que el sistema propuesto es viable, lográndose la recuperación en un periodo menor de dos años.

Conclusiones

1. La remoción de colorantes y materia orgánica en el humedal plantado y sin planta presentó diferencias estadísticamente significativas, siendo mayor en el humedal con planta, donde se logran concentraciones de DQO inferiores al límite de vertimiento.
2. La mayor remoción de colorantes en el humedal experimental ocurre en los primeros cinco minutos de tiempo de retención, con eficiencias de remoción de 70 %, observándose una tendencia a la desorción a partir de los doce minutos.
3. La remoción de materia orgánica en el humedal mostró eficiencias del 80 %, con un mejor ajuste al modelo cinético de Saturación o Monod, permitiendo el diseño de estos sistemas de tratamiento.
4. El área necesaria para el humedal subsuperficial como tratamiento secundario de las aguas residuales de la industria Lava Jeans fue de 12 m², proponiéndose dos celdas de 2 m de ancho por 6 m de largo.
5. El sistema de tratamiento propuesto es viable desde el punto de vista económico, recuperándose la inversión al año de la puesta en funcionamiento.

Recomendaciones

1. Evaluar la remoción de materia orgánica y colorantes en el agua residual efluente del tratamiento primario de la industria Lava Jeans en un humedal experimental con el suelo de Ecuador, antes de la implementación.
2. Implementar el humedal subsuperficial horizontal propuesto como tratamiento secundario de las aguas residuales de la industria Lava Jeans y evaluar el comportamiento del mismo.

Bibliografía

1. Andía, V. W., Indicador de Rentabilidad de Proyectos: el Valor Actual Neto (VAN) o el Valor Económico Agregado (EVA). *Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial*. 14(1) 15-18 2011.
2. Baptista, J. D. C.; Donnelly, T.; Rayne, D.; Davenport, R. J., Microbial mechanisms of carbon removal in subsurface flow wetlands. *Water Science. Technology*. 48 (5), 127-134, 2003
3. Barrios, L.; Gaviria, L.; Agudelo, E.; Cardona, S., Tecnologías para la remoción de colorantes y pigmentos presentes en aguas residuales. Una revisión, 2015.
4. Bernal, L.; Hernánde, M.; Berber, M.; Martínez, M.; Delgado, R.; Espinosa, M., Remoción del Colorante Compuesto Naranja Remazol de Aguas Residuales Generadas en la Industria Textil. *Avances en Ciencias e Ingeniería*. 8(13) 52-53, 2017.
5. Brix, H.; Arias, C. A., The use of vertical flow constructed wetlands for on-site treatment of domestic wastewater: New Danish guidelines. *Ecological Engineering*. 25 491-500, 2005.
6. Buitrón, G.; Quezada, M.; Moreno, J., Aerobic degradation of the azo dye acid red 151 in a sequencing batch biofilter. *Bioresource Technology*, 92 143-149, 2004.
7. Calderón, C.; Romero, F.; Gómez, L., *Salud Ambiental y desarrollo*. Colombia: Ed. ECOSOLARLTDA, 2005
8. Carballeira, T.; Ruiz, I.; Soto, M., Effect of plants and surface loading rate on the treatment efficiency of shallow subsurface constructed wetlands. *Ecological Engineering*. 90 203-214, 2016.
9. Cooper, P. F.; Job, G. D.; Green, M. B.; Shutes, R. B. E., *Reed Beds and Constructed Wetlands for Waste- water Treatment*. WRC Publications, Wiltshire. UK, 1996.
10. Cortazar, A.; Gonzáles, C.; Coronel, C.; Escalante, J.; Castro, J.; Villagómez, J., *Biotecnología aplicada a la degradacion de colorantes a la industria textil*. *Universidad y Ciencia*. 28, 2012.

