



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

**FITORREMEDIACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DE LA EXTRACCIÓN DE
ACEITES DE PALMA AFRICANA.**

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos
establecidos para optar por el título de Ingeniero Ambiental en Prevención y
Remediación.

Profesor guía

Ing. Yasser Alejandro González Romero.

Autor

Santiago Eduardo Cortés Delgado

Año

2015

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.”

Yasser Alejandro González Romero
M.Sc. Ingeniería Ambiental
C.C.070373762-7

DECLARACIÓN DE AUDITORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigente.”

Santiago Eduardo Cortés Delgado
C.C.131007014-7

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres y hermanos, que en todo momento me brindaron su apoyo, y que a su vez supieron guiarme y motivarme en mis proyectos de vida; a mi profesor guía que supo encaminar mi carrera de la mejor manera y a los diferentes profesores que aportaron sus conocimientos y colaboración en el presente trabajo.

DEDICATORIA

Con todo el amor que le tengo a mi familia, gracias por el esfuerzo, apoyo y tiempo que han depositado en mí. El sacrificio de cada miembro de mi familia por verme culminar cada etapa de mi vida, esto es para ustedes.

RESUMEN

La remoción de contaminantes por humedales artificiales ha sido utilizada a nivel mundial gracias al bajo consumo energético y a los resultados favorables obtenidos en los diversos estudios.

El presente estudio se planteó objetivos con el fin de remover la contaminación del agua residual que provienen de la extracción de aceite de palma africana. Caracterizar el agua mediante un análisis físico-químico, diseñar mediante el modelo K-C* e instalar los humedales artificiales y evaluar la eficiencia entre los sistemas estudiados.

La remoción de contaminantes será analizado mediante el desarrollo de dos sistemas implementados en los humedales artificiales: sistema superficial y el sistema subsuperficial de flujo vertical. Los resultados obtenidos serán comparados con un humedal de testigo.

Para el dimensionamiento de los siete humedales artificiales se utilizará el modelo no mecanístico K-C*, este diseño permite la entrada del agua residual sea la adecuada para no saturar a los sistemas, a su vez, se desarrollará el ANOVA para determinar los tratamientos que resultaron favorables.

Al finalizar el periodo de experimentación, el estudio presentó resultados favorables para los parámetros analizados, concluyendo que los humedales artificiales permiten la remoción de altas cargas orgánicas en las aguas residuales y la instalación de los sistemas pueden ser una alternativa para reducir costos energéticos y para aportar a la conservación del ambiente como tecnología limpia.

ABSTRACT

Pollutant removal by constructed wetlands has been used worldwide thanks to its low energy consumption and the favorable results obtained in the various studies.

The present study objectives were to remove residual water pollution arising from the extraction of palm oil. Characterize the water by a physical-chemical analysis, design the constructed wetlands with the model K-C* and evaluate the efficiency between the installed systems.

Pollutant removal will be discussed by the development of two constructed wetlands implemented systems: Surface flow constructed wetlands and vertical flow constructed wetlands. The results will be compared to a wetland witness.

For the sizing of the seven constructed wetlands the non-mechanistic model K-C* will be used, this design allows the entry of an adequate wastewater to avoid saturating the system, also an ANOVA was developed to determine the treatments were favorable.

At the end of the experimental period, the study showed favorable results for the parameters analyzed, concluding that constructed wetlands permit the removal of high organic loads in wastewater, and the installation of this systems can be an alternative to reduce energy costs and to provide the conservation of the environment as clean technology.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Alcance.....	3
1.3. Justificación.....	3
1.4. Objetivos.....	5
1.4.1. Objetivo General.....	5
1.4.2. Objetivos Específicos.....	5
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1. Descripción del Proyecto.....	6
2.1.1. Problemática Ambiental en la extracción de Aceite.....	6
2.2. Extractoras de palma aceitera.....	8
2.2.1. Descripción de procesos.....	8
2.2.2. Diagrama de flujo de procesos.....	9
2.3. Humedales Artificiales.....	10
2.3.1. Funciones de los humedales artificiales.....	12
2.3.2. Tipos de humedales artificiales.....	15
2.3.3. Marco Legal.....	19
3. METODOLOGÍA.....	23
3.1. Descripción del experimento.....	23
3.2. Plan de Muestreo.....	23
3.2.1. Muestreo.....	24
3.2.2. Técnica de recolección.....	24
3.2.3. Caracterización del Agua Residual.....	25
3.3. Métodos y medición de parámetros.....	26
3.3.1. Demanda Química de Oxígeno.....	26
3.3.2. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅).....	26
3.3.3. Nitrógeno Total.....	26
3.3.4. Fósforo Total.....	27

3.3.5. Turbidez	27
3.3.6. Conductividad eléctrica y pH.....	28
3.4. Diseño experimental.....	28
3.5. Diseño de las unidades experimentales	29
3.5.1. Modelo K-C*	29
3.5.2. Instalación del sistema de tuberías	31
3.5.3. Ensayo experimental	35
3.6. Construcción de la unidad experimental.....	36
3.7. Especies de plantas a estudiar	38
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	42
4.1. Análisis comparativo entre rangos múltiples.....	44
4.2. Caracterización inicial de Agua Residual	53
4.3. Resultados del modelo K-C*	55
4.3.1. Resultados del diseño no mecanístico para el parámetro de DQO.....	55
4.3.2. Resultados del diseño no mecanístico para el parámetro de nitrógeno total.....	57
4.3.3. Resultados del diseño no mecanístico para el parámetro de fósforo total.....	59
4.4. Resultados del parámetro de DQO para los sistemas desarrollados	61
4.5. Resultados del Parámetro DBO ₅ para los sistemas desarrollados	63
4.6. Resultados del parámetro de nitrógeno Total en el sistema...	64
4.7. Resultados del parámetro de fósforo total en el sistema	66
4.8. Turbidez	68
4.8.1. Resultados de Turbidez en la especie <i>Eichhornia Crasspises</i> para el sistema superficial	68

4.8.2. Resultados de turbidez en la especie <i>Eichhornia Azurea</i> para el sistema subsuperficial.....	70
4.8.3. Eficiencia de remoción del parámetro de turbidez entre los sistemas.....	73
4.9. Conductividad.....	75
4.9.1. Resultados de conductividad en la especie <i>Eichhornia Crasspises</i> para el sistema superficial.....	75
4.9.2. Resultados de conductividad en la especie <i>Eichhornia Azurea</i> para el sistema subsuperficial	78
4.9.3. Eficiencia de remoción del parámetro de conductividad entre los sistemas	79
4.10. pH.....	81
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	82
5.1. Conclusiones.....	82
5.2. Recomendaciones.....	84
REFERENCIAS	85
ANEXOS	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Utilización de agua en etapas de refinación.....	4
Tabla 2: Cargas contaminantes en efluentes de extracción de aceite.	7
Tabla 3: Lista de posibles contaminantes encontrados en las aguas residuales.....	11
Tabla 4: Estratificación de los cubetos experimentales en sistema subsuperficial	23
Tabla 5: Parámetros químicos para la caracterización del agua residual	25
Tabla 6: Rango de Medición para el equipo Hanna Instruments HI88713.	27
Tabla 7: Clasificación taxonómica de la especie.....	39
Tabla 8: Tabla comparativa de la especie <i>Eichhornia Crassipes</i>	40
Tabla 9: Clasificación taxonómica de la especie	41
Tabla 10: Desarrollo de la técnica ANOVA para la turbidez de las siete unidades.....	43
Tabla 11: Desarrollo de la técnica ANOVA para la conductividad de las siete unidades experimentales.....	44
Tabla 12: Resultados del método LSD para el parámetro de turbidez	46
Tabla 13: Resultados del método LSD para el parámetro de conductividad	47
Tabla 14: Resultados del método Tukey para el parámetro de turbidez	48
Tabla 15: Resultados del método Tukey para el parámetro de conductividad	50
Tabla 16: Resumen de resultados para los métodos LSD y Tukey para el parámetro de turbidez	52
Tabla 17: Resumen de resultados para los métodos LSD y Tukey para el parámetro de conductividad	53
Tabla 18: Resultados de los parámetros Químicos para el agua residual proveniente de la extracción de Palma aceitera.....	54
Tabla 19: Resultados de los parámetros físicos para el agua residual proveniente de la extracción de Palma aceitera.....	54
Tabla 20: Valores usados para la modelización de DQO.....	55
Tabla 21: Presentación de resultados del modelo estadístico K-C* para el parámetro de DQO.....	56

Tabla 22: Valores usados para la modelización de nitrógeno total.	58
Tabla 23: Presentación de resultados del modelo estadístico K-C* para el parámetro de Nitrógeno total.....	58
Tabla 24: Valores usados para la modelización de fósforo total.	59
Tabla 25: Presentación de resultados del modelo estadístico K-C* para el parámetro de fósforo total.	60
Tabla 26: Eficiencia de remoción del parámetro DQO para cada unidad experimental.....	62
Tabla 27: Eficiencia de remoción del parámetro DBO ₅ para cada unidad experimental.....	64
Tabla 28: Eficiencia del parámetro nitrógeno para los sistemas superficial y subsuperficial	66
Tabla 29: Eficiencia para el parámetro de fósforo total para los sistemas superficiales y subsuperficiales.....	68
Tabla 30: Eficiencia de remoción de turbidez del sistema superficial y subsuperficial.	74
Tabla 31: Eficiencia de remoción de conductividad del sistema superficial y subsuperficial	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de flujo de procesos en la industria de extracción de aceite.....	9
Figura 2: Esquema del humedal artificial de flujo superficial.....	16
Figura 3: Esquema del humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal.....	17
Figura 4: Esquema del humedal artificial subsuperficial de flujo vertical.....	18
Figura 5: Vista lateral del sistema superficial.....	32
Figura 6: Vista frontal del sistema superficial.....	32
Figura 7: Vista superior del sistema superficial.....	33
Figura 8: Vista lateral del sistema subsuperficial.....	33
Figura 9: Vista frontal del sistema subsuperficial.....	34
Figura 10: Vista superior del sistema subsuperficial.....	34
Figura 11: Esquema de distribución del experimento.....	35
Figura 12: Distribución de las plantas en cada módulo con Sistema subsuperficial.....	38
Figura 13: <i>Eichhornia crassipes</i> (Lechuguin).....	39
Figura 14: <i>Eichhornia Azurea</i>	41
Figura 15: Presentación de datos para el método Tukey desarrollado en el parámetro de turbidez.....	49
Figura 16: Presentación de datos para el método Tukey desarrollado en el parámetro de conductividad.....	51
Figura 17: Relaciones proporcionales entre los parámetros presentados en el modelo no mecanístico K-C*.....	57
Figura 18: Comparación de DQO con respecto al tiempo para cada unidad experimental.....	61
Figura 19: Comparación de DBO5 con respecto al tiempo para cada unidad experimental.....	63
Figura 20: Comparación del comportamiento de nitrógeno total con respecto al tiempo para cada unidad experimental.....	65

Figura 21: Comparación del comportamiento de fósforo total con respecto al tiempo para cada unidad experimental	67
Figura 22: Resultados de Turbidez vs tiempo (semanas transcurridas del experimento) para el sistema superficial	69
Figura 23: Resultados de Turbidez vs tiempo (semanas transcurridas del experimento) para el sistema subsuperficial	71
Figura 24: Fotografía comparativa entre segunda y octava semana de experimentación.	72
Figura 25: Diagrama de cajas y bigotes para la remoción de turbidez en los sistemas.....	75
Figura 26: Resultados de conductividad vs tiempo (semanas transcurridas del experimento) para el sistema superficial	76
Figura 27: Fotografía comparativa entre primera y duodécima semana de experimentación.	77
Figura 28: Resultados de conductividad vs tiempo (semanas transcurridas del experimento) para el sistema subsuperficial.....	78
Figura 29: Diagrama de cajas y bigotes para el comportamiento de la conductividad eléctrica en los sistemas.....	80
Figura 30: Resultados de nivel de pH en comparación con el agua contaminada.....	81

1. INTRODUCCIÓN

Los humedales naturales o artificiales son áreas que están saturadas superficialmente por el agua, los humedales se encuentran a profundidades de 60cm y existe vegetación que emerge por encima del nivel de agua. Es importante la existencia de estas especies ya que estas permiten la formación de películas bacterianas, adsorbe los compuestos del agua residual, aumenta la aireación en la columna de agua, no permite el crecimiento de algas ya que las plantas limitan la penetración de la luz solar y facilita la filtración.

Los humedales son muy cotizados y se caracterizan por tener estas tres funciones básicas:

- Fijación de contaminantes en la materia orgánica y la superficie del suelo.
- Transformar y utilizar los elementos necesarios por medio de los microorganismos encontrados en las plantas.
- Alto nivel de remoción de contaminantes con un bajo costo de implementación y un nivel bajo de mantenimiento.

Los humedales artificiales están divididos en dos sistemas: Sistema a flujo libre (SFL) y Sistema de flujo subsuperficial (SFS). Para el sistema a flujo libre el nivel del agua se encuentra sobre la superficie del suelo, las plantas pueden estar sembradas o flotando, estas emergen sobre la superficie del agua. En el sistema de flujo superficial se observa el nivel del agua que se encuentra por debajo de la superficie del terreno, es decir, que el flujo del agua se ubica en la cama de arena y grava.

1.1. Antecedentes

En el año 2010 los cultivos de palma aceitera en el Ecuador ascendieron a más de 250.000 ha, estimando una producción nacional de 2.85 millones de toneladas métricas, siendo así Esmeraldas la provincia con mayor porcentaje de áreas de cultivos y con mayor cantidad de industrias para el procesamiento (FLACSO, 2010).

En el presente, el recurso agua es indispensable para el planeta no solo para supervivencia de los seres humanos, sino también como factor importante para el desarrollo económico del país. El agua a través de su ciclo se mueve alrededor del planeta en cualquiera de sus estados sea sólido, líquido o gaseoso por lo que es considerado un recurso renovable. A pesar de esto, el problema del agua radica en su calidad, uno de los mayores limitantes para el uso del mismo (Vargas y Agua Ecuador, 2013, p.1).

En el Ecuador uno de los sectores principales de ingresos económicos se encuentra en la industrialización de productos agrícolas. Esta actividad depende fundamentalmente de la disponibilidad de agua, el aprovechamiento del agua en industrias agrícolas permite mayor eficiencia y mayor ingreso (FAO, 1993). El uso indiscriminado en las industrias ha enfocado a las autoridades en regir normativas ambientales que limiten el uso y mantengan límites permisibles en efluentes contaminados. El cultivo y la industrialización de la palma aceitera se ha convertido en uno de los mayores ingresos para el país, esto es debido a los múltiples usos que la planta puede entregar (ANCUPA, 2010).

En el proceso que existe para la extracción aceitera de palma, las descargas líquidas de naturaleza orgánica se consideran de bajo nivel de impacto si se compara con otros procesos de industrialización. Aproximadamente el promedio de generación de efluentes por tonelada de fruta fresca procesada oscila entre 800 y 900 litros (Reyes, 2012).

Cuando se trata las aguas residuales, que provienen de zonas urbanas, industriales o de origen agropecuario, la depuración de estos efluentes se han convertido en uno de los retos ecológicos y económicos más impactantes en el Ecuador. Los sistemas comúnmente llamados blandos para el tratamiento de aguas residuales son métodos que suelen disminuir el costo operativo y su mantenimiento es menor que un tratamiento convencional. Estos sistemas suelen llegar a ser igual de eficaces en la eliminación de la materia orgánica e incluso con mayor efectividad en la remoción de patógenos y nutrientes. Estos procesos ya mencionados requieren mayor extensión de terreno y son implementados a menor escala (Fernández, Beascochea, Muñoz y Curt, 2011).

Entre los sistemas blandos está el método más utilizado para tratamientos secundarios son los sistemas con humedales artificiales que tienen como el objetivo de descontaminar efluentes (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010), es decir que, el principal elemento de las plantas consiste en transferir el oxígeno a las raíces donde se realiza la captación de contaminantes y a su vez la disminución de la carga orgánica.

1.2. Alcance

El trabajo de titulación tiene como fin el tratamiento de las aguas residuales provenientes de la extracción de aceite que mantiene la industria, reduciendo principalmente la carga orgánica de los efluentes, realizando el diseño e implementación de un humedal artificial por medio de un plan piloto, basándose en plantas macrófitas superficiales y subsuperficiales. Para evaluar la eficiencia se realizará la medición y monitoreo respectivo de los parámetros que se establece en el TULSMA.

1.3. Justificación

El Ecuador presenta gran ventaja cuando se habla de disponibilidad de agua, ya que se encuentra entre uno de los países con mayor dotación de agua según lo dicta el Consejo Nacional de Recursos Hídricos. Sin embargo, la

contaminación que es derivada por las actividades humanas productivas pone en peligro a los cuerpos de agua, a la salud y a su naturaleza. En efecto, los ríos de la provincia de Sto. Domingo de los Tsáchilas padecen los efectos de desechar el agua sin previo tratamiento (CNRH, 2007).

Las industrias dedicadas a la extracción de aceite de Palma Africana generan altos índices de consumo en agua potable (Reyes, 2012). El presente trabajo de investigación se enfoca en la reducción de contaminantes orgánicos en aguas provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales de la industria PEXA, ya que al finalizar los procesos en la extracción de aceite se genera efluentes con altos índices de contaminación.

Se observa en la siguiente tabla cuales son las etapas en la refinación del aceite que utilizan agua para sus procesos y cuál es su destino final.

Tabla 1: Utilización de agua en etapas de refinación. Adaptado de Reyes (2012).

Etapas del Proceso	Destino del efluente
Recepción	Planta de Tratamiento de agua
Esterilización	Planta de Tratamiento de agua
Desfrutado	Planta de Tratamiento de agua
Extracción	Planta de Tratamiento de agua
Clarificación	Planta de Tratamiento de agua

Los sistemas más utilizados en las plantas extractoras de aceites requieren gran energía y productos químicos para disminuir las concentraciones de contaminación, pero la ineficiencia de los sistemas afecta a cauces de ríos, al suelo y aire de la zona (ANCUPA, 2012).

Por otro lado, los procesos naturales que serán utilizados en la investigación sobresalen por los bajos costes y sus resultados eficientes al finalizar. Este sistema aporta al desarrollo ambiental ya que se trata de un proceso natural,

que su principal ventaja es reducir productos químicos y altos índices de energía (Fernández et al., 2011).

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Determinar la eficiencia de fitorremediación de humedales de flujo superficial y subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales que provienen de una extractora de Palma Aceitera.

1.4.2. Objetivos Específicos

- a) Caracterizar la calidad del agua contaminada mediante un análisis físico-químico.
- b) Diseñar a escala piloto los sistemas de fitorremediación mediante el modelo de K-C*.
- c) Evaluar la eficiencia de los sistemas de flujo superficial y subsuperficial.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Descripción del Proyecto

2.1.1. Problemática Ambiental en la extracción de Aceite

La plantación y el cultivo de palma Aceitera en el Ecuador comenzó en 1953 con pequeñas granjas en Santo Domingo, estos fueron relativamente pequeños, 15 años después se comienza a observar un gran crecimiento de plantaciones y se contabilizan 1000 hectáreas sembradas (MAGAP, 2014). De acuerdo al censo de palmicultores realizado por ANCUPA del 2005, el área plantada con palma Africana sobrepasaba las 200 mil hectáreas regado por todo el Ecuador (ANCUPA, 2007).

Las plantaciones de palma se encuentran en cuatro regiones en el país, la zona occidental es la principal con 222.388 hectáreas sembradas, esta zona es conocida como el triángulo por las tres ciudades más importantes que son: Quevedo, Santo Domingo y Quinindé. La zona de San Lorenzo es la segunda región con más de 23.386 hectáreas plantadas, seguido de la zona Oriental con 19.784 hectáreas y finalizando con la zona Guayas con 4.442 hectáreas sembradas (Fedapal, 2013).

Como lo explica el (MAGAP, 2013) la palma Africana se encuentra entre los cultivos primordiales en el Ecuador, con las encuestas realizadas en el 2011 se obtuvo alrededor de 269.574 hectáreas sembradas en la superficie del país.

Por este motivo el consumo de agua para la industria de palma africana sigue aumentando y muchas de estas industrias no realizan el tratamiento necesario para el agua residual generada. A continuación se presenta la cantidad de agua de consumo y abastecimiento de agua río.