11. Dan, A.; Masao, O.; Yuta, F.; Satoshi, S.; Tomonori, .I; Takashi, M.; Michihiko, I., Removal of heavy metals from synthetic landfill leachate in lab-scale vertical flow constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 2017.
12. Davies, L. C.; Carias, C. C.; Novais, J. M.; Martins-Dias S. Phytoremediation of textile effluents containing azo dye by using *Phragmites australis* in a vertical flow intermittent feeding constructed wetland. *Ecological Engineering* 25(5) 594-605, 2005.
13. EPA. 832-F-00-023, Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Humedales de flujo subsuperficial. Washington, D.C., 2000.
14. Feo, D.; Gisi, D., Using an innovative criteria-weighting tool for stakeholders involvement to rank MSW facility sites with the AHP. *Waste Management*. 30, 2010.
15. Garcés, L.; Pañuela, G., Tratamiento de las aguas residuales de una industria textil utilizando colector solar. *Lasallista de Investigación*. 4(2), 2007.
16. García, J.; Aguirre, P.; Barragán, J.; Mujeriego, R.; Matamoros, V.; Bayona, J. M., Effect of key design parameters on the efficiency of horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*. 25 (41) 405–418, 2005.
17. García, J.; Corzo, A., Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial, 2008.
18. González, Y. M.; Pérez, M. M.; Martínez. P.; Díaz, Y., Humedales subsuperficiales horizontales en la depuración de aguas oleosas. Cinética de remoción de DQO. *Revista Afinidad*. 73(573) 50-54, 2016.
19. Hai, F. I.; Yamamoto, K.; Fukushi, K., Hybrid treatment systems for dye wastewater. *Environmental. Science Technology*. 37, 315–377, 2007.
20. Kadlec, R. H.; Knight, R. L.; Vymazal, J.; Brix, H.; Cooper, P.; Haberl, R., Constructed wetlands for pollution control: Processes, performance, design and operation, IWA Specialist Group on use of Macrophytes in Water Pollution Control, IWA Publishing. London, 2000.
21. Kadlec, R.; Knight, R., Treatment wetlands. Lewis Publishers. Florida, 1996.
22. Kadlec, R.; Pries, J.; Lee, K., The Brighton treatment wetlands. *Ecological Engineering*. 47, 2012.

23. Kadlec, R.; Zmarthie, L., Wetland treatment of leachate from a closed landfill. *Ecological Engineering*. 36, 2010.
24. Khazaleh, M.; Gopalan, B., Constructed Wetland for Wastewater Treatment. *Journal of Modern Science and Technology*. 6(1) 78-86, 2018.
25. Lee, B.; Scholz, M., What is the role of *Phragmites australis* in experimental constructed wetland filters treating urban runoff? *Ecological Engineering*. 29 (1), 2007.
26. Llagas, W.; Gómez, E., Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG*. 15(17) 85-96, 2006.
27. López, V.; Crespi, M., Gestión de los Efluentes de la Industria Textil. Instituto de Investigación Textil y Cooperación Industrial de la Universidad. Cataluña, 2015.
28. Marín Ocampo, A.; Osés Pérez, M., Operación y mantenimiento de plantas de aguas residuales con el proceso de lodos activados. Tomo I. Obtenido de http://www.ceajalisco.gob.mx/publicaciones/pdf/plantas_tratam_tomo1.pdf, 2013.
29. Martínez, I., Depuración de Aguas con Plantas Emergentes. Madrid: Rivadeneyra, S. A. 16 (89), 2000.
30. Mascareñas, J., La valoración de proyectos de inversión productivos. Monografía. Universidad Complutense de Madrid, 2008.
31. Mesa, D. y otros., Selección de microorganismos capaces de biodegradar fracciones pesadas del petróleo, s.l.: Recopilación bibliográfica, 2007.
32. Mitchell, C.; Wiese, R.; Young, R., Design of wastewater wetlands. In *The Constructed Wetlands Manual*, eds R. Young, G. White, M. Brown, J. Burton and B. Atkins. 2 256-289. Sydney, 1998.
33. Mitchell, C.; McNevis, D., Alternative analysis of BOD removal in subsurface flow constructed wetlands employing Monod kinetics. *Water Research*. 35(5), 1295-1303, 2001.
34. Moeller, G.; Garzón, M., Decoloración y reducción de toxicidad de efluentes de la industria química de colorantes y pigmentos. Informe, primera etapa; Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, México, 2006.