Toda actividad que involucre la mano de obra del humano produce efluentes residuales, los niveles de contaminación dependen del uso que se dio al agua. Se puede concluir que en los asentamientos de personas se va a generar aguas residuales, de lo cual estas aguas residuales son desechadas en los cuerpos de agua naturales más cercanos.

Con el fin de enriquecer los conceptos, las aguas residuales son denominadas a todas las aguas que no tiene un valor inmediato en el fin que se utilizó así tampoco para el propósito que principalmente se produjo ya que existen variaciones en su calidad y cantidad. No obstante, los efluentes residuales que son desechados por una persona pueden servir para otra persona en otro lugar. Existen cuatro fuentes principales que producen aguas residuales, estas son: aguas industriales, aguas domésticas, aguas pluviales y escorrentías de trabajos en agricultura, cabe recalcar que esta investigación está enfocada en las aguas industriales únicamente en las industrias de extracción de aceite (FAO, 2011)

Tabla 2: Cargas contaminantes en efluentes de extracción de aceite. Adaptado del MAE (2013).

Proceso de producción de aceite de palma			
Evaluación de Cargas Contaminantes		Proceso Industrial	
		Generación de energía	Producción de aceite de palma
Unidad		Tonelada métrica	tonelada
Efluentes	Volumen en Desechos (m ³)	-	57.5
	pH	-	-
	DBO (mg/l O ₂)	-	79
	DQO (mg/l O ₂)	-	349
	SS (Kg/unidad)	-	16.4
	Aceites (mg/l)	-	6.5

2.2. Extractoras de palma aceitera

En el desarrollo de las extractoras tiene como objetivo la extracción del aceite de la palma africana, con el fin de aprovechar la excelente calidad que existe en la materia prima. Las actividades que se realizan para la extracción de aceite se presentan a continuación.

2.2.1. Descripción de procesos

La recepción de la materia prima tiene objetivo recopilar y depositar los racimos que son entregados por los agricultores con el fin de evaluar la calidad del fruto. Posteriormente el desfrutado es la etapa donde se separa mecánicamente los frutos del racimo, se utiliza el tambor desfrutador rotatorio. Luego se prosigue a la digestión, este proceso tiene como fin disminuir la viscosidad del aceite en el fruto, a su vez facilitar la evacuación que existe durante la etapa de prensado.

En el prensado se aplica agua caliente en la salida del digestor y también en la zona inferior de la prensa, este proceso tiene como objetivo lavar las fibras y lograr la mayor eficiencia en la extracción del aceite. En este proceso se obtiene fibras como residuo sólido y lodos como agua residual, las fibras las utilizan como combustible y el aceite es extraído de los lodos para ser reutilizado en diferentes procesos de la extractora. Esta etapa tiene como resultado residuos sólidos y aguas residuales (MAE, 2013).

En el proceso de clarificación se implementa el filtrado, la centrifugación y la decantación con el fin de eliminar las impurezas y el exceso de agua. Posteriormente se encuentra la etapa del secado en donde el aceite que se encuentra ya separado es decantado y bombeado al tanque de recepción, en este tanque se mantiene a una temperatura de 80C. Para la refinación se necesita la aplicación de compuestos químicos para minimizar las gomas y residuos metálicos.

Mediante soluciones químicas y el procedimiento de agitación se logra eliminar los ácidos grasos y residuos sólidos, esto con el fin de que los residuos jabonosos generados sedimenten y luego proceder a separar, este proceso se llama neutralización. La desodorización es el proceso final de la extracción de aceite, este proceso tiene como propósito eliminar peróxidos, aldehídos y cetonas (MAE, 2013).

2.2.2. Diagrama de flujo de procesos

A continuación se presenta en la figura 2 el diagrama de flujo de todos los procesos presentes que se realizan en la extracción de aceite.

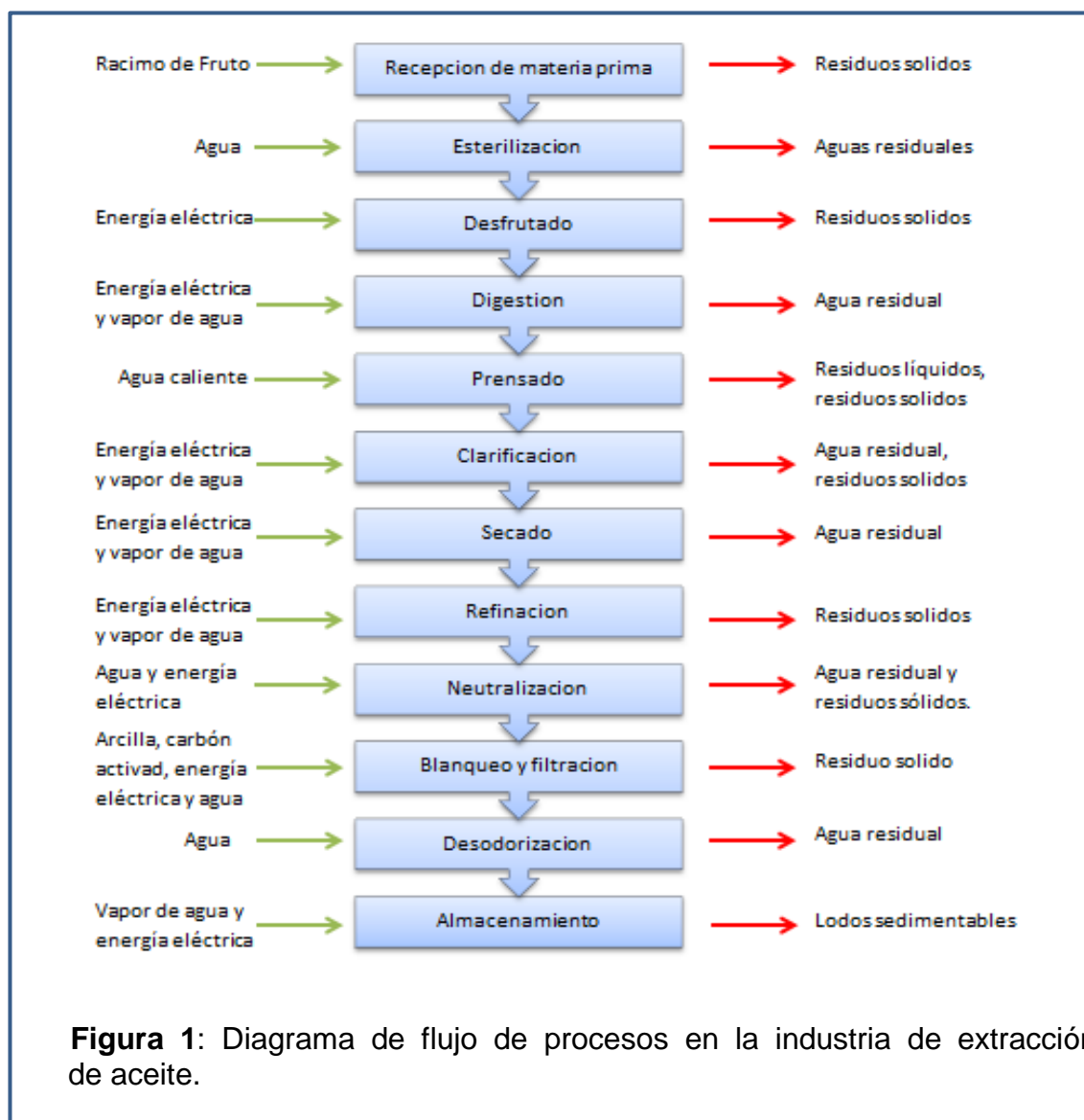


Figura 1: Diagrama de flujo de procesos en la industria de extracción de aceite.

2.3. Humedales Artificiales

La elaboración de un humedal está constituido en el diseño correcto de los cubetos que contienen cuatro elementos fundamentales: Agua residual, Sustrato, la vegetación y sus microorganismos. El agua residual, sustrato y la vegetación se pueden manipular en la construcción de un humedal, en cambio, los microorganismos se desarrollan de forma natural.

Agua residual

Las aguas residuales son provenientes del conjunto de procesos en una industria. Después de cumplir con su función y haber sido modificadas son recogidas por una red de tuberías y conducidas a las piscinas de oxidación de la industria.

El agua residual es el principal componente dentro de un humedal, ya que permite transportar los contaminantes y producir las reacciones responsables de la depuración. Las condiciones hidrológicas de la zona afectan en la eficiencia del humedal, como por ejemplo, la disponibilidad de los nutrientes y su salinidad determinaran que tipo de microorganismos van a desarrollarse. La hidrología es fundamental en el diseño del humedal artificial ya que pequeños cambios significarían la alteración de los procesos de depuración (Lara, 2009). A continuación los contaminantes de interés en el tratamiento de aguas son presentados en Tabla 3.

Tabla 3: Lista de posibles contaminantes encontrados en las aguas residuales. Adaptado de Metcalf y Rolim, (2008).

Contaminantes	Importancia
Sólidos suspendidos	Los sólidos suspendidos pueden llevar al desarrollo de depósitos de lodo y condiciones anaerobias, cuando los residuos no tratados son lanzados al ambiente acuático.
Materia orgánica biodegradable	Está compuesto por grasas, carbohidratos y proteínas. En general estos elementos son medidos por DBO y DQO.
Microorganismos patógenos	Son transmisores de enfermedades y existen en las aguas residuales.
Nutrientes	Pueden llegar a tener un crecimiento de vida acuática indeseada si estos son introducidos a un ambiente acuático.
Metales pesados	Son normalmente adicionados en las actividades humanas con un bajo nivel en las aguas residuales.
Sólidos inorgánicos disueltos	Para utilizar nuevamente el agua residual los compuestos como calcio, sodio y sulfatos deben ser removidos por ser potenciales degradadores del suelo.

Sustrato

En la elaboración de los humedales, el sustrato está conformado por: roca, grava, arena, sedimentos y algunos restos de vegetación que son acumulados en el humedal gracias al crecimiento biológico. La característica principal que se debe tener en cuenta es la permeabilidad suficiente para que agua

encuentre el paso a través del sustrato. Es decir, se debe utilizar suelos de tipo granular que tiene aproximadamente el diámetro de 5mm (Delgadillo et al., 2010).

La importancia del sustrato, los restos de vegetación y de los sedimentos son presentados a continuación:

- El sustrato tiene la capacidad de soportar y mantener a los organismos que se encuentran en el humedal.
- Es ideal para el almacenamiento de muchos contaminantes orgánicos e inorgánicos.
- El flujo del agua será influenciado por el nivel de permeabilidad que tiene el sustrato.
- Varias transformaciones biológicas y químicas son presentados dentro del sustrato (Lara, 2009).

Vegetación

La vegetación mantiene un rol principal en el tratamiento de aguas residuales mediante humedales ya que permite un rápido transporte de oxígeno, el transporte de oxígeno es dirigido hacia las zonas radiculares de las plantas que facilitan la descomposición. Así también el oxígeno entregado a las raíces crea regiones aerobias y permite que los microorganismos utilicen el oxígeno disponible para realizar diversas reacciones que influyen en la degradación de la materia orgánica y nitrificación (Arias, 2004).

2.3.1. Funciones de los humedales artificiales

El avance de la actividad humana ha dado como resultado el origen de diferentes tipos de humedales artificiales con diferentes tipos de plantas y climas, los humedales son determinados por los procesos de remoción de los contaminantes y a continuación se presenta los procesos de remoción.

- **Proceso de remoción etapa física**

Los humedales artificiales se encuentran en niveles altos de eficiencia en remoción de contaminantes relacionados al material sólido. El agua residual que se encuentra en la superficie del humedal se mueve lentamente, esto debido a que las raíces y las plantas proporcionan una resistencia al movimiento, los sólidos suspendidos son sedimentados por la baja velocidad que tiene el flujo de agua y también por el hecho de que en un humedal se obtiene un flujo laminar.

Como explica Chafloque,(2009) la eficiencia de remoción de contaminantes depende de la velocidad del agua en el sistema, es decir, los sólidos suspendidos son proporcional a la velocidad y a la longitud que mantenga el humedal artificial.

Se considera a la sedimentación como un proceso irreversible, ya que mantiene un resultado en la acumulación de los sólidos y de los componentes contaminantes que están asociados sobre la superficie del suelo de los humedales artificiales. Un tema importante que se debe considerar en proyectos es la resuspensión de los sedimentos ya que estos pueden reducir la eficiencia de remoción, esto se debe a altos periodos de velocidad del agua, bioturbulencia que se debe a la actividad de animales o humanos y a el desprendimiento de gas como es el oxígeno, metano y dióxido de carbono (Llagas, 2008).

- **Proceso de remoción biológico**

La etapa biológica en los humedales artificiales es quizá el proceso más importante para la remoción de contaminantes. La captación y procesos de la planta son considerados los más eficientes en la remoción. Los contaminantes como los nitratos, fosfatos y amonio son fácilmente asimilados por las plantas para sus procesos biológicos, el tiempo que se demora la planta en asimilar estos nutrientes varía por las condiciones climáticas y las características de las aguas residuales. Las especies leñosas son conocidas por el almacenamiento a largo plazo de los contaminantes en comparación con las especies

herbáceas, sin embargo, las especies herbáceas mantienen mayor velocidad de captación de los compuestos en comparación con las especies leñosas. (Gómez, 2008).

Los microorganismos y bacterias que se encuentran en el suelo también captan y almacenan nutrientes a corto plazo, así también, algunos contaminantes.

El termino detritus o basura orgánica es la materia de la planta muerta que se acumula en la superficie del suelo de los humedales, por efecto de lixiviación y descomposición los componentes contaminantes que absorbieron las plantas son devueltos en el agua y el suelo. La mayoría de contaminantes son captados por los microorganismos pero estos tienen una cantidad medible de almacenamiento antes de saturarse, la descomposición de dichos microorganismos utilizan carbono como fuente de energía, así convirtiendo el carbono en gases como bióxido de carbono y/o metano.

- **Proceso de remoción química**

La absorción es el proceso más importante en la etapa de remoción química, este proceso da lugar a la retención de los contaminantes a largo plazo. Se entiende por absorción como transferencia de iones a partir de la solución de agua, a la fase sólida. La absorción está involucrada en un grupo de procesos que incluye a reacciones de precipitación y adsorción, la absorción se encuentra referido como la unión de iones por intercambio catiónico o absorción química.

La reacción por intercambio catiónico implica una unión física entre cationes a la superficie del suelo y su materia orgánica. La unión creada en comparación a la unión química es muy débil, entonces, los cationes se inmovilizan en el suelo. Los compuestos como el amonio (NH_4^+) son cationes que son considerados en las aguas residuales, la capacidad que tiene el suelo para retener los cationes varía dependiendo la cantidad de arcilla colocada en el humedal, es decir, a mayor arcilla mayor es la retención que se encuentra expresada como (CEC) la capacidad de intercambio catiónico. Existe la absorción química, esta representa una manera más fuerte entre la vinculación

en el intercambio catiónico (Chafloque, 2009). Un sin número de compuestos metálicos y orgánicos pueden ser inmovilizados en el suelo con la ayuda de la absorción química. En el caso de los fosfatos, estos pueden unirse y precipitarse con los óxidos así formando nuevos compuestos minerales (fosfatos de aluminio y hierro).

Otra de las reacciones producidas en los humedales es la volatilización de compuestos que están disueltos en el agua y dispersan en la atmosfera. El amoniaco (NH_3) y su volatilización es muy eficiente y se puede extender al 80% de eficiencia en remoción. Es importante recalcar que el agua a pH cerca de 8,5, el amoniaco existe en forma ionizada y significa que no es volátil (Benefil, L.D. & C.W. Randall, 2006).

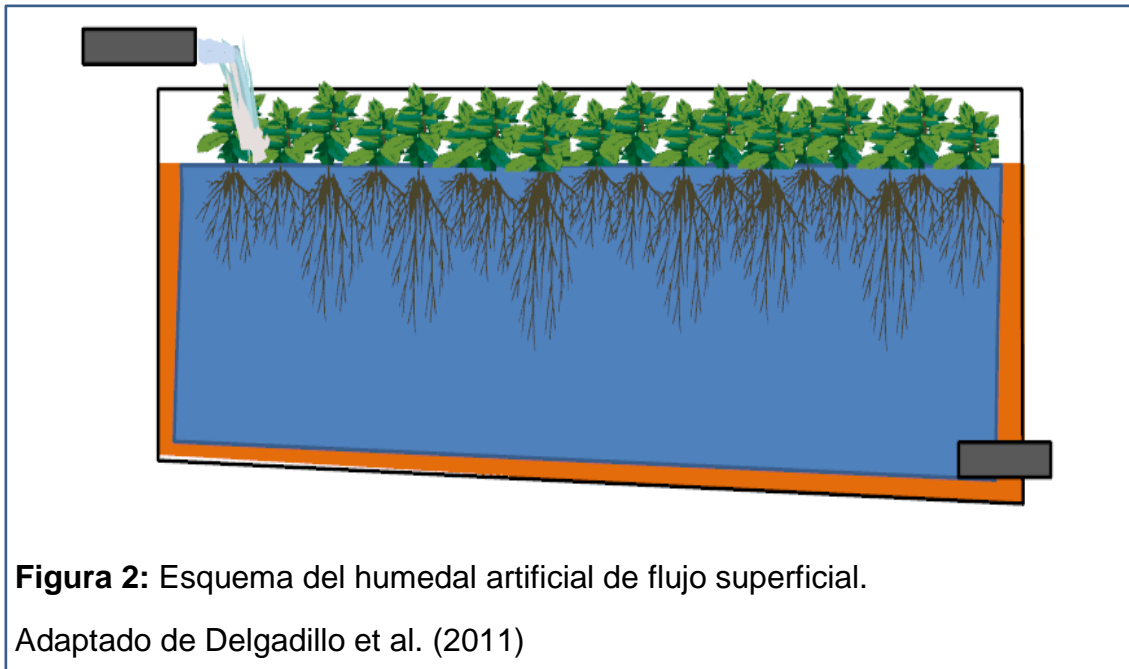
2.3.2. Tipos de humedales artificiales

A lo largo del desarrollo tecnológico y su avanzada investigación es posible clasificar los diferentes tipos de humedales artificiales. Hay muchas variables que se pueden tomar en cuenta y son: en base al sistema de flujo del agua residual, vegetación y sustrato o lecho. La construcción de los humedales pueden combinarse entre sistemas, con el fin de utilizar las ventajas específicas de cada sistema (Vyzmazal, 2008). También se pueden clasificar por la dirección que toma el agua residual a través del sistema del humedal y se consideran los siguientes tipos: Superficial, subsuperficial de flujo horizontal y vertical (González, 2007).

Humedales de flujo Superficial

La dirección que toma el agua residual en el sistema es de tipo horizontal. El agua recorre por la superficie del canal o estanque que fue construido con una profundidad que oscila entre 0.40 y 1 metro, es por eso que se le da el nombre de superficial. Las paredes del humedal deberán contar con taludes y un recubrimiento inferior con un material impermeable para evitar la filtración del agua residual, así también deberá contar con dos canales de entrada y de salida que permita el flujo continuo del agua residual (González, 2007).

En la mayoría de humedales las plantas que cubren al agua residual son macrófitas emergentes o helófitas, ya que este tipo de plantas permite desarrollar su sistema radicular sobre el agua. En el proceso de depuración las plantas no son cosechadas, la hojarasca desarrollada proporciona carbono orgánico que permite ayudar a los procesos de desnitrificación (Fernández et al., 2011).