35. Moeller, G.; Sandoval, L; Nacheva, P., Evaluación de diferentes procesos de tratamiento para la remoción de colorantes sintéticos utilizados en la industria Textil. Instituto Mexicano de tecnología del agua. Jiutepec, 2017.
36. Molle, P.; Lienard, A.; Grasmick, A.; Iwema, A., Effect of reeds and feeding operations on hydraulic behavior of vertical flow constructed wetlands under hydraulic overloads. *Water Research*. 4 606-612, 2006
37. Núñez, R. R.; Cabranes, Y.; Ortiz, E.; Gondres, R.; Martínez, C.; Martínez, J., Cinética de degradación del naftaleno por células inmovilizadas húmedas de *Bacillus alcalophilus* cepa IDO-225. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*. 35 (2) 77-82, 2004.
38. Pérez, M. M.; Rosa, E.; Martínez, P.; López, M. E.; Gonzáles, Y. M.; Monteagudo, M., Eficiencia de diferentes sustratos de filtros de suelo plantados en la depuración de aguas residuales domésticas. *Revista CENIC Ciencias Biológicas* 40(3) 181-185, 2009.
39. Pérez, J.; Ardila, A.; Reyes, J., Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial en el tratamiento de las aguas residuales generadas en la institución universitaria colegio mayor de antioquia, Colombia. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 30(3) 275-238, 2014.
40. Peters, M.; Timmerhaus, K., *Plant Design and Economics for Chemical Engineers Internacional*. s.l.:s.n, 2003Reed, S. C., *Natural Systems for waste management and treatment*. 2da edición McGraw Hill. New York, 1995.
41. Rai, H.S.; Bhattacharyya, M.S.; Singh, J.; Bansal, T.K.; Vats, P.; Banerjee, U.C., Removal of dyes from the effluent of textile and dyestuff manufacturing industry: a review of emerging techniques with reference to biological treatment. *Crit. Rev. Environmental Science Technology*. 35 219–238, 2005.
42. Reed, S.; Crites, R.; Middlebrooks, E., *Natural Systems for Waste Management and Treatment*. 2nd Edition ed. New York: McGraw-Hill, 1995.
43. Robison, T.; McMullan, G.; Marchan R.; Nigman, P., Remediation of dyes in textile effluent: A critical review on concurrent treatment technologies with a proposed alternative. *Bioresourse technology*. 77 247-255, 2001.
44. Romero, A. M., Propuesta para el tratamiento de aguas residuales de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM) mediante humedales artificiales de flujo

- horizontal. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México, 2005.
45. Saeed, T.; Sun, G. Z., A comparative study on the removal of nutrients and organic matter in wetland reactors employing organic media. *Chemical Engineering Journal*. 171 (2) 439-47, 2011.
 46. Salas Colotta G., Tratamiento físico-químico de aguas residuales de la industria textil. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*. 5 73-80, 2003.
 47. SALAS, G. Tratamiento por oxidación avanzada (Reacción Fenton) de aguas residuales de la industria textil. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*. 13, 2005.
 48. Salinas, M. Evaluación de un sistema de biofiltración y humedal para el tratamiento de aguas residuales de la industria textil. Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental. Mexico, 2011.
 49. SANZ, J. M. Depuración de aguas residuales con humedales artificiales: Ventajas de los sistemas híbridos. Conama, 2009.
 50. Solano, M.; Soriano, P.; Ciria, M., Constructed Wetlands as a Sustainable Solution for Wastewater Treatment in Small Villages. *Biosystems Engineering*. 87(1), 2004.
 51. Soon-An, O.; Katsuhiko, U.; Daisuke, I.; Kazuaki, Y., Simultaneous removal of color, organic compounds and nutrients in azo dye-containing wastewater using up-flow constructed wetland. *Journal of Hazardous Materials* 165(1-3) 696-703, 2009
 52. Stottmeister, U.; Wießner, A.; Kusch, P.; Kappelmeyer, U.; Kästner, M.; Bederski, O.; Müller, R. A.; Moormann H., Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnology Advances*. 2 (1-2), 2003.
 53. Torres, C. Estudio de impacto ambiental ex – post para la industria textil del Cantón Pelileo- provincia de Tungurahua- Ecuador, Congreso Nacional del Medio Ambiente, 2012.
 54. TULAS (Texto Unificado De Legislación Ambiental Secundaria), Resolución 062. Límites para vertimiento a un cuerpo de agua dulce. Quito, 2012.
 55. Van der Zee, F.P.; Villaverde, S., Combined anaerobic-aerobic treatment of azo dyes – a short review of bioreactor studies. *Water Resource*. 39 1425–1440, 2005.