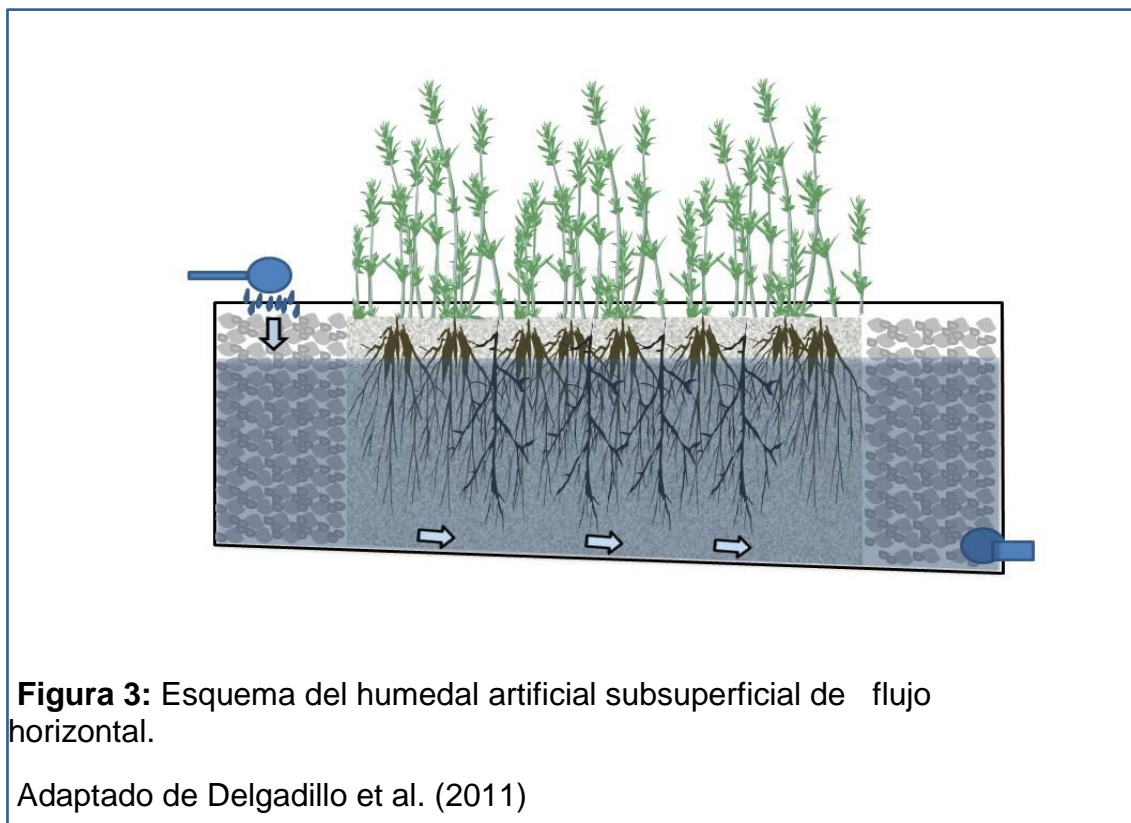
Humedales de flujo subsuperficial

Humedal Subsuperficial de flujo horizontal

En este caso el flujo que toma el agua residual es de tipo horizontal subsuperficial, el agua encuentra su paso a través del sustrato o medio inherente, es decir, por debajo de la superficie del sistema. Uno de los métodos primordiales para la remoción o retención de compuestos orgánicos es la floculación y el asentamiento de las partículas coloidales (Vymazal & Kröpfelová, 2008). El diseño y construcción del humedal es básicamente igual al humedal de flujo superficial con taludes y paredes impermeables.

La profundidad del agua se encuentra cercana a 60 cm, la vegetación es plantada en el sustrato o medio inherente, permitiendo que el agua

permanezca en contacto con las raíces de las plantas. La profundidad que tiene el lecho varía entre 0.45 y 1 m y el fondo del humedal tiene una pendiente que oscila entre 0.5 y 1%. Es fundamental que el flujo del agua residual mantenga un nivel inferior al de la superficie con alrededor de 5 a 10cm, esto se logra controlando el flujo en la salida del agua residual (Delgadillo et al., 2010).



Humedal Subsuperficial de flujo Vertical

En los sistemas de humedales subsuperficiales de flujo verticales es importante conocer la dirección que toma el agua residual en el proceso, estos sistemas necesariamente tienen que ser cargados intermitentemente, es decir, siempre entregar agua a las plantas sin importar las cantidades con el fin de estimular y preservar al máximo todas las condiciones aerobias. En la construcción de estos sistemas hay muchos factores que pueden variar, así mismo, el resultado que se obtenga también va a depender de la construcción. Estos humedales son conocidos como filtros intermitentes, porque el flujo del agua pasa por

varios lechos en el sistema y permite la captación de los contaminantes, el procedimiento del humedal se basa en el flujo de agua de arriba hacia abajo siguiendo la dirección de la gravedad, esto se consigue a través del sistema de tuberías con riego intermitente que se aplicó en la construcción. La difusión del oxígeno en el aire puede contribuir en mayor nivel a la oxigenación en el lecho, en comparación a la transferencia de oxígeno de las plantas (Arias, Brix, 2005).

Las aguas residuales se dan el paso infiltrándose por el sustrato inerte que está compuesto de arena, grava, piedra de río, etc. A diferencia del sistema de humedales subsuperficiales de flujo horizontal, este sistema se construye con varias capas de sustrato y las capas más finas son ubicadas en la parte de arriba, aumentando la dimensión de la grava mediante se acerca al fondo del humedal.

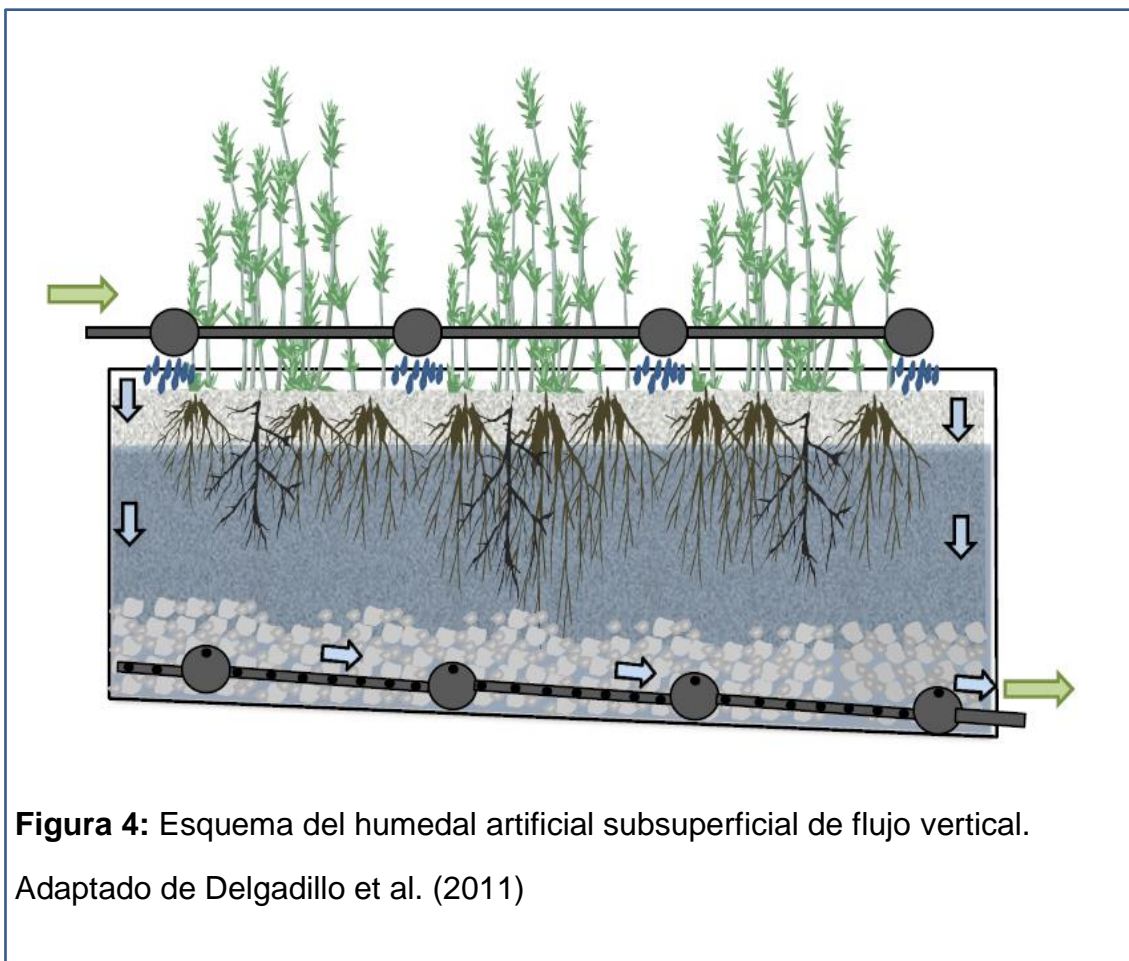


Figura 4: Esquema del humedal artificial subsuperficial de flujo vertical.

Adaptado de Delgadillo et al. (2011)

2.3.3. Marco Legal

Toda actividad industrial que genere contaminación ambiental, deben estar reguladas por un conjunto de leyes, estas tienen como objetivo un ambiente sano. A continuación se presenta el marco legal aplicable para la extracción de aceite.

- **Constitución Política de la República del Ecuador**

TITULO II.- Capítulo segundo.- sección segunda

Art. 14.- Se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, *sumak kawsay*.

Art. 15.- El Estado promoverá, en el sector pública y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas no contaminantes de bajo impacto.

TITULO II.- Capítulo sexto

Art. 66.- Se reconoce y garantizará a las personas:

- 27) El derecho a vivir en un ambiente sano, ecológicamente equilibrado, libre de contaminación y en armonía con la naturaleza.

TITULO II.- Capítulo séptimo

Art. 74.- Las personas, comunidades, pueblos y nacionalidades tendrán derecho a beneficiarse del ambiente y de las riquezas naturales que les permitan el buen vivir.

TITULO II.- Capítulo noveno

Art. 83.- Son deberes y responsabilidades de las ecuatorianas y los ecuatorianos, sin perjuicio de otros previstos en la Constitución y la ley:

- 6) Respetar los derechos de la naturaleza, preservar un ambiente sano y utilizar los recursos naturales de modo racional, sustentable y sostenible.

TITULO V.- Capítulo primero

Art. 276.- El régimen de desarrollo tendrá los siguientes objetivos:

- 4) Recuperar y conservar la naturaleza y mantener un ambiente sano y sustentable que garantice a las personas y colectividades el acceso equitativo, permanente y de calidad al agua, aire y suelo, y a los beneficios de los recursos del subsuelo y de patrimonio natural.

TITULO VII.- Capítulo segundo.- Sección primera

Art. 396.- El Estado adoptará las políticas y medidas oportunas que eviten los impactos ambientales negativos, cuando exista certidumbre de daño.

Art. 398.- Toda decisión o autorización estatal que pueda afectar al ambiente deberá ser consultada a la comunidad, a la cual se informara amplia y oportunamente. El sujeto consultante será el Estado.

Art. 399.- El ejercicio integral de la tutela estatal sobre el ambiente y la corresponsabilidad de la ciudadanía en su preservación, se articulará a través de un sistema nacional descentralizado de gestión ambiental, que tendrá a su cargo la defensoría del ambiente y la naturaleza.

TITULO VII.- Capítulo segundo.- Sección sexta

Art. 411.- El Estado garantizará la conservación, recuperación y manejo integral de los recursos hídricos, cuencas hidrográficas y caudales ecológicos asociados al ciclo hidrológico. Se regulará toda actividad que pueda afectar la calidad y cantidad de agua, y el equilibrio de los ecosistemas, en especial en las fuentes y zonas de recarga de agua. La sustentabilidad de los ecosistemas y el consumo humano serán prioritarios en el uso y aprovechamiento del agua.

Art. 412.- La autoridad a cargo de la gestión del agua será responsable de su planificación, regulación y control. Esta autoridad cooperará y se coordinará con la que tenga a su cargo la gestión ambiental para garantizar el manejo del agua con un enfoque ecosistémico.

- **Ley de gestión ambiental**

TITULO III.- Capítulo segundo.- Evaluación de impacto ambiental y del control ambiental

Todos los artículos nombrados en este capítulo se basan en los requisitos necesarios para realizar una actividad que tenga efectos negativos contra el medio ambiente.

TITULO III.- Capítulo quinto.- Instrumentos de aplicación de normas ambientales

Es fundamental incluir a los instrumentos y métodos que deben ser utilizados para aplicar y mantener las normas ambientales

Art. 33.- Establécense como instrumentos de aplicación de las normas ambientales los siguientes: parámetros de calidad ambiental, normas de efluentes , régimen de permisos y licencias administrativas, evaluaciones de impacto ambiental, listados de productos contaminantes y nocivos para la salud humana y el medio ambiente, certificaciones de calidad ambiental de servicios.

- **Ley de aguas**

TITULO II.- Capítulo segundo.- De la contaminación

Art. 22.- Prohíbese toda contaminación de las aguas que afecten a la salud humana o al desarrollo de la flora o de la fauna.

TITULO III.- De la adquisición de derechos de aprovechamiento

Art. 23.- Las concesiones de un derecho de aprovechamiento de agua son:

- a) “De paso determinado”, para riego, industrias y demás labores productivas

Art. 28.- Para cumplir con el objetivo de esta ley, el Consejo Nacional de Recursos Hídricos registrará obligatoriamente las concesiones de los derechos de aprovechamiento.

TITULO IV.- De los usos de aguas y prelación

Art. 35.- Los aprovechamientos de agua están supeditados a la existencia del recurso, a las necesidades de las poblaciones, del fundo o industria y a las prioridades señaladas en esta ley.

TITULO VII.- De las aguas para fines energéticos, industriales y mineros

Art. 42.- Se consideran derechos de aprovechamiento de aguas para la generación destinada a actividades industriales y mineras, especialmente a las contempladas en el Plan General de Desarrollo del País.

- **Ley de prevención y control de contaminación ambiental**

Capítulo II.- De la prevención y control de la contaminación de las aguas

Art. 6.- Queda prohibido descargar, sin sujetarse a las correspondientes normas técnicas y regulaciones a los ríos, las aguas residuales que contengan contaminantes que sean nocivos a la salud humana, fauna y flora.

- **Acuerdo ministerial 061.- Libro VI Calidad Ambiental**

Anexo 1 del libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente: Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes al recurso agua

Se consideró la tabla 10. Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce, los valores de esta tabla se encuentran en anexos.

3. METODOLOGÍA

3.1. Descripción del experimento

El experimento se planificó para construir e instalar 7 humedales artificiales, y se desarrollaron dos sistemas; superficial y subsuperficial. Se determinó como objetivo observar la eficiencia de los sistemas implementados.

Para los cubetos del sistema subsuperficial y el cubeto de ensayo se utilizó sustrato con el fin de proporcionar una base fija y algunos compuestos necesarios para que las plantas puedan desarrollarse. En la siguiente tabla se presenta la estratificación de los cubetos experimentales.

Tabla 4: Estratificación de los cubetos experimentales en sistema subsuperficial

Cubeto N°	Conformación de sustrato	Descripción
1-2-3	90% agua residual	Estos cubetos experimentales están desarrollados para el sistema superficial de flujo vertical.
4-5-6	15% Piedra bola, 10% piedra grava y 15% de tierra.	En el sistema subsuperficial de flujo vertical, las plantas necesitan un sustrato para poder sostener sus raíces.
7	15% Piedra bola, 10% piedra grava y 15% de tierra.	Cubeto experimental denominado de “ensayo” o “blanco”, su objetivo es comparar la eficiencia de las plantas en los tratamientos del agua residual.

3.2. Plan de Muestreo

El plan de muestreo desarrollado en el trabajo de investigación nos permite realizar la caracterización del agua residual, así también desarrollar los

parámetros que se deben analizar, adicionalmente se realizó los muestreos de los efluentes de la extractora PEXA, que se encuentra ubicada en “La Unión”.

3.2.1. Muestreo

Para el muestreo en el experimento se consideró que debe ser representativo, es decir, realizar varias réplicas de las muestras en el transcurso de la investigación. El muestreo tiene como fin presentar cual es la calidad del agua del caudal y así evitar que el resultado no solamente sea la calidad del agua en un determinado momento.

Se debe tomar en consideración algunas medidas antes del muestreo con el fin de garantizar el resultado, estos son:

- Definir los parámetros de análisis.
- Determinar el tipo de recipientes, y los conservantes (en caso de ser necesarios).
- Se debe etiquetar las muestras, con la siguiente información:
- El número correspondiente de la muestra.
- La fecha de recolección.
- Identificación de la muestra con nombre de la persona que realizó la recolección.

3.2.2. Técnica de recolección

En la recolección de las muestras se debe seguir un procedimiento adecuado para evitar cualquier alteración y se pueda garantizar los resultados del análisis. El procedimiento se puede resumir a continuación:

- Se debe enjuagar dos veces el, o los recipientes con la misma agua residual que se va a utilizar con el fin de retirar cualquier sedimento.

- La muestra debe ser tomada en el desagüe de todos los humedales construidos.

Para la presente investigación se solicitó de parte de los laboratorios seleccionados un volumen total de tres litros de agua residual como muestra. Para el análisis biológico se necesitó un recipiente oscuro o de color ámbar para evitar la luz solar.

3.2.3. Caracterización del Agua Residual

Los efluentes son el principal problemas en las industrias de extracción de Palma Aceitera, por esta razón se necesita realizar una caracterización adecuada para implementar los humedales artificiales.

Se escogieron los siguientes parámetros debido a que los efluentes de las industrias de extracción de palma aceitera se caracterizan por los altos niveles de carga orgánica, concordando con lo estudiado por (ANCUPA, 2010) indicando que los efluentes provenientes de dichas industrias se caracterizan por sus altos niveles en DQO, nitrógeno y fósforo total. Los parámetros a analizar se encuentran en la siguiente tabla.

Tabla 5: Parámetros químicos para la caracterización del agua residual

PARÁMETROS	UNIDAD	MÉTODO
Sustancias solubles en Hexano (Aceites y Grasas)	mg/l	MAM-40 / APHA5520 B MODIFICADO
DBO ₅	mgO ₂ /l	MAM-38/ APHA5210 B MODIFICADO
DQO	mgO ₂ /l	MAM-23 ^a / COLORIMETRICO MERCKMODIFICADO
Fósforo Total	mg/l	MAM-17/APHA 4500-P B y/o C Y E MODIFICADO
Nitrógeno Total	mg/l	MAM-45/COLORIMETRICO MERCK

3.3. Métodos y medición de parámetros

A continuación se presenta todos los métodos utilizados y a su vez como se realizaron las mediciones de los parámetros en el desarrollo del experimento.

3.3.1. Demanda Química de Oxígeno

Para este parámetro se utilizó el equipo de laboratorio NANOCOLOR® 500 D, a su vez se utilizaron los tubos de test que corresponden al análisis de DQO 1500. Este equipo es un fotómetro digital y trabaja detectando los asen de luz que atraviesan al tubo test utilizado, mantiene una longitud de onda determinada de 620nm, el equipo recepta los asen de luz con un detector y mide el valor de DQO (NANOCOLOR, 2011).

3.3.2. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)

La medición de este parámetro fue realizado en los laboratorios de Química Ambiental de la Universidad Central del Ecuador, con el método de MAM-38 / COLORIMETRICO MERCKMODIFICADO. Este método consiste en colocar 500 ml de agua aireada en un balón, posteriormente añadir 50 ml de la muestra de agua, 1 ml de inóculo, 1 ml de MgCl₂, 1 ml de FeCl₃, 1 ml de CaCl₂ y 2 ml de solución buffer. A continuación se debe aforar con el agua aireada y se debe homogenizar la solución, luego se debe poner 1 ml de MnSO₄ y 1 ml del reactivo álcali en una botella de DBO, la otra botella se debe guardar bajo la oscuridad (Fernández y Curt, 2008).

3.3.3. Nitrógeno Total

El en caso de la medición del nitrógeno total, se empleó el equipo de laboratorio NANOCOLOR® 500 D. Para determinar el valor de nitrógeno en agua se utilizó el kit de test 0-88 que corresponde a TN_b 220, los pasos a seguir para el análisis de este parámetro se encuentra en el manual de métodos del laboratorio ambiental perteneciente a la Universidad de las Américas.

3.3.4. Fósforo Total

En cuanto se refiere a la determinación de fósforo total, se desarrollaron las mediciones en el laboratorio ambiental de la Universidad de las Américas con el equipo de medición NANOCOLOR® 500 D, para este método se utilizó el kit de test 0-76.

El test se encuentra en los rangos de 0.20 a 5.00 mg/l de fósforo, y el procedimiento pertenece al manual de métodos del laboratorio ambiental perteneciente a la Universidad de las Américas.

3.3.5. Turbidez

Para el parámetro de Turbidez se realizaron los análisis en el equipo de laboratorio Hanna Instruments HI88713 Turbidímetro ISO, este equipo se encuentra cumpliendo los requisitos para la normativa internacional ISO 7027 Determinación de Turbidez. Se calibro al equipo en el rango de 0 a 4000 NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez). El procedimiento de medición del equipo se basa en la fotocélula de silicio que sirve como detector, este emplea la cantidad de luz que se dispersa y es absorbida; como relación se obtiene que a mayor nivel de turbidez mayor es la luz dispersa y disminuye la cantidad de luz que absorbe el equipo (Hanna Instruments, 2012).

Tabla 6: Rango de Medición para el equipo Hanna Instruments HI88713.