56. Van Ranst, E.; Verloo, M.; Demeyer, A.; Pauwels, J.M., Analytical methods for soil and plants equipment and management of consumables. Manual for the soil chemistry and fertility laboratory, 2005.
57. Vasudevan, P.; Griffin, P.; Warren, A.; Thaphiyal, A.; Tandon M., Localized domestic wastewater treatment: part I Constructed wetlands (an overview). Journal of Scientific and Industrial Research. 70 583-594, 2011.
58. Vymazal, J.; Brix, H.; Cooper, P. F.; Green, M. B.; Haberl, R., Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Europe. Backhuys Publishers, Leiden. Netherlands, 1998
59. Wang, Q.; Xie, H., Ngo, H.; Guo, W.; Zhangr, J.; Liu, C.; Liang, S.; Hu, Z.; Yang, Z.; Zhao, C., Microbial abundance and community in subsurface flow constructed wetland microcosms: role of plant presence. Environmental Science and Pollution Research. 23 4036–4045,2016.
60. Wittgren, H. B.; Maehlum, T., Wastewater treatment wetlands in cold climates. Water Science Technology. 35 (5), 1997.
61. Wu, H., Zhang, J; Ngo, H. H; Guo, W; Hu, Z; Liang, S; Fan, J; Liu, H., A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation. Bioresource Technology. 175 594-601, 2015.
62. Xin, B. H.; Zhao, Y.; Gao, B.; Wang; Shenglei, Y.; Li, Q., Effects of compound bioflocculant on coagulation performance and floc properties for dye removal. Bioresource Technology, 2014.
63. Yao, F.; Shen, G. X.; Li, X. L.; Li, H. Z.; Hu, H.; Ni, W. Z., A comparative study on the potential of oxygen release by roots of selected wetland plants. Physics and Chemistry of the Earth. 36 (9-11) 475-478, 2011
64. Yarrow, M.; Marin, V. H.; Finlayson M.; Tironi, A.; Delgado, L. E.; Fischer F., The ecology of *Egeria densa* Planchon (Liliopsida: Alismatales): an ecosystem engineer in the Río Cruces wetland, Chile. Revista Chilena de Historia Natural. 82 299-313, 2009.
65. Yue, Q. Y.; Gao, B. Y.; Wang, Y.; Zhang, H.; Sun, X.; Wang, S. G.; Gu, R.R., Synthesis of polyamine flocculants and their potential use in treating dye wastewater. Journal Hazardous. Material. 152 221–227, 2008.

66. Zhang, Y.; Ma, C.; Ye, F.; Kong, Y., Li, H., Treatment of wastewater of paper mill with integrated membrane process. *Desalination*. 236 349-35, 2009.
67. Zhou, Y.; Liang, Z.; Wang, Y., Decolorization and COD removal of secondary yeast wastewater effluents by coagulation using aluminum sulfate. *Desalination*. 225 301–311, 2008.
68. Zodia, S.; Merzoukb, B.; Potiera, O.; Lopicquea, F.; Jean, L., PDirect red 81 dye removal by a continuous flow electrocoagulation/flotation reactor. *Separation and Purification Technology*. 108, 2013.

Anexos

Anexo 1. Resumen estadístico de los parámetros de los suelos

Conductividad Eléctrica

Intervalos de confianza del 95%

Dif. de medias: 19.0667 +/- 23.254 [-4.18732, 42.3207]
 Razón de varianzas: [0.00345672, 5.25767]

Comparación de Medias

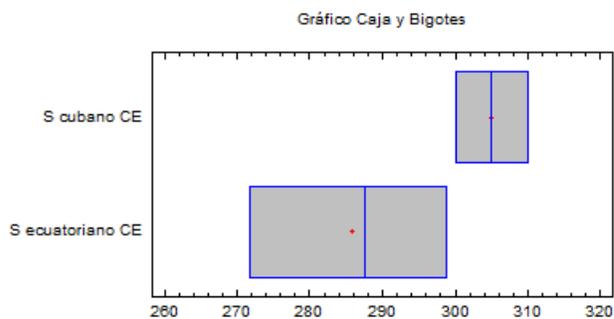
Hipótesis Nula: diferencia = 0
 estadístico t = 2.2765 Valor-P Bilateral = 0.0851