Adaptado de Hanna Instruments (2012).

Rango	Unidad	Modo	Precisión
0 – 1000	FNU	FNU	± 2% de lectura + luz parásita (A)
10 – 4000	FAU	FAU	± 10% de lectura
0 – 4000	NTU	NTU ratio	± 2% de lectura + luz parásita (A)
0 – 980	EBC	NTU ratio	± 5% de lectura por encima de 1000 NTU
0 – 1000	NTU	NTU non-ratio	± 2% de lectura
0 – 245	EBC	NTU non-ratio	± 2% de lectura

3.3.6. Conductividad eléctrica y pH

Para los parámetros físicos de conductividad eléctrica y pH se utilizó el mismo equipo de laboratorio, este equipo en particular es integrado para analizar varios parámetros. El equipo se llama Multi-parámetro de sobremesa HI 2550 pH/ORP/*C/EC/TDS/NaCl, se denomina así porque tiene dos electrodos que pueden realizar mediciones de los siguientes parámetros; El pH y la temperatura son dos parámetros que se miden con el mismo electrodo, este se sumerge, se tiene que esperar a que se estabilice y determina el valor de la muestra (Hanna Instruments, 2009).

En lo que respecta a la conductividad eléctrica, este electrodo necesita ser sumergido completamente bajo la muestra de agua, el canal cuenta con agujeros para determinar el parámetro al igual que el anterior electrodo se necesita esperar la estabilización del equipo.

3.4. Diseño experimental

Se estableció el diseño experimental según el sistema empleado, el Diseño experimental Aleatorio (DCA) fue escogido para este experimento. Este diseño es implementado cuando se quiere comparar dos o más tratamientos y las variables que se consideran en el diseño es el error aleatorio y la cantidad de tratamientos (De la vara y Gutiérrez, 2008).

Explicando con el experimento realizado, los cubetos experimentales deben ser comparados mediante los modelos estadísticos con el fin de determinar el tratamiento con mayor eficiencia. Debido a lo señalado anteriormente se implementó 1 cubeto experimental como blanco, 3 cubetos superficiales y 3 cubetos subsuperficiales.

3.5. Diseño de las unidades experimentales

Para el desarrollo del trabajo de investigación se determinaron previamente la caracterización inicial, caudales del agua y parámetros con el fin de diseñar y construir adecuadamente los humedales artificiales. El modelo estadístico K-C* se utilizó en el fin de cumplir el objetivo.

3.5.1. Modelo K-C*

Según Ari M. Ferro y otros (2002), el modelo K-C* es un modelo no mecanístico que se utiliza específicamente para diseñar los humedales artificiales, el principal objetivo se encuentra en el cálculo para determinar el caudal ideal que debe ser ingresado al humedal artificial, los datos que necesita para calcular es la concentración de contaminación del agua residual, también el modelo K-C* estipula el grado de contaminación del efluente del humedal y así se puede cumplir con la legislación ambiental aplicable (TULSMA). Es importante recalcar que el modelo solo permite desarrollarse con los parámetros siguientes, por lo tanto, para los cálculos del trabajo de investigación se tomaron en cuenta estos tres parámetros:

- DQO
- Nitrógeno Total
- Fósforo Total

Para realizar el cálculo del caudal ideal a los humedales artificiales se utilizó la siguiente ecuación:

$$\frac{C_{out} - C^*}{C_{in} - C^*} = \exp(-K_T * t)$$

(Ecuación 1)

Dónde:

C_{out} = Concentración del contaminante en el efluente (mg l^{-1})

C_{in} = Concentración del contaminante en el efluente (mg l^{-1})

C^* = Concentración residual o de fondo

t = Tiempo de residencia hidráulica (d)

K_T = Constante de reacción de primer orden en base volumétrica, depende del contaminante (d^{-1})

Dado que:

$$t = \frac{V}{Q}$$

(Ecuación 2)

Dónde:

t = Tiempo de residencia hidráulica (d)

V = Volumen total del humedal (m^3)

Q = Caudal ($\text{m}^3 \text{d}^{-1}$)

Entonces:

$$\frac{C_{out} - C^*}{C_{in} - C^*} = \exp\left(-K_T \frac{V}{Q}\right)$$

(Ecuación 3)

$$Q = \frac{-K_T * V}{\ln\left(\frac{C_{out} - C^*}{C_{in} - C^*}\right)}$$

(Ecuación 4)

Existe un diseño para la remoción de DBO₅, este modelo también sirve para la eliminación del DQO, el modelo toma en consideración varios aspectos y agrega el parámetro de temperatura como variable K_T , expresado de la siguiente forma:

$$\frac{C_{out}}{C_{in}} = e^{-K_T}$$

(Ecuación 5)

$$K_T = K_{20} * (1,06)^{(T-20)}$$

$$K = 0,55 d^{-1}$$

(Ecuación 6)

Dónde:

C_{out} = Concentración del contaminante en el efluente ($mg l^{-1}$)

C_{in} = Concentración del contaminante en el efluente ($mg l^{-1}$)

K_T = Constante de primer orden, dependiente de la temperatura (d^{-1})

T = Temperatura del agua (C°)

3.5.2. Instalación del sistema de tuberías

La instalación de las tuberías se hizo de acuerdo a la bibliografía citada, que consta de instalar en los humedales subsuperficiales el sistema denominado “espina de pescado”. Las dimensiones de las tuberías corresponden a 1” de diámetro y tubería de PVC, también se necesitaron accesorios como codos, tapones, cruces, tees, etc. La instalación y las dimensiones de cada sistema se muestran en las siguientes figuras

Las figuras ,5,6 y 7 muestran el diseño y el dimensionamiento de las unidades del sistema superficial

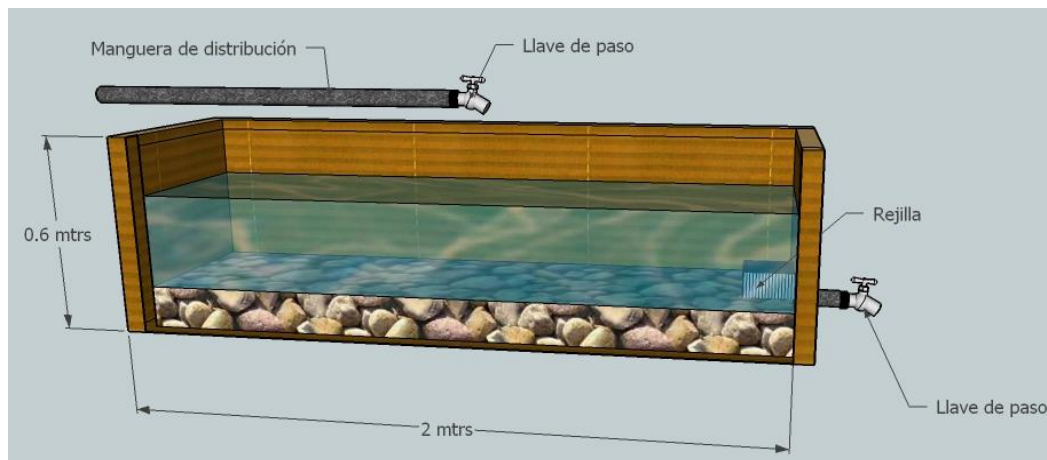


Figura 5: Vista lateral del sistema superficial

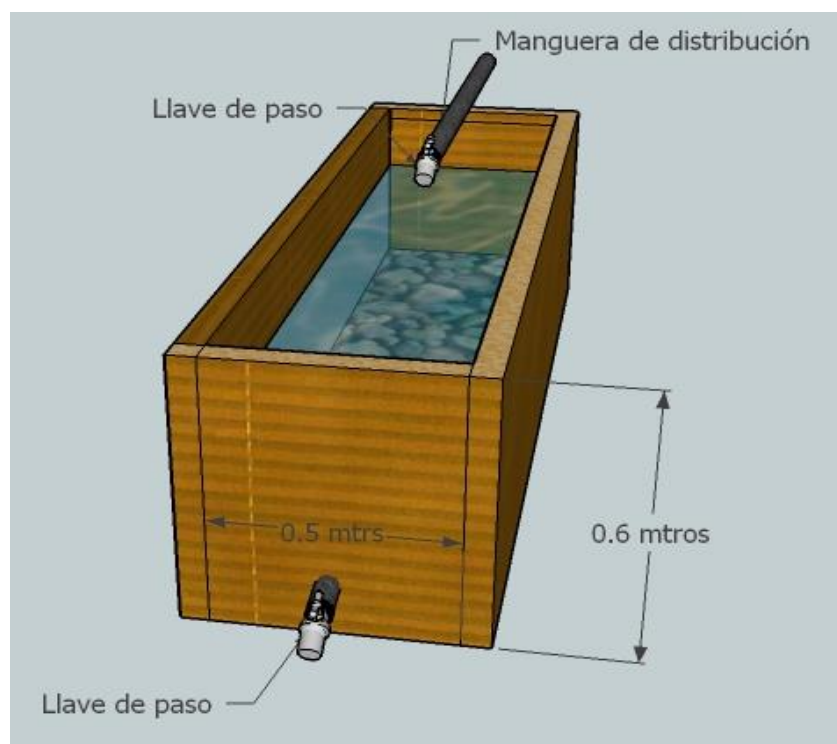


Figura 6: Vista frontal del sistema superficial

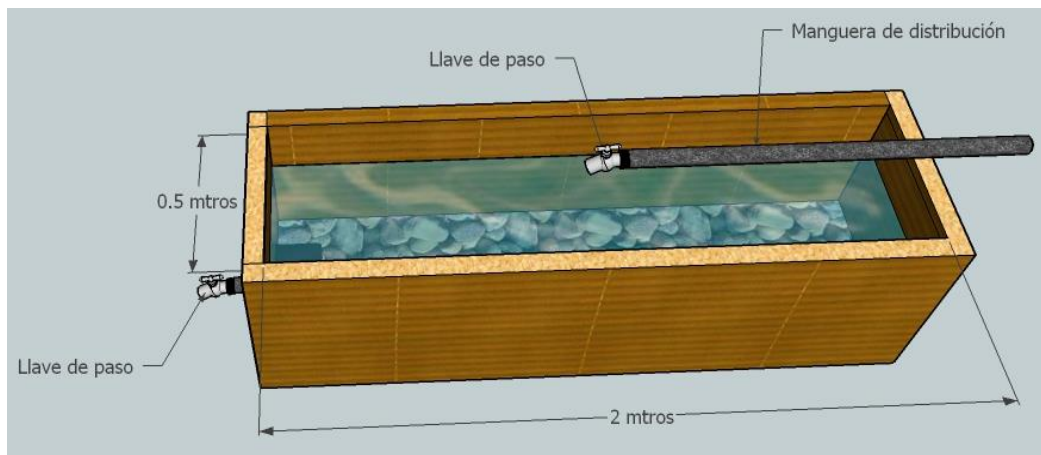


Figura 7: Vista superior del sistema superficial

Las Figuras 8, 9 y 10 muestran el diseño y el dimensionamiento de las unidades del sistema subsuperficial

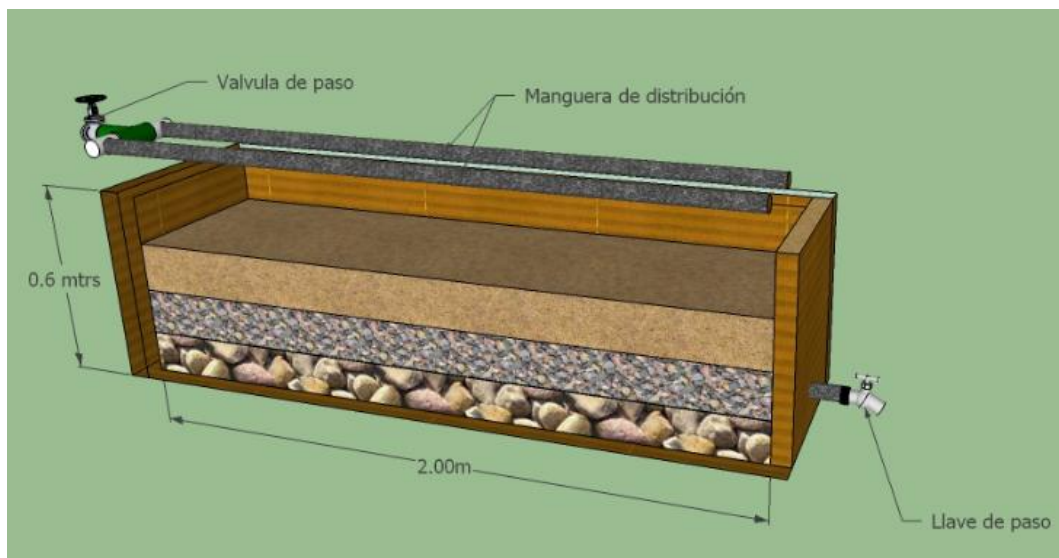


Figura 8: Vista lateral del sistema subsuperficial

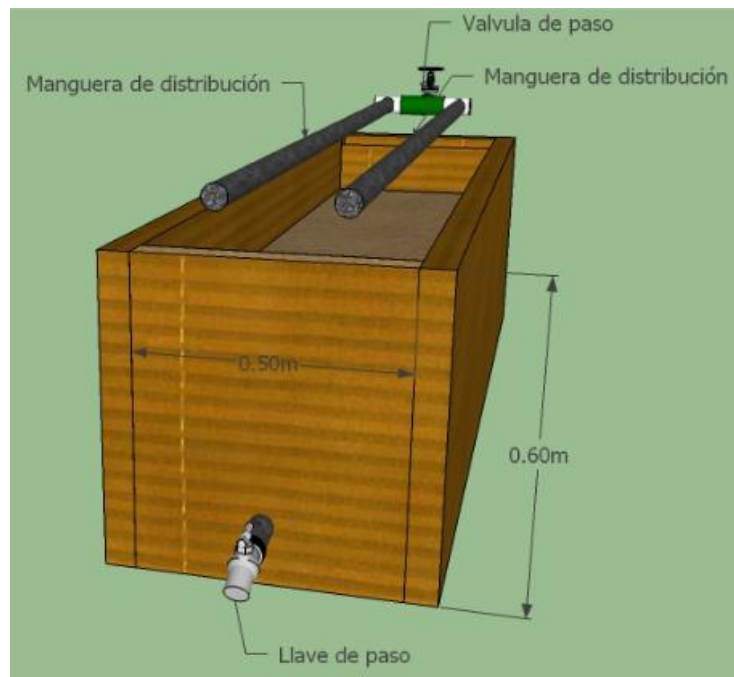


Figura 9: Vista frontal del sistema subsuperficial

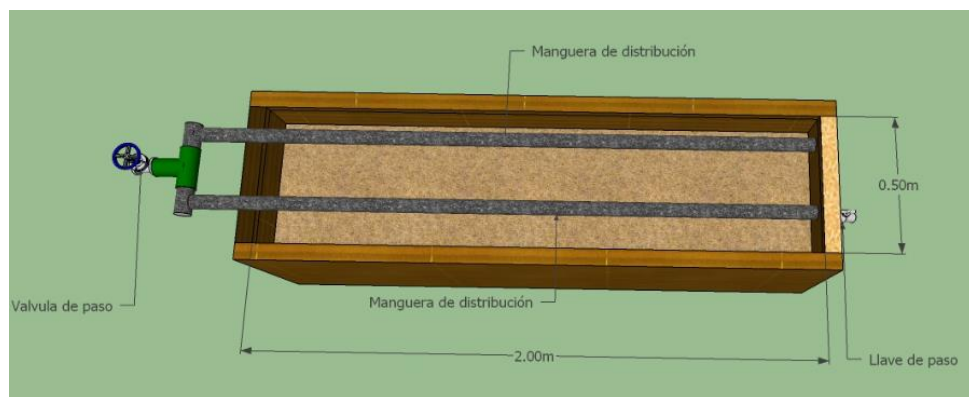


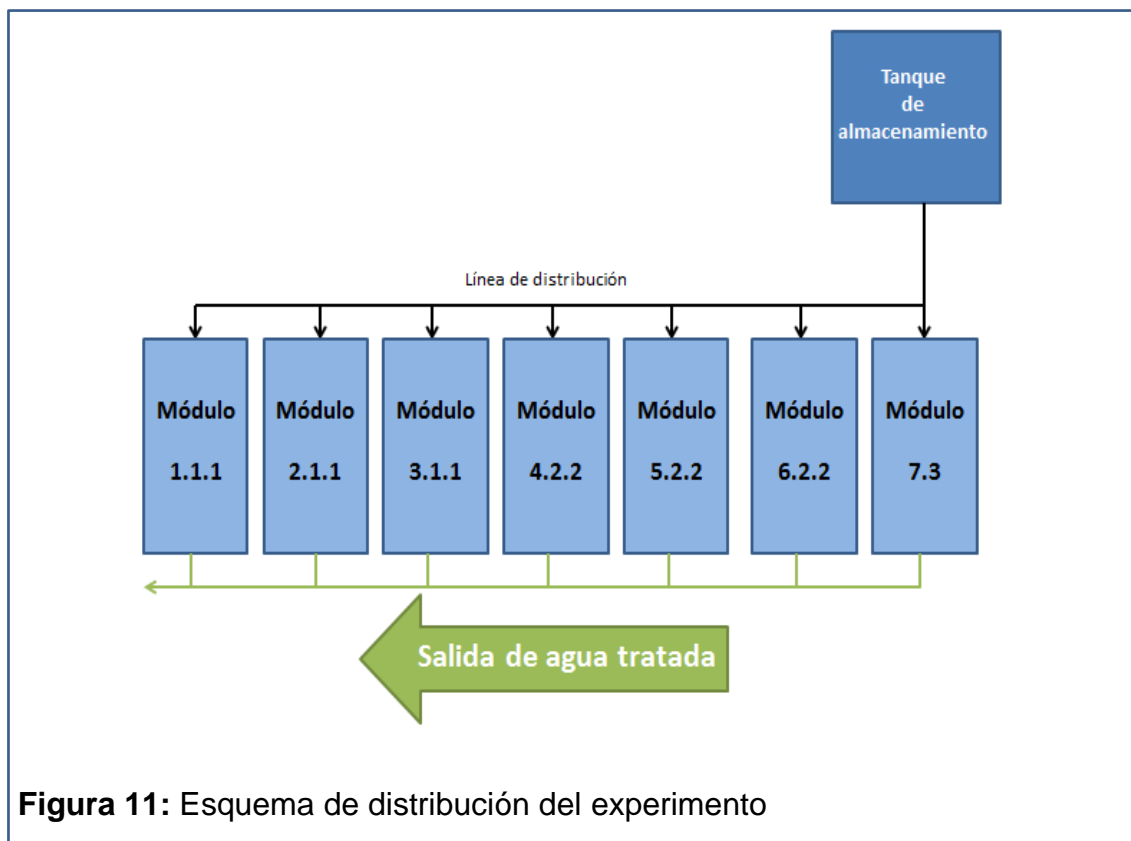
Figura 10: Vista superior del sistema subsuperficial

3.5.3. Ensayo experimental

Para el desarrollo del experimento se consideró un periodo de 14 semanas, este periodo incluye las 2 semanas de adaptación de las plantas; posterior al periodo de adaptación se inició la recolección de datos durante las 12 semanas restantes, así también se realizó un chequeo permanente a las desarrollo de las plantas.

Consistió en instalar siete unidades experimentales, las siete unidades se dividen en tres módulos, Cada módulo está constituido por un sistema diferente, el último módulo contiene la unidad de ensayo, se realizó esta división con el fin de comparar y obtener la eficiencia de cada sistema desarrollado.

Las unidades experimentales fueron distribuidas de la siguiente forma:



Cada módulo fue nombrado de acuerdo a la especie sembrada y al sistema que se implementó en cada unidad experimental, esto con el fin de evaluar la

remoción de contaminación en los sistemas. Están distribuidos de la siguiente manera. 1.1.1, 2.1.1, 3.1.1 y 4.2.2, 5.2.2, 6.2.2, 7.3. El primer número hace referencia al número de experimento del sistema.

El segundo número hace referencia al sistema implementado en cada unidad experimental del sistema, por lo tanto:

1. Humedal artificial superficial de flujo vertical.
2. Humedal artificial subsuperficial de flujo vertical.
3. Testigo.

El tercer número hace referencia a la especie de planta sembrada en cada cubeto, por lo tanto:

1. *Eichhornia Crassipes*
2. *Eichhornia Azurea*

3.6. Construcción de la unidad experimental

En la construcción de cada unidad experimental se utilizó los siguientes materiales:

- 15 tablones de madera para cada unidad.
- Plástico doble cara.
- Dos llaves de paso.
- Grava media y fina.
- Piedra bola.
- 4m de manguera de riego.