Comparación de Sigmas

Hipótesis Nula: razón = 1
 Estadístico F = 0.134812 Valor-P Bilateral = 0.2376

Diagnósticos

Valores-P Shapiro-Wilks = 0.9999 y 0.8094



pH

Intervalos de confianza del 95%

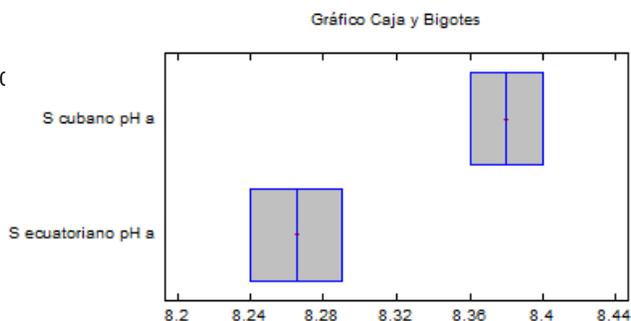
Dif. de medias: 0.115 +/- 0.137752 [-0.0227521, 0.252752]
 Razón de varianzas: [0.000987976, 414.585]

Comparación de Medias

Hipótesis Nula: diferencia = 0
 estadístico t = 3.592 Valor-P Bilateral = 0.0695

Comparación de Sigmas

Hipótesis Nula: razón = 1
 Estadístico F = 0.64 Valor-P Bilateral = 0.8591



Materia Orgánica

Intervalos de confianza del 95%

Dif. de medias: 1.55 +/- 1.56619 [-0.0161892, 3.11619]

Razón de varianzas: [0.000126017, 52.8807]

Comparación de Medias

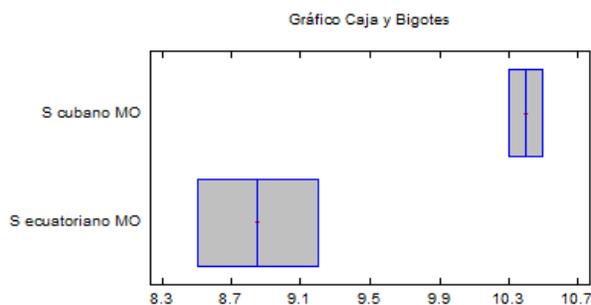
Hipótesis Nula: diferencia = 0

estadístico t = 4.25818 Valor-P Bilateral = 0.0510

Comparación de Sigmas

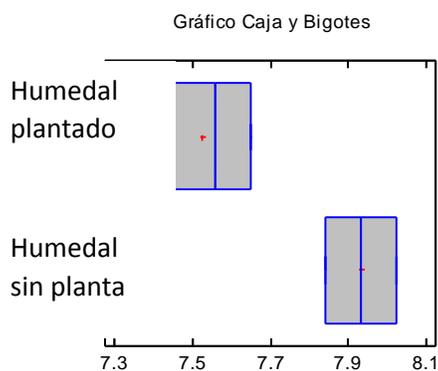
Hipótesis Nula: razón = 1

Estadístico F = 0.0816327 Valor-P Bilateral = 0.3543



Anexo 2. Resumen estadístico humedal

Color 627 negro



Intervalos de confianza del 95%

Dif. de medias: -0.406667 +/- 0.274112 [-0.680779, -0.132554]

Razón de varianzas: [0.0629119, 95.689]

Comparación de Medias

Hipótesis Nula: diferencia = 0

estadístico t = -4.11908 Valor-P Bilateral = 0.0146

Comparación de Sigmas

Hipótesis Nula: razón = 1

Estadístico F = 2.45356 Valor-P Bilateral = 0.5791

Diagnósticos

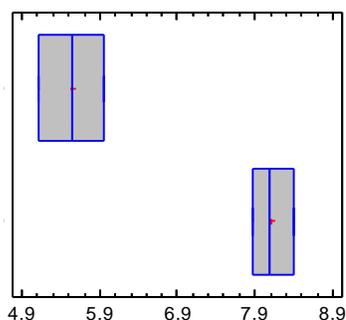
Valores-P Shapiro-Wilks = 0.6344 y 0.9640