Para la construcción de las unidades experimentales se utilizaron los materiales ya nombrados, estos fueron colocados en la zona indicada y se añadió tierra en el suelo para mantener el 1% de inclinación que indican los parámetros de construcción de humedales artificiales, adicionalmente las unidades fueron impermeabilizadas con plástico doble cara de forma que se eviten posibles fugas de agua.

Con las especificaciones ya nombradas se construyeron las unidades de la siguiente forma.

- Obtención de volúmenes

Las unidades construidas se encuentran con las siguientes dimensiones.

Altura	0.60 metros
Ancho	0.50 metros
Base	2 metros

Para el cálculo del volumen se utilizó la siguiente fórmula:

$$V = Al * An * Ba$$

$$V = 0.60 m^3$$

(Ecuación 7)

Dónde:

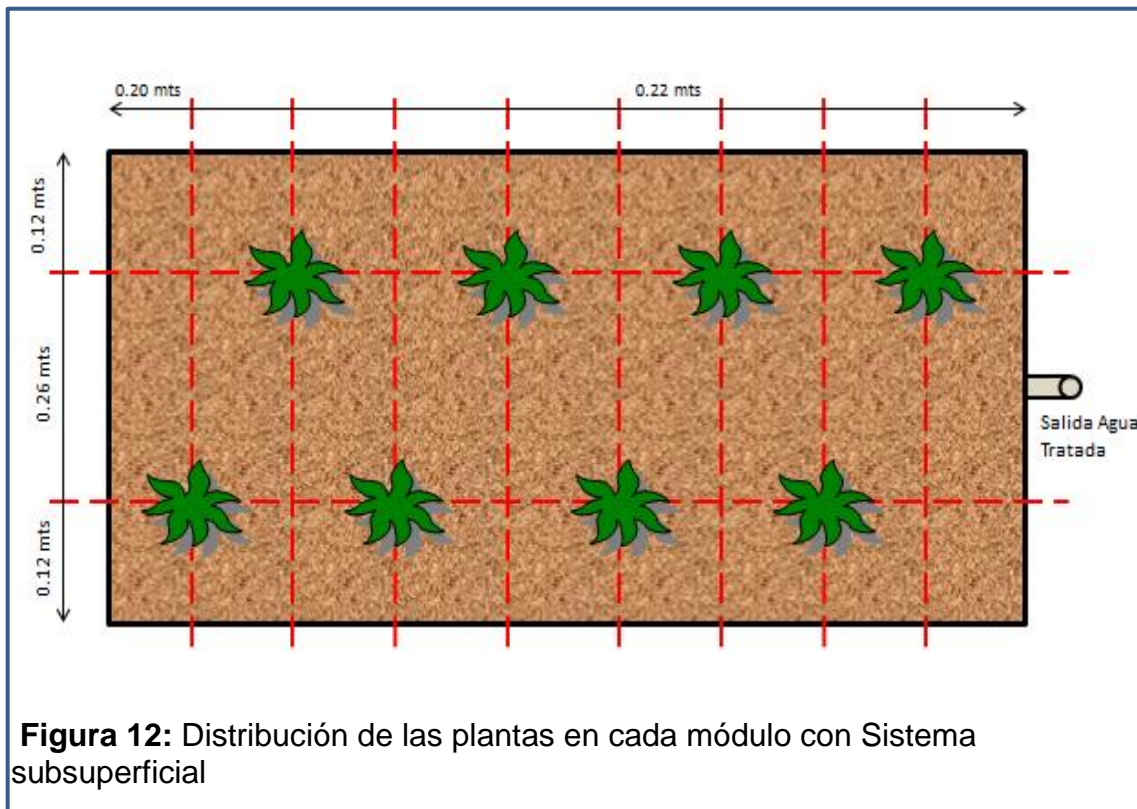
V = Volumen

Al = Altura

An = Ancho

Ba = Base

Para determinar la colocación y la zona de siembra de las plantas se consideró el margen de seguridad en los bordes de las unidades experimentales, por lo tanto, el área para sembrar las plantas fue de 0,76 m². Es importante recalcar que se determinó el espacio necesario para que las plantas no se ahoguen y que sus raíces puedan desarrollarse de manera adecuada



3.7. Especies de plantas a estudiar

En el sistema de humedales se implementaron dos tipos de especies, estas especies fueron escogidas por su facilidad de crecimiento en zonas donde se encuentran operando las industrias de extracción de aceite de palma. A continuación se nombran las especies de plantas sembradas:

1. *Eichhornia Crassipes*
2. *Eichhornia Azurea*

- ***Eichhornia crassipes***

Tabla 7: Clasificación taxonómica de la especie. Adaptado de López, (2012).

Clasificación Científica	
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Orden	Commelinales
Familia	Pontederiaceae
Genero	<i>Eichhornia</i>
Especie	<i>E. Crassipes</i>

Esta especie es una planta flotante en agua, que sus raíces se encuentran sumergidas, está constituida de hojas y flores aéreas que pertenecen a la familia Pontederiaceas. Este tipo de especie carece de tallo aparente, pero es por la abundante cantidad de hojas que permite que la planta flote en agua, los rosetones de hojas mantienen una superficie esponjosa que es inflada y llena de aire (Carrion, 2009).



Figura 13: *Eichhornia crassipes* (Lechuguin)

Las raíces son de color negras con extremidades blancas, este tipo de plantas requieren gran iluminación solar, esto permite que las plantas se mantengan realizando sus ciclos vitales normalmente y desarrollen la flor. La especie se reproduce mediante la división de los rizomas, por su fácil reproducción sexual y vegetativa esta especie es considerada entre las 100 especies más invasoras del mundo (UICN, 2010)

Tabla 8: Tabla comparativa de la especie *Eichhornia Crassipes*. Adaptado de Obando, (2006).

Ventajas	Desventajas
El costo es menor a otro tipo de planta en tratamiento de A.R.	Gran extensión de terreno para el tratamiento de A.R con lechuguin.
Bajos niveles de mantenimiento y operación.	El rendimiento de las plantas puede variar debido a las condiciones ambientales.
Proporcionan un hábitat para microorganismos.	Pueden transformarse en una especie invasora si no se controla.
Soportan variaciones en el caudal.	Para que la planta sobreviva se necesita un mínimo de agua.
Permiten un beneficio en la depuración de A.R.	En la presencia de pesticidas o sustancias toxicas las plantas pueden no desarrollarse adecuadamente.

- ***Eichhornia Azurea***

Tabla 9: Clasificación taxonómica de la especie. Adaptado de López, (2012).

Clasificación Científica	
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Orden	Commelinales
Familia	Pontederiaceae
Genero	<i>Eichhornia</i>
Especie	<i>E. Azurea</i>

Este tipo de especie se caracteriza por ser una planta acuática y también puede estar sembrada en sustrato, es de tipo perenne, con tallos con mayor longitud que las otras especies de su familia. Tienen hojas caulinares y dísticas, esta especie presenta inflorescencia terminal, se desarrolla en zonas tropicales y climas húmedos (Tolosa, 2012).

En el estudio realizado por Bragguet (2010) explica que hay una relación cercana entre las especies Azurea y Crassipes, están dos especies comparten la misma manera de dispersión de semillas.



Figura 14: *Eichhornia Azurea*

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para la presentación y análisis de resultados se utilizó el software de computadora MINITAB 17, con un diseño experimental Completamente Aleatorio (DCA) y la técnica central (ANOVA). El diseño experimental fue escogido ya que permite cualquier cantidad de tratamientos y réplicas y a su vez es desarrollado cuando se tiene experimentos similares; y respectivamente la técnica (ANOVA) permite un análisis de la varianza de los datos experimentales.

Esta técnica estadística tiene como objetivo comprobar la hipótesis de igualdad que existen en los tratamientos con respecto a la media que corresponde a cada variable. Para desarrollar el ANOVA es necesario saber el número de muestras que son necesarias para el experimento, se utilizó la ecuación obtener el dato. Para determinar el valor de muestras necesarias para el trabajo experimental se estimó una desviación estándar equivalente a 0,5. Un nivel de confianza de 1,96 este valor corresponde a un 95% de confiabilidad, un error estimado del 12%, en consideración que el periodo de experimentación se realizó en 60 días.

$$n = \frac{N\sigma^2 Z^2_{\alpha/2}}{(N-1)e^2 + \sigma^2 Z^2_{\alpha/2}}$$

(Ecuación 8)

Dónde:

- n = tamaño de muestra
- N = tamaño de la población
- σ^2 = Varianza (σ = Desviación estándar)
- e = Error estándar
- $Z^2_{\alpha/2}$ = Nivel de confianza

Se desarrolló la ecuación 9 y se obtuvo un valor de 28 muestras por cada unidad experimental que se instalaron, con el valor obtenido se realizó la prueba estadística ANOVA para verificar la hipótesis que tiene la técnica.

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k = \mu$$

(Ecuación 9)

$$H_A : \mu_i \neq \mu_j \text{ para algún } i \neq j$$

Desarrollando la ecuación en el experimento, queda de la siguiente manera.

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_4 = \tau_5 = \tau_6 = \tau_7 = 0$$

(Ecuación 10)

$$H_A : \tau_i \neq 0 \text{ para algún } i = 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7$$

Para demostrar la hipótesis del ANOVA se utilizó Minitab 17, y se programó la función (ANOVA) varianza de un solo factor, y se obtuvo lo siguiente:

Tabla 10: Desarrollo de la técnica ANOVA para la turbidez de las siete unidades.

Fuente	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados Ajustados	de Cuadrados Medios Ajustados	Valor F_0	Valor Crítico F
Tipo de Tratamiento	6	14642.6706	2440.4451	5.21	2.249
Error	154	72130.4449	468.379		
Total	160	86773.1155			

Cuando analizamos la tabla 10 se puede observar que el valor F_0 es mayor al valor crítico F es decir que la hipótesis planteada como nula se rechaza, y por lo tanto al menos uno de los tratamientos del experimento tiene efectos diferentes. Se comprueba que la remoción de turbidez en las unidades son significativamente diferentes.

De igual manera se realizó el análisis de varianza para la conductividad, con el fin de comprobar que las unidades experimentales son tratamientos con efectos significativos.

Tabla 11: Desarrollo de la técnica ANOVA para la conductividad de las siete unidades experimentales.

Fuente	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados Ajustados	Cuadrados Medios Ajustados	Valor F_0	Valor Crítico F
Tipo de Tratamiento	6	6025396.84	1004232.81	142.4097	2.1579
Error	154	1085964.26	7051.72		
Total	160	7111361.10			

Al igual que el ANOVA para turbidez el F_0 es mayor al valor crítico F ($F_0 > F$) y por lo tanto se rechaza la hipótesis nula y se confirma que los tratamientos son significativamente diferentes.

4.1. Análisis comparativo entre rangos múltiples

Cuando se rechaza la hipótesis nula en el desarrollo experimental del ANOVA es necesario realizar las pruebas de rango múltiples, esto nos permite investigar cuales son los tratamientos diferentes en el experimento o los que provocan la diferencia.

Para desarrollar los métodos de comparaciones múltiples es necesario determinar el número de tratamientos. Se tiene un total de k ($\frac{k-1}{2}$) pares de medias que se comparan entre sí, por lo tanto, en el experimento se obtendría

como resultado $7\left(\frac{7-1}{2}\right)$, obteniendo como resultado un total de 21 posibles pares de media.

Pruebas

Ho: $\mu_1 = \mu_2$ / Ha: $\mu_1 \neq \mu_2$	Ho: $\mu_2 = \mu_4$ / Ha: $\mu_2 \neq \mu_4$	Ho: $\mu_3 = \mu_7$ / Ha: $\mu_3 \neq \mu_7$
Ho: $\mu_1 = \mu_3$ / Ha: $\mu_1 \neq \mu_3$	Ho: $\mu_2 = \mu_5$ / Ha: $\mu_2 \neq \mu_5$	Ho: $\mu_4 = \mu_5$ / Ha: $\mu_4 \neq \mu_5$
Ho: $\mu_1 = \mu_4$ / Ha: $\mu_1 \neq \mu_4$	Ho: $\mu_2 = \mu_6$ / Ha: $\mu_2 \neq \mu_6$	Ho: $\mu_4 = \mu_6$ / Ha: $\mu_4 \neq \mu_6$
Ho: $\mu_1 = \mu_5$ / Ha: $\mu_1 \neq \mu_5$	Ho: $\mu_2 = \mu_7$ / Ha: $\mu_2 \neq \mu_7$	Ho: $\mu_4 = \mu_7$ / Ha: $\mu_4 \neq \mu_7$
Ho: $\mu_1 = \mu_6$ / Ha: $\mu_1 \neq \mu_6$	Ho: $\mu_3 = \mu_4$ / Ha: $\mu_3 \neq \mu_4$	Ho: $\mu_5 = \mu_6$ / Ha: $\mu_5 \neq \mu_6$
Ho: $\mu_1 = \mu_7$ / Ha: $\mu_1 \neq \mu_7$	Ho: $\mu_3 = \mu_5$ / Ha: $\mu_3 \neq \mu_5$	Ho: $\mu_5 = \mu_7$ / Ha: $\mu_5 \neq \mu_7$
Ho: $\mu_2 = \mu_3$ / Ha: $\mu_2 \neq \mu_3$	Ho: $\mu_3 = \mu_6$ / Ha: $\mu_3 \neq \mu_6$	Ho: $\mu_6 = \mu_7$ / Ha: $\mu_6 \neq \mu_7$

El método *LSD* (diferencia mínima significativa) se desarrolla con un estadístico de prueba y su fórmula es:

$$|\bar{Y}_i - \bar{Y}_j| > t_{\frac{\alpha}{2}, N-k} \sqrt{CM_E \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)} = LSD$$

(Ecuación 11)

$$LSD = 48.5349468$$

Donde

\bar{Y}_i = media muestral de i - tratamientos

\bar{Y}_j = media muestral de j - tratamientos

$t_{\frac{\alpha}{2}, N-k}$ = valor de la distribución de T de Student

$N - k$ = grados de libertad que corresponden al error

CM_E = el cuadrado medio del error

El valor obtenido como LSD es comparado con las diferencias de las medias muestrales de los tratamientos para considerar si son significativamente diferentes.

Tabla 12: Resultados del método LSD para el parámetro de turbidez

Diferencia poblacional	Media muestral		valor LSD	Resultado
$\mu_1 - \mu_2$	1.1122	<	12.2452	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_1 - \mu_3$	2.1235	<	12.2452	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_1 - \mu_4$	9.5613	<	12.2452	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_1 - \mu_5$	11.5217	<	12.2452	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_1 - \mu_6$	8.8639	<	12.2452	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_1 - \mu_7$	28.1817	>	12.2452	SIGNIFICATIVA
$\mu_2 - \mu_3$	3.2357	<	12.2452	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_2 - \mu_4$	8.4491	<	12.2452	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_2 - \mu_5$	10.4096	<	12.2452	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_2 - \mu_6$	7.7517	<	12.2452	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_2 - \mu_7$	27.0696	>	12.2452	SIGNIFICATIVA
$\mu_3 - \mu_4$	11.6848	<	12.2452	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_3 - \mu_5$	13.6452	>	12.2452	SIGNIFICATIVA
$\mu_3 - \mu_6$	10.9874	<	12.2452	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_3 - \mu_7$	30.3052	>	12.2452	SIGNIFICATIVA
$\mu_4 - \mu_5$	1.9604	<	12.2452	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_4 - \mu_6$	0.6974	<	12.2452	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_4 - \mu_7$	18.6204	>	12.2452	SIGNIFICATIVA
$\mu_5 - \mu_6$	2.6578	<	12.2452	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_5 - \mu_7$	16.6600	>	12.2452	SIGNIFICATIVA
$\mu_6 - \mu_7$	19.3178	>	12.2452	SIGNIFICATIVA

Tabla 13: Resultados del método LSD para el parámetro de conductividad

Diferencia poblacional	Media muestral		Valor LSD	Resultado
$\mu_1 - \mu_2$	5.5913	>	48.5349	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_1 - \mu_3$	5.0870	>	48.5349	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_1 - \mu_4$	357.6304	>	48.5349	SIGNIFICATIVA
$\mu_1 - \mu_5$	372.8478	>	48.5349	SIGNIFICATIVA
$\mu_1 - \mu_6$	439.0783	>	48.5349	SIGNIFICATIVA
$\mu_1 - \mu_7$	467.4348	>	48.5349	SIGNIFICATIVA
$\mu_2 - \mu_3$	0.5043	>	48.5349	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_2 - \mu_4$	352.0391	>	48.5349	SIGNIFICATIVA
$\mu_2 - \mu_5$	367.2565	>	48.5349	SIGNIFICATIVA
$\mu_2 - \mu_6$	433.4870	>	48.5349	SIGNIFICATIVA
$\mu_2 - \mu_7$	461.8435	>	48.5349	SIGNIFICATIVA
$\mu_3 - \mu_4$	352.5435	>	48.5349	SIGNIFICATIVA
$\mu_3 - \mu_5$	367.7609	>	48.5349	SIGNIFICATIVA
$\mu_3 - \mu_6$	433.9913	>	48.5349	SIGNIFICATIVA
$\mu_3 - \mu_7$	462.3478	>	48.5349	SIGNIFICATIVA
$\mu_4 - \mu_5$	15.2174	>	48.5349	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_4 - \mu_6$	81.4478	>	48.5349	SIGNIFICATIVA
$\mu_4 - \mu_7$	109.8043	>	48.5349	SIGNIFICATIVA
$\mu_5 - \mu_6$	66.2304	>	48.5349	SIGNIFICATIVA
$\mu_5 - \mu_7$	94.5870	>	48.5349	SIGNIFICATIVA
$\mu_6 - \mu_7$	28.3565	>	48.5349	NO SIGNIFICATIVA

A su vez también se aplicó el método de tukey, a comparación del método de LSD éste trabaja con un error α que se encuentra en un rango cercano al declarado por el experimento, este método tiene como fin comparar las medias de los tratamientos con el resultado que se obtenga de la siguiente formula:

$$T_{\alpha} = q_{\alpha}(k, N - k) \sqrt{CME/n_i} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Dónde:

CME = cuadrado medio del error

n= número de observaciones por tratamiento

k= número de tratamientos

N-k = grados de libertad para el error

q_{α} = puntos porcentuales de la distribución del rango estudentizado

$$T_{\alpha} = 72.14075855$$

El valor obtenido de la ecuación 12 se compara con las diferencias de las medias muestrales de los tratamientos y se considera si son o no significativos.

Tabla 14: Resultados del método Tukey para el parámetro de turbidez

Diferencia poblacional	Diferencia muestral		Valor Turkey	Resultado
$\mu_1 - \mu_2$	1.1122	<	18.59226253	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_1 - \mu_3$	2.1235	<	18.59226253	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_1 - \mu_4$	9.5613	<	18.59226253	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_1 - \mu_5$	11.5217	<	18.59226253	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_1 - \mu_6$	8.8639	<	18.59226253	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_1 - \mu_7$	28.1817	>	18.59226253	SIGNIFICATIVA
$\mu_2 - \mu_3$	3.2357	<	18.59226253	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_2 - \mu_4$	8.4491	<	18.59226253	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_2 - \mu_5$	10.4096	<	18.59226253	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_2 - \mu_6$	7.7517	<	18.59226253	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_2 - \mu_7$	27.0696	>	18.59226253	SIGNIFICATIVA
$\mu_3 - \mu_4$	11.6848	<	18.59226253	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_3 - \mu_5$	13.6452	<	18.59226253	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_3 - \mu_6$	10.9874	<	18.59226253	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_3 - \mu_7$	30.3052	>	18.59226253	SIGNIFICATIVA
$\mu_4 - \mu_5$	1.9604	<	18.59226253	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_4 - \mu_6$	0.6974	<	18.59226253	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_4 - \mu_7$	18.6204	>	18.59226253	SIGNIFICATIVA
$\mu_5 - \mu_6$	2.6578	<	18.59226253	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_5 - \mu_7$	16.6600	<	18.59226253	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_6 - \mu_7$	19.3178	>	18.59226253	SIGNIFICATIVA

Los resultados presentados en la tabla se muestran a continuación en la figura 15 que fue creada usando el programa Minitab 17.