Color pardo o negro

Gráfico Caja y Bigotes

Humedal
plantado

Humedal
sin planta



Intervalos de confianza del 95%

Dif. de medias: -2.58667 +/- 0.775642 [-3.36231, -1.81102]

Razón de varianzas: [0.0652739, 99.2817]

Comparación de Medias

Hipótesis Nula: diferencia = 0

estadístico t = -9.25911 Valor-P Bilateral = 0.0008

Comparación de Sigmas

Hipótesis Nula: razón = 1

Estadístico F = 2.54568 Valor-P Bilateral = 0.5641

Diagnósticos

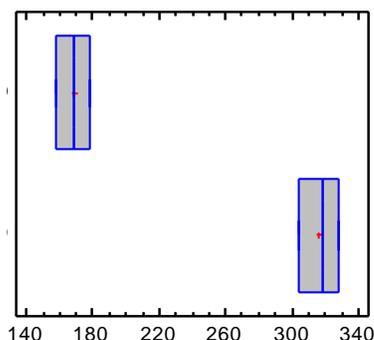
Valores-P Shapiro-Wilks = 0.9999 y 0.7634

DQO

Gráfico Caja y Bigotes

Humedal
plantado

Humedal
sin planta



Intervalos de confianza del 95%

Dif. de medias: -148.833 +/- 25.5702 [-174.404, -123.263]

Razón de varianzas: [0.0196037, 29.8173]

Comparación de Medias

Hipótesis Nula: diferencia = 0

estadístico t = -16.1606 Valor-P Bilateral = 0.0001

Comparación de Sigmas

Hipótesis Nula: razón = 1

Estadístico F = 0.764545 Valor-P Bilateral = 0.8666

Diagnósticos

Valores-P Shapiro-Wilks = 0.9999 y 0.8115

Anexo 3. Análisis económico

Concepto	0	1 Año	2 Años	3 Años	4 Años	5 Años
Ingresos		\$6 700,00	\$6 700,00	\$6 700,00	\$6 700,00	\$6 700,00
Costos Operacionales		\$6 208,29	\$6 208,29	\$6 208,29	\$6 208,29	\$6 208,29
Beneficio Operacionales		\$491,71	\$491,71	\$491,71	\$491,71	\$491,71
Depreciación		\$41,45	\$41,45	\$41,45	\$41,45	\$41,45
Beneficios antes Impuestos		\$450,26	\$450,26	\$450,26	\$450,26	\$450,26
Beneficios después Imp,		\$450,26	\$450,26	\$450,26	\$450,26	\$450,26
Inversión	\$460,51					
Flujo de caja	-\$460,51	\$491,71	\$491,71	\$491,71	\$491,71	\$491,71

Flujo de caja Actualizado	-\$460,51	\$427,57	\$371,80	\$323,31	\$281,14	\$244,47
Flujo de caja al descontado	-\$460,51	-\$32,94	\$338,87	\$662,17	\$943,31	\$1 187,78
Concepto	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	
Ingresos	\$6 700,00	\$6 700,00	\$6 700,00	\$6 700,00	\$6 700,00	
Costos Operacionales	\$6 208,29	\$6 208,29	\$6 208,29	\$6 208,29	\$6 208,29	
Beneficio Operacionales	\$491,71	\$491,71	\$491,71	\$491,71	\$491,71	
Depreciación	\$41,45	\$41,45	\$41,45	\$41,45	\$41,45	
Beneficios antes Impuestos	\$450,26	\$450,26	\$450,26	\$450,26	\$450,26	
Beneficios después Imp,	\$450,26	\$450,26	\$450,26	\$450,26	\$450,26	
Flujo de caja	\$491,71	\$491,71	\$491,71	\$491,71	\$491,71	
Flujo de caja Actualizado	\$212,58	\$184,85	\$160,74	\$139,77	\$121,54	
Flujo de caja al descontado	\$1 400,36	\$1 585,21	\$1 745,95	\$1 885,73	\$2 007,27	
VAN	\$1 745,45					
TIR	107 %					
Interés	15 %					