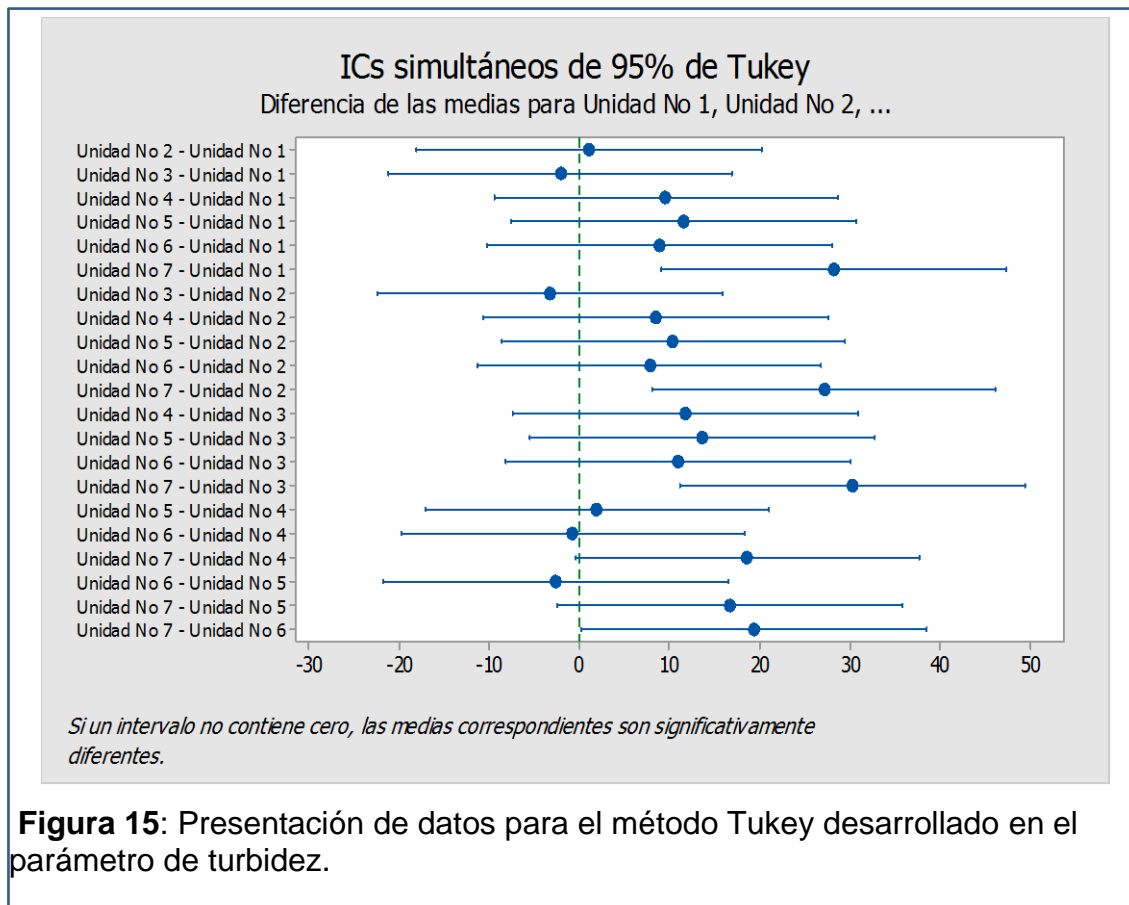


Figura 15: Presentación de datos para el método Tukey desarrollado en el parámetro de turbidez.

En la tabla 14 y figura 15 se presentan los resultados del método tukey para el parámetro de turbidez, se puede observar que la mayoría de comparaciones que se realiza entre las unidades son no significativas, y las significativas se encuentran en la comparación de las unidades No 1, No 2, No 3, No 4 y No 6 con la No 7 que se representa como blanco.

Tabla 15: Resultados del método Tukey para el parámetro de conductividad

Diferencia poblacional	Diferencia muestral		Valor Tukey	Resultado
$\mu_1 - \mu_2$	5.5913	>	72.14075855	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_1 - \mu_3$	5.0870	>	72.14075855	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_1 - \mu_4$	357.6304	>	72.14075855	SIGNIFICATIVA
$\mu_1 - \mu_5$	372.8478	>	72.14075855	SIGNIFICATIVA
$\mu_1 - \mu_6$	439.0783	>	72.14075855	SIGNIFICATIVA
$\mu_1 - \mu_7$	467.4348	>	72.14075855	SIGNIFICATIVA
$\mu_2 - \mu_3$	0.5043	>	72.14075855	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_2 - \mu_4$	352.0391	>	72.14075855	SIGNIFICATIVA
$\mu_2 - \mu_5$	367.2565	>	72.14075855	SIGNIFICATIVA
$\mu_2 - \mu_6$	433.4870	>	72.14075855	SIGNIFICATIVA
$\mu_2 - \mu_7$	461.8435	>	72.14075855	SIGNIFICATIVA
$\mu_3 - \mu_4$	352.5435	>	72.14075855	SIGNIFICATIVA
$\mu_3 - \mu_5$	367.7609	>	72.14075855	SIGNIFICATIVA
$\mu_3 - \mu_6$	433.9913	>	72.14075855	SIGNIFICATIVA
$\mu_3 - \mu_7$	462.3478	>	72.14075855	SIGNIFICATIVA
$\mu_4 - \mu_5$	15.2174	>	72.14075855	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_4 - \mu_6$	81.4478	>	72.14075855	SIGNIFICATIVA
$\mu_4 - \mu_7$	109.8043	>	72.14075855	SIGNIFICATIVA
$\mu_5 - \mu_6$	66.2304	>	72.14075855	NO SIGNIFICATIVA
$\mu_5 - \mu_7$	94.5870	>	72.14075855	SIGNIFICATIVA
$\mu_6 - \mu_7$	28.3565	>	72.14075855	NO SIGNIFICATIVA

El resultado obtenido se expresa en la siguiente figura, para el desarrollo de la siguiente gráfica se utilizó Minitab 17.

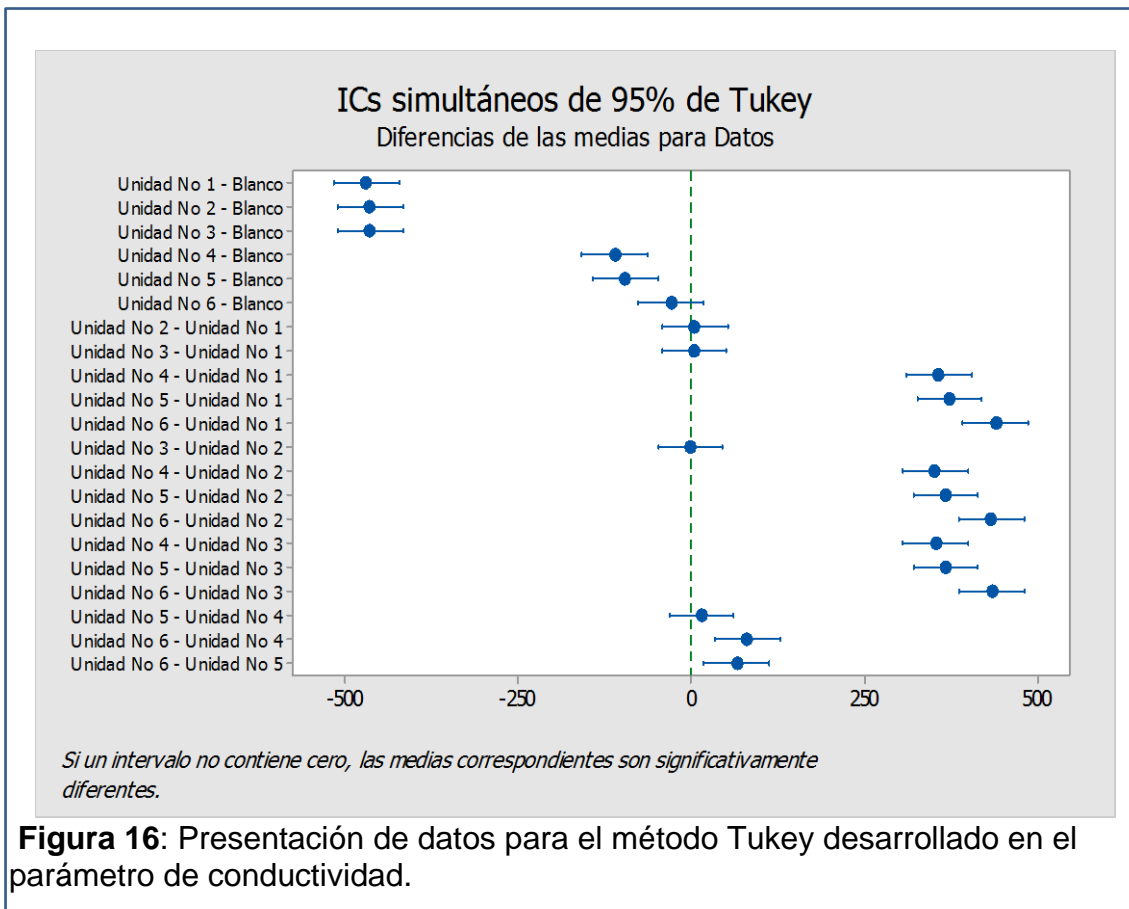


Figura 16: Presentación de datos para el método Tukey desarrollado en el parámetro de conductividad.

En la tabla 15 y figura 16 se presentan los resultados del método de turkey para el parámetro de conductividad, se puede observar que la mayoría de comparaciones son significativas, y las no significativas se encuentran en la comparación de No 2-3, No 4-5, No 5-6 y No 6-7.

En resumen se presenta a continuación en la tabla 16 y 17 las pruebas de rango múltiples realizadas.

Tabla 16: Resumen de resultados para los métodos LSD y Tukey para el parámetro de turbidez

HIPÓTESIS DE PRUEBA	MÉTODO	
	LSD	TURKEY
$H_0: \mu_1 = \mu_2$ / $H_a: \mu_1 \neq \mu_2$	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
$H_0: \mu_1 = \mu_3$ / $H_a: \mu_1 \neq \mu_3$	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
$H_0: \mu_1 = \mu_4$ / $H_a: \mu_1 \neq \mu_4$	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
$H_0: \mu_1 = \mu_5$ / $H_a: \mu_1 \neq \mu_5$	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
$H_0: \mu_1 = \mu_6$ / $H_a: \mu_1 \neq \mu_6$	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
$H_0: \mu_1 = \mu_7$ / $H_a: \mu_1 \neq \mu_7$	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
$H_0: \mu_2 = \mu_3$ / $H_a: \mu_2 \neq \mu_3$	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
$H_0: \mu_2 = \mu_4$ / $H_a: \mu_2 \neq \mu_4$	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
$H_0: \mu_2 = \mu_5$ / $H_a: \mu_2 \neq \mu_5$	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
$H_0: \mu_2 = \mu_6$ / $H_a: \mu_2 \neq \mu_6$	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
$H_0: \mu_2 = \mu_7$ / $H_a: \mu_2 \neq \mu_7$	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
$H_0: \mu_3 = \mu_4$ / $H_a: \mu_3 \neq \mu_4$	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
$H_0: \mu_3 = \mu_5$ / $H_a: \mu_3 \neq \mu_5$	SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
$H_0: \mu_3 = \mu_6$ / $H_a: \mu_3 \neq \mu_6$	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
$H_0: \mu_3 = \mu_7$ / $H_a: \mu_3 \neq \mu_7$	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
$H_0: \mu_4 = \mu_5$ / $H_a: \mu_4 \neq \mu_5$	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
$H_0: \mu_4 = \mu_6$ / $H_a: \mu_4 \neq \mu_6$	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
$H_0: \mu_4 = \mu_7$ / $H_a: \mu_4 \neq \mu_7$	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
$H_0: \mu_5 = \mu_6$ / $H_a: \mu_5 \neq \mu_6$	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
$H_0: \mu_5 = \mu_7$ / $H_a: \mu_5 \neq \mu_7$	SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
$H_0: \mu_6 = \mu_7$ / $H_a: \mu_6 \neq \mu_7$	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA

Tabla 17: Resumen de resultados para los métodos LSD y Tukey para el parámetro de conductividad

PRUEBA	MÉTODO	
	LSD	TURKEY
Ho: $\mu_1 = \mu_2$ / Ha: $\mu_1 \neq \mu_2$	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
Ho: $\mu_1 = \mu_3$ / Ha: $\mu_1 \neq \mu_3$	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
Ho: $\mu_1 = \mu_4$ / Ha: $\mu_1 \neq \mu_4$	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
Ho: $\mu_1 = \mu_5$ / Ha: $\mu_1 \neq \mu_5$	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
Ho: $\mu_1 = \mu_6$ / Ha: $\mu_1 \neq \mu_6$	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
Ho: $\mu_1 = \mu_7$ / Ha: $\mu_1 \neq \mu_7$	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
Ho: $\mu_2 = \mu_3$ / Ha: $\mu_2 \neq \mu_3$	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
Ho: $\mu_2 = \mu_4$ / Ha: $\mu_2 \neq \mu_4$	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
Ho: $\mu_2 = \mu_5$ / Ha: $\mu_2 \neq \mu_5$	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
Ho: $\mu_2 = \mu_6$ / Ha: $\mu_2 \neq \mu_6$	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
Ho: $\mu_2 = \mu_7$ / Ha: $\mu_2 \neq \mu_7$	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
Ho: $\mu_3 = \mu_4$ / Ha: $\mu_3 \neq \mu_4$	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
Ho: $\mu_3 = \mu_5$ / Ha: $\mu_3 \neq \mu_5$	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
Ho: $\mu_3 = \mu_6$ / Ha: $\mu_3 \neq \mu_6$	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
Ho: $\mu_3 = \mu_7$ / Ha: $\mu_3 \neq \mu_7$	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
Ho: $\mu_4 = \mu_5$ / Ha: $\mu_4 \neq \mu_5$	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
Ho: $\mu_4 = \mu_6$ / Ha: $\mu_4 \neq \mu_6$	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
Ho: $\mu_4 = \mu_7$ / Ha: $\mu_4 \neq \mu_7$	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
Ho: $\mu_5 = \mu_6$ / Ha: $\mu_5 \neq \mu_6$	SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA
Ho: $\mu_5 = \mu_7$ / Ha: $\mu_5 \neq \mu_7$	SIGNIFICATIVA	SIGNIFICATIVA
Ho: $\mu_6 = \mu_7$ / Ha: $\mu_6 \neq \mu_7$	NO SIGNIFICATIVA	NO SIGNIFICATIVA

4.2. Caracterización inicial de Agua Residual

Los resultados iniciales se presentan en la tabla 18 que explica los valores obtenidos en el agua residual de una extractora de palma aceitera, los análisis se realizaron en los laboratorios ambientales de la Universidad Central del Ecuador, posteriormente los análisis fueron desarrollados en los laboratorios ambientales de la Universidad de Las Américas.

Tabla 18: Resultados de los parámetros Químicos para el agua residual proveniente de la extracción de Palma aceitera.

PARÁMETROS ANALIZADOS	METODOLOGÍA DE REFERENCIA	UNIDAD	RESULTADO OBTENIDO
Sustancias solubles en Hexano (Aceites y Grasas)	MAM-40 / APHA5520 B MODIFICADO	mg/l	5.0
DBO₅	MAM-38/ APHA5210 B MODIFICADO	mgO ₂ /l	73
DQO	MAM-23 ^a / COLORIMETRICO MERCKMODIFICADO	mgO ₂ /l	298
Fósforo Total	MAM-17/APHA 4500-P B y/o C Y E MODIFICADO	mg/l	36.4
Nitrógeno Total	MAM-45/COLORIMETRICO MERCK	mg/l	158

En la tabla 19 se presentan los resultados del análisis físico del agua residual inicial.

Tabla 19: Resultados de los parámetros físicos para el agua residual proveniente de la extracción de Palma aceitera

PARÁMETROS ANALIZADOS	METODOLOGÍA DE REFERENCIA	UNIDAD	RESULTADO OBTENIDO
Turbidez	MAM-40 / APHA5520 B MODIFICADO	NTU	70.9
Conductividad eléctrica	MAM-38/ APHA5210 B MODIFICADO	μS	331.25
pH	MAM-23 ^a / COLORIMETRICO MERCKMODIFICADO	-	8.22

4.3. Resultados del modelo K-C*

Una vez que desarrollados los valores necesarios, se debe realizar el cálculo para obtener el caudal, el valor que se obtenga se debe implementar en el sistema ya que el valor está en función de DQO, P_{total} y N_{total} . Se obtendrán tres resultados diferentes por parte del modelo K-C*, pero el valor que se debe considerar debe ser el menor, se escoge el menor valor porque mientras el caudal del sistema sea menor, mayor es la depuración de los contaminantes en el agua residual.

A continuación se desarrolla los cálculos de caudal para cada parámetro:

4.3.1. Resultados del diseño no mecánico para el parámetro de DQO.

Para proceder con los cálculos del modelo fue necesario tomar en consideración los siguientes valores, estos datos son definidos por parte del modelo:

Tabla 20: Valores usados para la modelización de DQO.

DQO	
Volumen	0.624 m ³
Kt	0.55 lt/día
C*	16.99
Cin	288 mgO ₂ /l

Las unidades experimentales se construyeron con el principio de este modelo estadístico, con el fin de evitar el exceso de caudal en el sistema, en la siguiente tabla se presenta los resultados del modelo para DQO.

Tabla 21: Presentación de resultados del modelo estadístico K-C* para el parámetro de DQO.

Cin =	288 mgO₂/l			
Q (m³/d)	Cef (mg/l)	t (d)	v (m/d)	Q (L/d)
0.90740101	550	0.68767832	83.6146764	907.40101
0.89388992	500	0.69807253	82.3696641	893.88992
0.83238208	450	0.74965574	76.7018744	832.38208
0.75217266	400	0.82959676	69.310782	752.17266
0.67587246	350	0.92325111	62.2799142	675.87246
0.67171103	250	0.9289709	61.8964491	671.71103
0.63614142	175	0.98091396	58.6188007	636.14142
0.48219919	150	0.9965845	57.6970643	482.19919
0.29005807	100	1.15129336	26.7281074	290.05807
0.07625187	50	1.18340586	7.0264143	76.25187

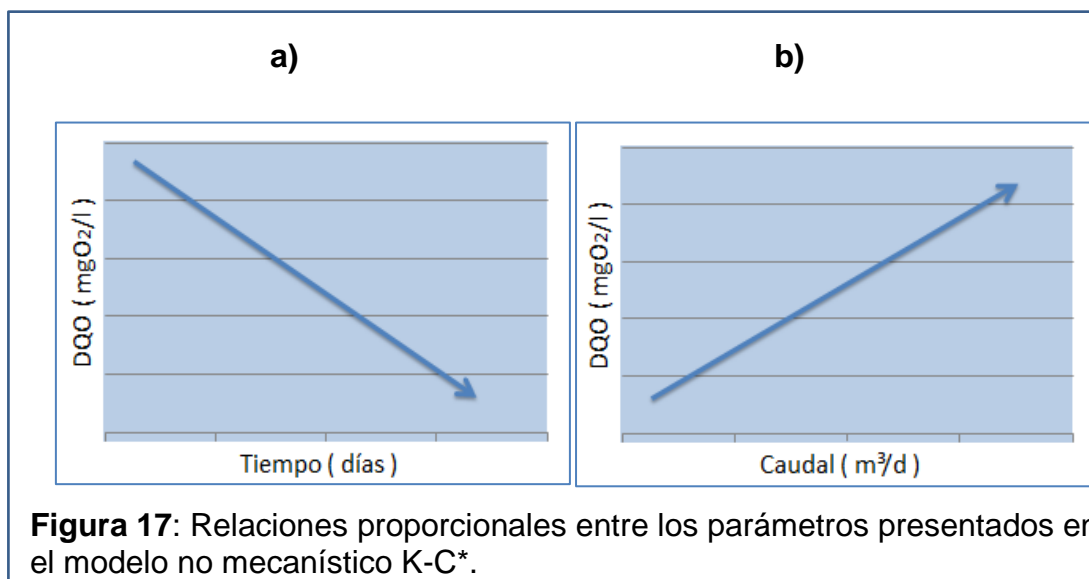
Nota: Los resultados que se presentan en la tabla No 18 muestran el caudal indicado que debe ser proporcionado en las unidades experimentales, este valor se encuentra alrededor de 0.07625 m³ d⁻¹ de agua residual. La tabla muestra los valores que arroja el modelo no mecanístico K-C*.

En donde:

- Cin = El resultado del análisis a la materia orgánica que se encuentra en el agua residual a tratar.
- Q = Es el caudal necesario para el sistema, y tiene las unidades en m³ d⁻¹.
- Ce = Corresponde a la concentración de materia orgánica DQO deseada al terminar el proceso.

- t = El tiempo de retención hidráulica requerido en el sistema, este valor es de 1.18 días.
- V = La velocidad de flujo del agua residual en el sistema.

Según éstos resultados obtenidos por el modelo K-C* se puede observar que mientras la concentración de materia orgánica (DQO) reduce de nivel, los valores de los caudales en el sistema también disminuyen y a su vez los valores del tiempo de retención aumenta; la relación que se encuentra entre la concentración de DQO del agua residual y el resultado en el caudal de ingreso es directamente proporcional como se observa en la figura N5674 el literal b), mientras que en el literal a) se observa una relación inversamente proporcional cuando el parámetro es el tiempo de retención .



4.3.2. Resultados del diseño no mecánico para el parámetro de nitrógeno total.

Para el desarrollo del cálculo de caudal en el parámetro de nitrógeno total se tomaron en consideración los siguientes datos:

Tabla 22: Valores usados para la modelización de nitrógeno total.

DQO	
Volumen	0.624 m ³
Kt	0.08 lt/día
C*	3.943
Cin	165 mgO ₂ /l

Con los valores que se indicaron anteriormente, se presenta a continuación la tabla con los resultados del modelo K-C*. La tabla presenta el valor mínimo que debe tomar el caudal en el sistema para que las plantas puedan trabajar en los altos niveles de nitrógeno.

Tabla 23: Presentación de resultados del modelo estadístico K-C* para el parámetro de Nitrógeno total.

Cin=	165 mg/l			
Q (m³/d)	Cef (mg/l)	t (d)	v (m/d)	Q(L/d)
0.09659094	100	6.46023344	8.90060716	96.5909368
0.07964883	90	0.3438972	7.33943575	79.6488332
0.06653527	80	0.37848437	6.13105463	66.5352711
0.05601155	70	0.4056868	5.16132044	56.0115471
0.02106378	19	0.52624318	1.94097295	21.063776
0.02047017	18	0.8337895	1.88627383	20.4701717
0.0198689	17	0.94058643	1.83086826	19.8689007
0.01925814	16	1.84018913	1.77458777	19.2581351
0.01863565	15	2.4842093	1.71722735	18.6356498
0.01521662	10	2.50077895	1.40217263	15.2166212
0.00993078	5	3.67834921	0.91509624	9.93078356

Nota: Los valores subrayados en la tabla fueron escogidos en la implementación de los sistemas.

Se observa en la tabla superior que se encuentran los valores obtenidos por el modelo K-C*, y se puede observar que para llegar al nivel permitido por el TULSMA se necesita un caudal de 0.01863565 m³/d por cada día de experimentación. Es decir, un total de 18.63 litros diarios de agua residual se debe proporcionar al sistema de humedales. Es importante resaltar que el nivel de depuración del sistema tiene la capacidad requerida para reducir los niveles de nitrógeno por debajo de la normativa ambiental.

Como se puede observar en la tabla, el nivel de nitrógeno tiende a disminuir si se distribuye menor cantidad de agua residual en el sistema. Todo lo contrario para el tiempo de retención, mientras más tiempo se retenga el agua residual en el sistema, mayor será la depuración de las plantas y los microorganismos.

4.3.3. Resultados del diseño no mecanístico para el parámetro de fósforo total.

Para proceder con la determinación del caudal en el parámetro de fósforo total se tomaron en consideración los siguientes datos:

Tabla 24: Valores usados para la modelización de fósforo total.

DQO	
Volumen	0.624 m ³
Kt	0.05 lt/día
C*	0.116
Cin	36.4 mgO ₂ /l

A continuación se presenta los resultados arrojados por el modelo K-C*, estos valores son utilizados para conocer el caudal ideal que el sistema de humedales artificiales debe implementar.

Tabla 25: Presentación de resultados del modelo estadístico K-C* para el parámetro de fósforo total.

Cin=	36.4 mg/l			
Q (m3/d)	Cef (mg/l)	t (d)	v (m/d)	Q(L/d)
-0.03081052	100	-20.2528213	-2.83911062	-30.8105222
-0.03439339	90	-18.1430193	-3.16926301	-34.3933933
-0.03953341	80	-15.7841186	-3.64290218	-39.533408
-0.04759971	70	-13.1093242	-4.386191	-47.5997075
-0.06227076	60	-10.020754	-5.73809118	-62.2707635
-0.09801241	50	-6.36654088	-9.03159205	-98.0124076
0.08272397	25	7.54315813	7.62280188	82.7239717
0.0518727	20	12.0294479	4.77993674	51.8727047
0.02399087	10	26.0098984	2.21069683	23.9908665
0.01555724	5	40.1099474	1.43355959	15.557238
0.01396209	4	44.6924337	1.28657124	13.9620949
0.01232056	3	50.6470375	1.13530826	12.3205627
0.01054688	2	59.1644255	0.9718678	10.5468784

Los datos obtenidos se observan en la tabla e indican que el caudal que debe ser ingresado en el sistema está alrededor de 0.02399 m³ al día del agua residual, con un tiempo de retención hidráulica de 2.21 días, esto con el objetivo de reducir el nivel de fósforo a los niveles permitidos por la legislación ambiental.

Al igual que para los anteriores modelos obtenidos, la relación entre el caudal y la concentración de nitrógeno es directamente proporcional, en cambio para el tiempo de retención y los niveles de concentración la relación es inversamente proporcional.

4.4. Resultados del parámetro de DQO para los sistemas desarrollados

En la figura 17 se presentan los resultados obtenidos de DQO para el experimento, se puede observar que las seis unidades experimentales tienden a la remoción del parámetro, mientras transcurre el tiempo menor son los niveles obtenidos. Al finalizar el periodo de experimentación se obtuvo valores menores a los iniciales, alcanzando niveles que se encuentran por debajo de la normativa legal. El valor máximo de DQO con respecto al TULSMA es de 250 mg/L.

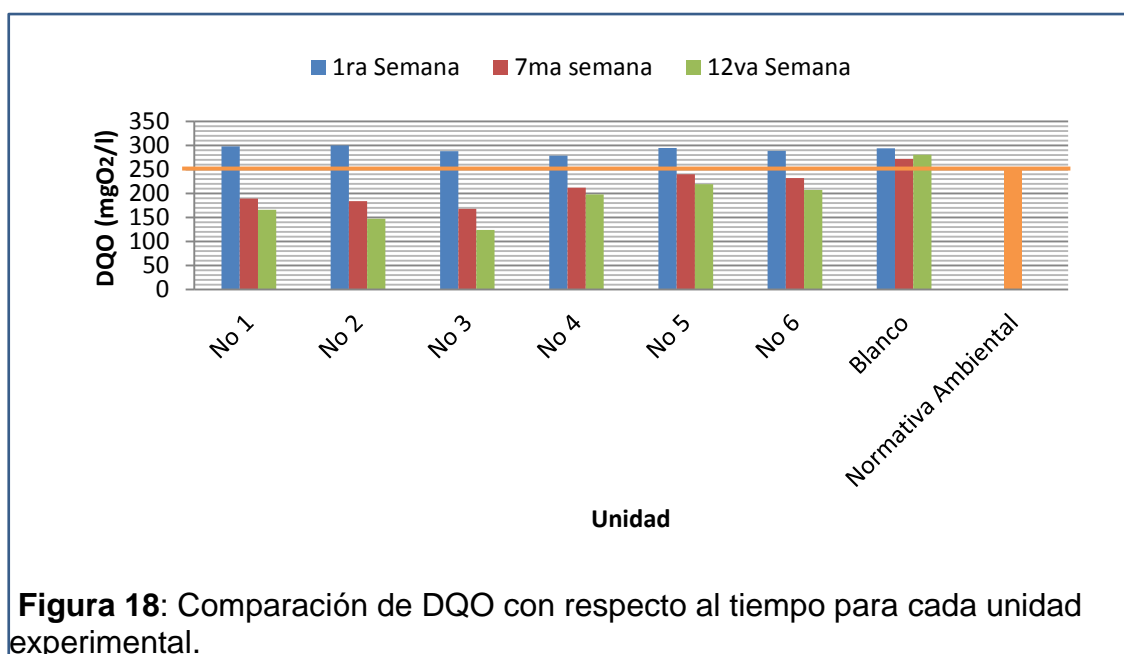


Figura 18: Comparación de DQO con respecto al tiempo para cada unidad experimental.

Como resultado se evidenció que las unidades No 1, No 2 y No 3 obtuvieron valores de 166, 147, 124 mg/L respectivamente, mientras que para las unidades restantes que pertenecen al sistema subsuperficial las concentraciones de DQO se mantienen en un rango de 198mg/L siendo la más baja y 219mg/L la más alta.

En cuanto se refiere a nuestra unidad de ensayo (blanco), los valores se mantuvieron similares con respecto a la concentración inicial, por lo que las plantas influyen en la remoción de DQO, coincidiendo con lo dicho por (Scavo & Rodriguez, 2012) que explica que el rol que toman las plantas en la remoción de DQO es importante ya que puede existir una remoción de hasta 95%

siempre y cuando las especies utilizadas se encuentren con las condiciones favorables para desarrollarse.

Para el tratamiento No 3 se presenta el valor más bajo registrado en el experimento con una concentración de 124 mg/L, siendo el tratamiento de mayor eficiencia con el 58,38%; mientras que, las unidades No 1 y No 2 se encuentran con una remoción del 44,29% y 50,67% respectivamente. Para los experimentos No 4, No 5 y No 6 los niveles de concentración de DQO aumentan con respecto al sistema superficial y sus eficiencias disminuyen con resultados de 33,55%; 26,51% y 30,53% respectivamente. Siendo la unidad No 5 el de menor eficiencia en el experimento.

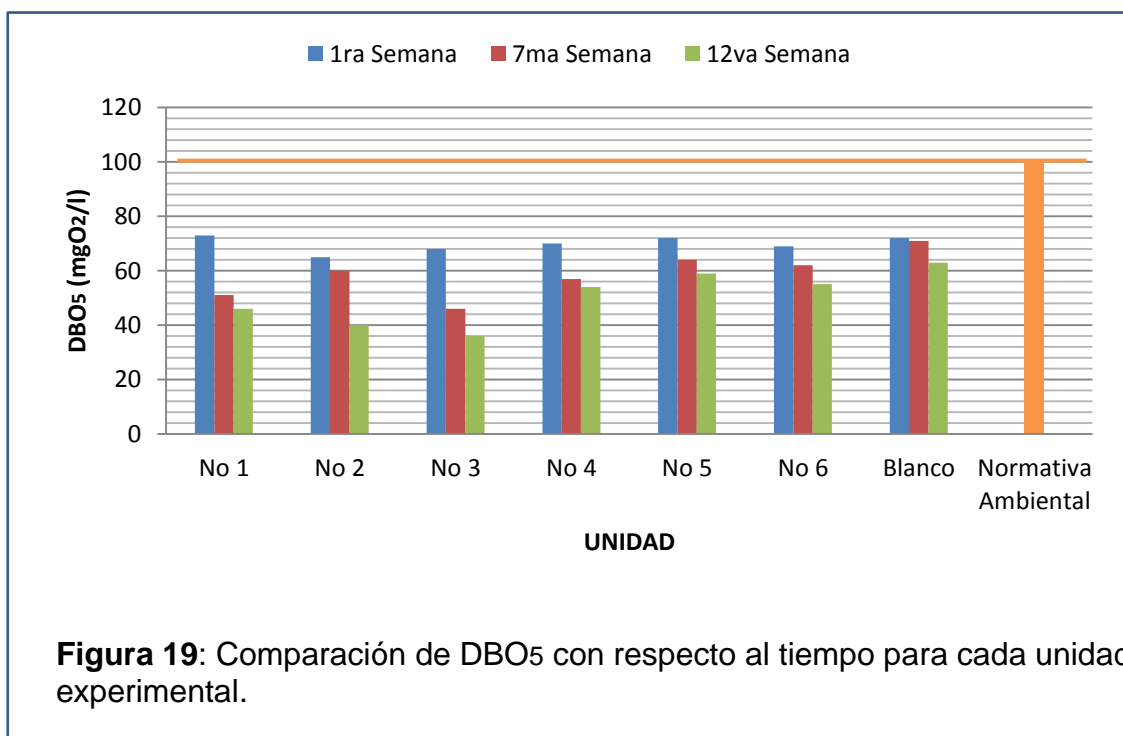
Para los dos sistemas superficial y subsuperficial, se presenta una diferencia de 22%, siendo más eficientes las unidades experimentales del sistema superficial.

Tabla 26: Eficiencia de remoción del parámetro DQO para cada unidad experimental.

Unidad Experimental	Valor inicial de DQO en Agua Residual	Condiciones finales de DQO en Agua tratada	Eficiencia de remoción (%)
No 1	298	166	44.29
No 2	298	147	50.67
No 3	298	124	58.38
No 4	298	198	33.55
No 5	298	219	26.51
No 6	298	207	30.53
No 7(Blanco)	298	281	5.70

4.5. Resultados del Parámetro DBO₅ para los sistemas desarrollados

Para el parámetro de DBO₅ se realizaron tres mediciones por cada unidad experimental, cabe recalcar que la concentración inicial se encuentra con un valor de 73 mg/L que se encuentra por debajo de la normativa legal impuesta por el TULSMA con el nivel máximo permisible de 100 mg/L



En la figura 18 se observa los niveles de concentración de DBO₅ en el periodo de experimentación de las unidades, en cada uno de los experimentos existe una remoción de DBO₅, esto se puede deber a que los microorganismos que se encuentran en las especies vegetales adsorben el contaminante, coincidiendo con lo dicho por (Mongkon et al, 2003) que enfatiza la remoción de DBO₅ en el trabajo de los microorganismos en la fitorremediación. Para los tratamientos No 1, No 2 y No 3 se obtuvo valores de 46, 40 y 36 mg/L respectivamente. En cambio para las unidades No 4, No 5 y No 6 los niveles de concentración fueron de 54, 59 y 55 mg/L respectivamente, estos últimos tratamientos pertenecen al sistema subsuperficial del experimento.

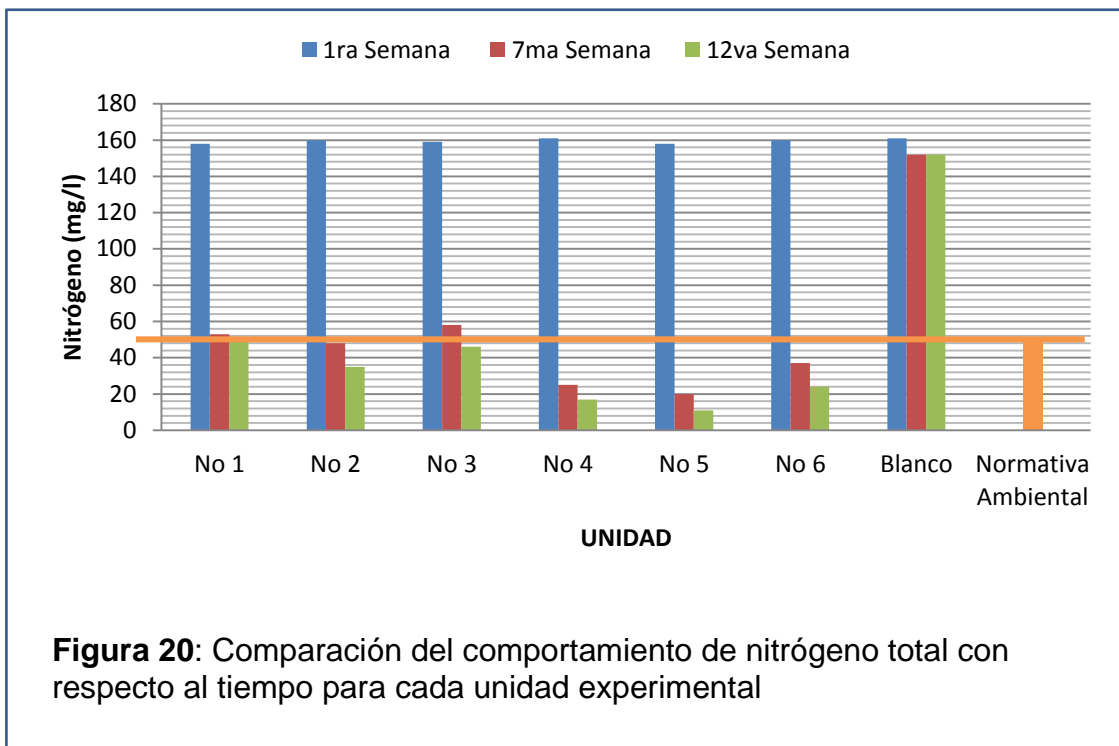
La eficiencia del experimento se encuentra relativamente baja con 30% de promedio, esto es porque el nivel inicial es también bajo, se puede observar en la tabla 27 que la unidad experimental más eficiente fue la No 3 con un 50,68% del sistema superficial, y la unidad menos eficiente fue la No 5 con una remoción de 19,17% del sistema subsuperficial. Esto indica que las unidades del sistema superficial fueron más eficientes que los tratamientos que se dieron en el sistema subsuperficial.

Tabla 27: Eficiencia de remoción del parámetro DBO5 para cada unidad experimental.

Unidad Experimental	Valor inicial de DBO5 en Agua Residual	Condiciones finales de DBO5 en Agua tratada	Eficiencia de remoción (%)
No 1	73	43	36.98
No 2	73	40	45.20
No 3	73	36	50.68
No 4	73	54	26.02
No 5	73	59	19.17
No 6	73	55	24.65
No 7(Blanco)	73	63	13.69

4.6. Resultados del parámetro de nitrógeno Total en el sistema

En la figura 19 se analiza el comportamiento del nitrógeno en el transcurso del experimento, la figura compara los niveles de cada tratamiento con el agua residual inicial, la Unidad de Ensayo (Blanco) y el límite máximo permisible por el TULSMA. Se puede observar que los niveles al finalizar el experimento se encuentran por debajo de la normativa ambiental que permite un máximo de 50 mg/L de nitrógeno en las aguas residuales provenientes de industrias.



Al analizar la figura se puede observar que el agua residual al ingresar a los sistemas mantiene un valor alrededor de 158 mg/L de nitrógeno. Para el sistema superficial las unidades No 1, 2 y 3 reducen su concentración a niveles de 49, 35 y 46 mg/L respectivamente. Sin embargo, los niveles de las unidades No 4, 5 y 6 son menores a los resultados obtenidos en el sistema superficial, con valores de 17, 11 y 24mg/L respectivamente, esto se puede deber a que existe mayor desarrollo de microorganismos en el sustrato disponible del sistema subsuperficial, coincidiendo con lo expuesto por (Garbisu, Becerril, Epelde & Alkorta. 2007) que explican que los microorganismos juegan un papel importante en la remoción de materia orgánica cuando se encuentran situados en un sustrato fijo, así los metabolitos que se generan son absorbidos por las especies vegetales y en conjunto con los compuestos químicos esenciales como es el nitrógeno.

Tabla 28: Eficiencia del parámetro nitrógeno para los sistemas superficial y subsuperficial

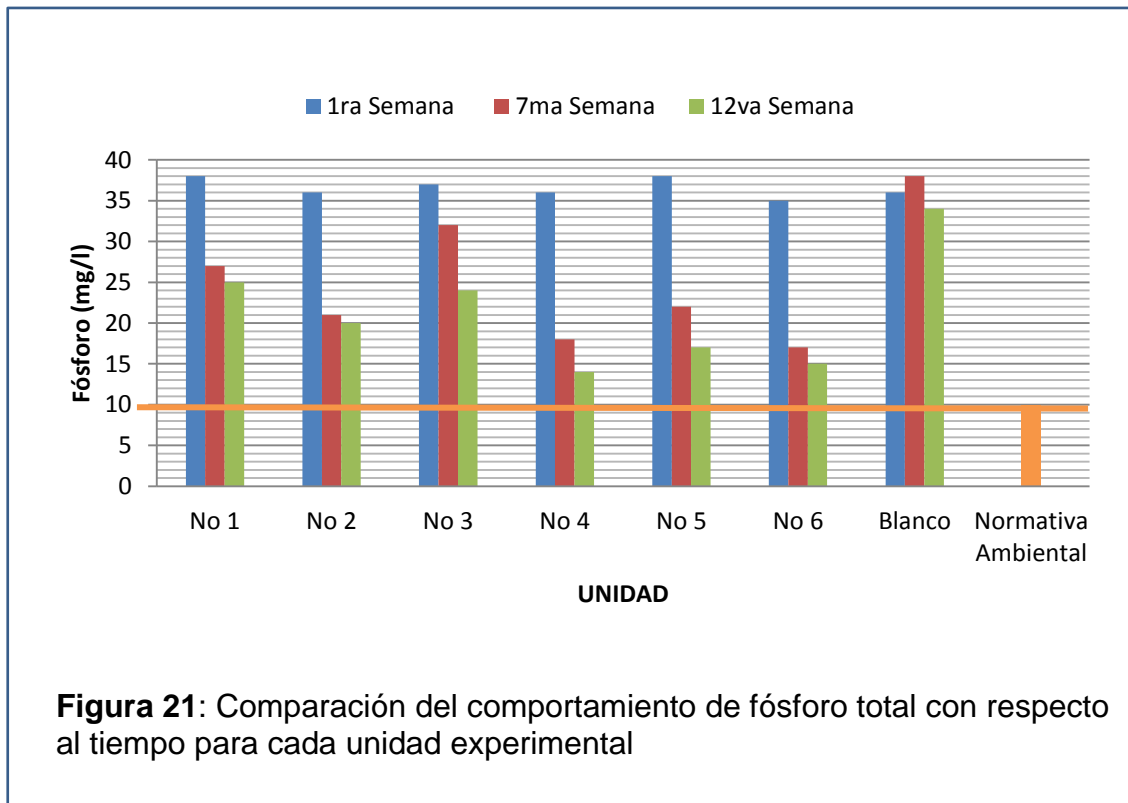
Unidad Experimental	Valor inicial de Nitrógeno Total en el Agua Residual	Condiciones finales de Nitrógeno total en Agua tratada	Eficiencia de remoción (%)
No 1	158	49	68.98
No 2	158	35	77.84
No 3	158	46	70.88
No 4	158	17	89.24
No 5	158	11	93.03
No 6	158	24	84.81
No 7 (Blanco)	158	152	3.79

La eficiencia de remoción de nitrógeno se observa en la tabla 28, siendo la Unidad No 1 la menos eficiente con 68.98% de remoción. Sin embargo, la Unidad No 5 se encuentra con la mayor eficiencia encontrada en el experimento con un valor de 93.03%. Se puede decir que la unidad de ensayo (blanco) no presenta cambios en los niveles de nitrógeno con alrededor de un 3.79% de remoción, esto se puede deber a que las especies vegetales estudiadas absorben los nutrientes esenciales y las almacena para sus ciclos vitales, coincidiendo con lo dicho por (Wagner, Truong, Vieritz & Smeal. 2003) y (Smeal, Hackett & Truong, 2003) que concuerdan con la importancia de las especies vegetales en la remoción y absorción del nitrógeno, y esto permite el crecimiento masivo de la especie.

4.7. Resultados del parámetro de fósforo total en el sistema

En la figura 20 se puede analizar el comportamiento que toma el fósforo en el transcurso de la experimentación, la figura compara los niveles de cada tratamiento con el agua residual inicial, con la unidad de Ensayo (Blanco) y el límite máximo permisible por el TULSMA. Se puede observar que los niveles al

finalizar el experimento se encuentran por encima de la normativa ambiental que permite un máximo de 10 mg/L de fósforo en las aguas residuales provenientes de industrias.



En la figura 20 se observa que el valor inicial del agua residual es de 36.4 mg/L, para las unidades No 1, 2 y 3 los niveles obtenidos al finalizar el experimento se encuentran entre 25, 20 y 24mg/L respectivamente. Para las unidades del sistema subsuperficial No 4, 5 y 6 sus valores fueron 14, 17 y 15 mg/L. En comparación con la unidad de ensayo (blanco) que mantiene un tratamiento sin especies, se puede evidenciar que el trabajo de las especies es fundamental en la remoción y absorción de los nutrientes.

Tabla 29: Eficiencia para el parámetro de fósforo total para los sistemas superficiales y subsuperficiales

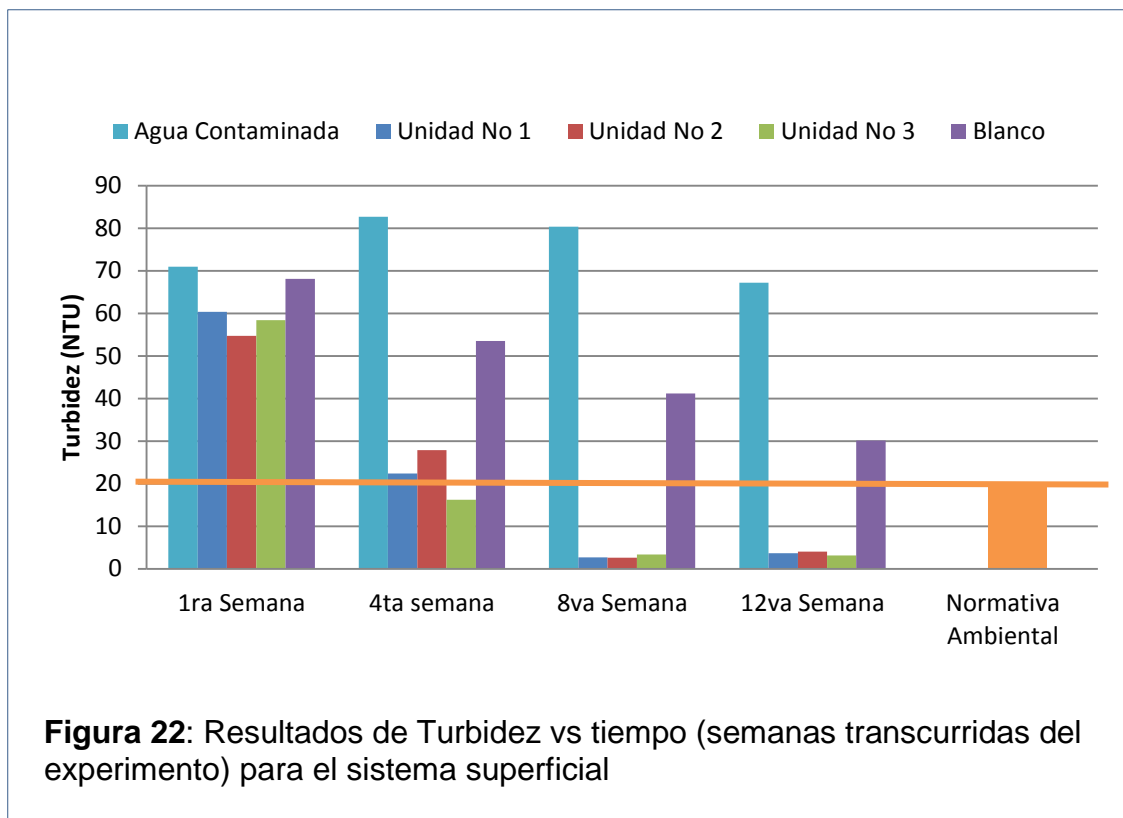
Unidad Experimental	Valor inicial de Nitrógeno Total en el Agua Residual	Condiciones finales de Nitrógeno total en Agua tratada	Eficiencia de remoción (%)
No 1	36.4	25	31.31
No 2	36.4	20	45.05
No 3	36.4	24	34.06
No 4	36.4	14	61.53
No 5	36.4	17	53.29
No 6	36.4	15	58.79
No 7 (Blanco)	36.4	152	6.59

La remoción del fósforo y su eficiencia en el tratamiento se observa en la tabla 29, con bajos porcentajes de eficiencia se evidencia el menor valor en la unidad No 1 con 31.31% de remoción. Sin embargo, el comportamiento encontrado en la Unidad No 4 se encuentra con el mayor nivel de eficiencia con el 61.53%. Es importante recalcar que se puede aumentar la eficiencia de los sistemas si se controla factores climáticos como es la temperatura, como lo explica (Zarela, 2012) que las temperatura bajas reducen la eficiencia de las plantas en la absorción de nutrientes como el fosforo.

4.8. Turbidez

4.8.1. Resultados de Turbidez en la especie *Eichhornia Crasspises* para el sistema superficial

En la figura 55 se muestran los resultados obtenidos en el muestreo del parámetro de turbidez, estos valores están presentados en un gráfico de barras.



En la figura 21 presentada se observa que para la unidad No 1, No 2 y No 3 existe una remoción clara de turbidez, sin embargo se evidenció que la disminución del parámetro comienza desde la segunda semana de experimento. Según explica (Serrada, 2008) esto se debe a que las plantas entraron en la etapa de adaptación de condiciones climáticas y condiciones del agua residual, comparando con el experimento realizado se puede discutir que las plantas necesitan un periodo de adaptación y que en esta etapa de dos semanas no se observa variación en los niveles de turbidez. Según autores como (Pire y Barceló, 2010) el periodo de adaptación se encuentra entre 2 a 4 semanas, este tiempo las especies vegetales se encuentran estresadas y no permiten un buen desenvolvimiento en la captación de nutrientes, es posible que también pierdan las hojas para evitar perder energía, es necesario mantener ciertos estándares y propiedades edáficas para poder desarrollar a una especie, entre ellas se encuentra el volumen mínimo necesario de suelo (tierra) para que pueda desarrollar, mantener a la planta con aire y agua para

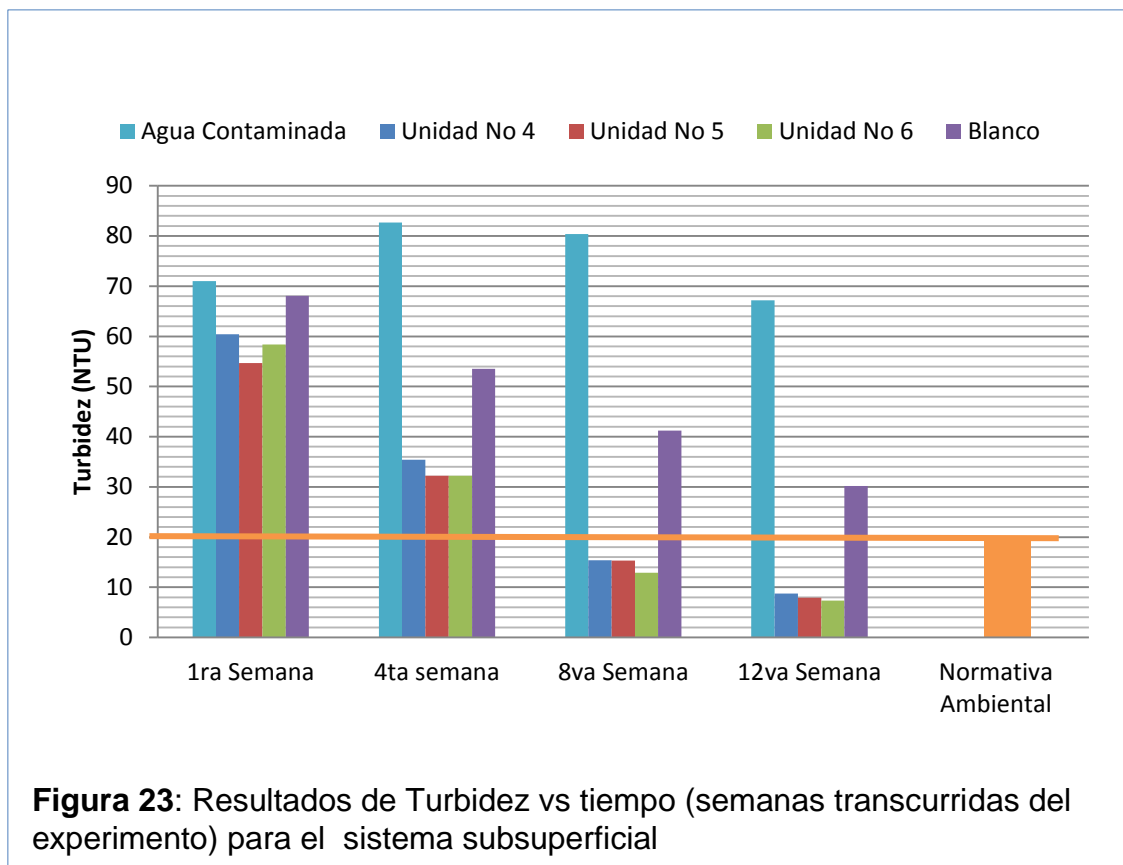
que las raíces puedan respirar y absorber agua y los elementos esenciales para su nutrición.

Para las Unidades No 1, No 2 y No 3 el valor inicial de turbidez que se obtuvo fue de: 70.9. Se puede observar que la reducción de turbidez en el agua comienza desde la segunda semana y se mantuvo hasta la octava semana, en esta semana se registraron valores de 2.36, 3.24 y 3.34 respectivamente. Es importante recalcar que para las cuatro últimas semanas de estudio se evidencio datos similares, manteniendo un rango similar entre 2.43 a 4.1.

En comparación con la unidad Blanco se observó una reducción de alrededor 27 NTU de turbidez para las tres unidades, la mayor remoción de registro desde la segunda semana hasta la octava, siendo el sistema de mayor reducción de turbidez en el experimento.

4.8.2. Resultados de turbidez en la especie *Eichhornia Azurea* para el sistema subsuperficial

El sistema subsuperficial se diferencia por tener un sustrato y una especie diferente que es la *Eichhornia Azurea*. Como se puede observar en la figura 22; se encuentra la presentación de los valores registrados para las unidades experimentales No 4, No 5, No 6 y para el tratamiento blanco.



Con respecto a los datos obtenidos y a la figura generada se puede decir que las unidades No 4, No 5 y No 6 se evidencia una remoción durante las 12 semanas de experimentación. Al igual que en el sistema superficial las plantas necesitaron un periodo de adaptación entre 2 – 4 semanas, ya que esta especie fue trasplantada, y por ende las raíces tienden a estresarse y no permiten un tratamiento adecuado. Como se observa en la figura los valores en la primera semana aumentan de nivel con respecto al agua residual, alcanzando un valor máximo de 81.3 NTU. Como explica González (2011), uno de los parámetros que influyen en el aumento de la turbidez en el agua son las partículas que se encuentran en el suelo o suspendidas en el agua, ratificando que uno de los factores para que aumente la turbidez es el sustrato en el sistema, ya que este contiene tierra, hojas y materia orgánica en descomposición.

Con el valor inicial de turbidez de 70.9 NTU, este valor no varía entre los sistemas, se puede observar que la reducción de turbidez es desde la segunda

hasta la octava semana con resultados del sistema con valores de 8.26, 7.46 y 7.06 para las unidades No4, No 5 y No 6, al finalizar esta semana los valores se estabilizan y se mantienen hasta finalizar el periodo del experimento, éstos son mayores en comparación al sistema superficial y esto puede deberse que las unidades y el tratamiento blanco mantienen un sustrato de materia orgánica y este podría estar saturado de partículas sólidas generando mayor turbidez cuando el agua pasa por el tratamiento.

Las 3 primeras semanas de experimentación se presencié estrés celular en las plantas y se pudo observar que las plantas se mantuvieron encogidas en esta etapa. Posteriormente a este periodo se pudo observar que las especies presentaron un cambio evidente en su estructura, como se puede observar en la figura comparativa



Figura 24: Fotografía comparativa entre segunda y octava semana de experimentación.

En la figura 23 se evidencia la adaptación que tuvieron las especies, así también un claro crecimiento vegetal y el posible aporte de materia orgánica de éstas al sistema. Para evitar la proliferación de insectos se realizó la poda de hojas muertas cada 4 semanas de experimentación.

4.8.3. Eficiencia de remoción del parámetro de turbidez entre los sistemas

Para determinar la eficiencia se utilizó la ecuación 11 de porcentaje de remoción de cada unidad experimental, esta hace relación con los datos iniciales y finales de cada experimento. A continuación se presenta la misma:

$$\% \text{ Remoción} = \frac{C \text{ afluyente} - C \text{ efluente}}{C \text{ afluyente}} * 100$$

(Ecuación 13)

La eficiencia del sistema superficial y subsuperficial se compara con el agua residual inicial y los valores registrados por la Unidad de ensayo No 7 denominado blanco, estos valores están representados a continuación en la siguiente tabla.

Tabla 30: Eficiencia de remoción de turbidez del sistema superficial y subsuperficial.

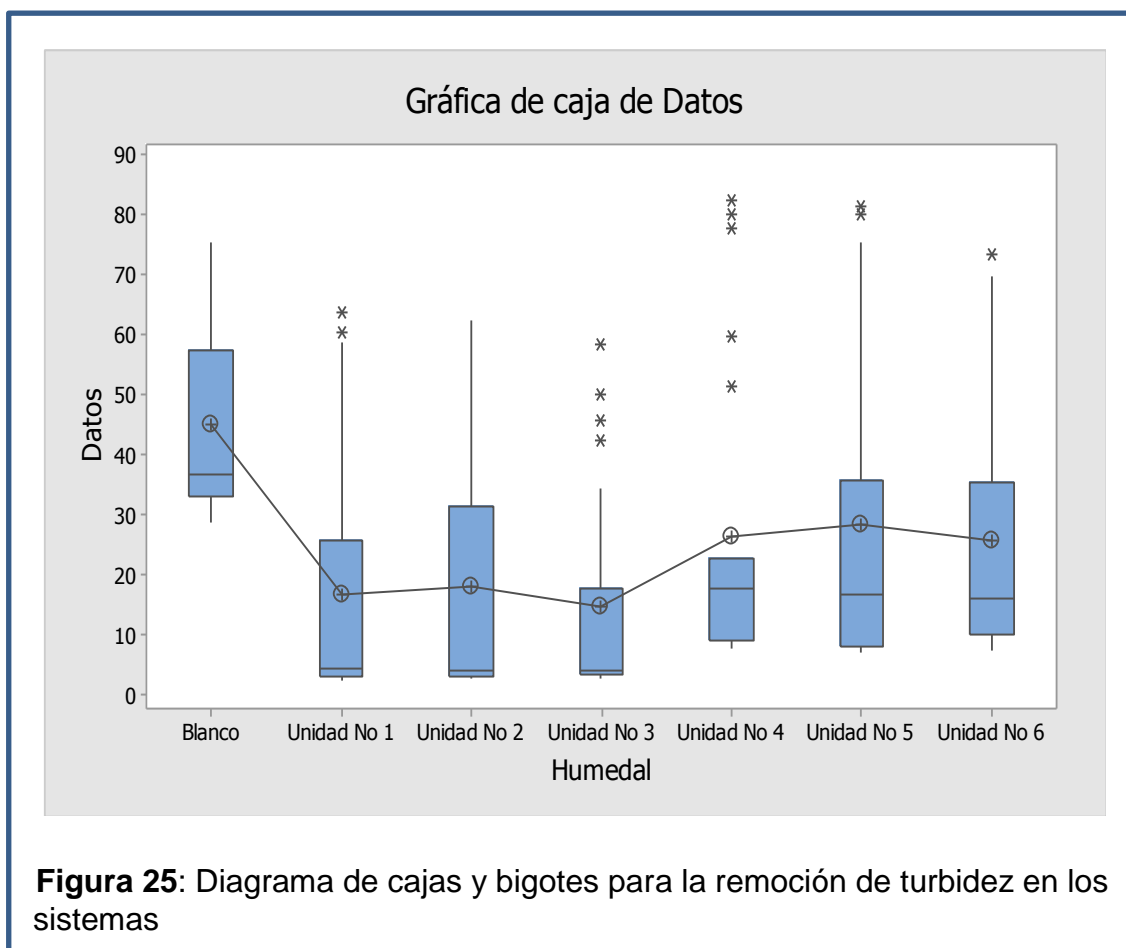
Unidad Experimental	Valor inicial de turbidez en Agua Residual (NTU)	Condiciones finales de turbidez en Agua tratada (NTU)	Eficiencia de remoción (%)
No 1	70.9	3.18	95.51
No 2	70.9	3.58	94.95
No 3	70.9	2.89	95.92
No 4	70.9	8.26	88.34
No 5	70.9	7.46	89.47
No 6	70.9	7.06	90.04
No 7(Blanco)	70.9	29.4	58.53

De acuerdo al análisis realizado de la turbidez, en la tabla 30, se desarrolló la eficiencia de remoción de cada unidad experimental, y se puede observar que el sistema superficial alcanza una eficiencia mayor al 95% en todos sus unidades, en cambio la eficiencia para las unidades del sistema subsuperficial disminuye a un 89%, esto indica una clara remoción del contaminante y puede deberse a que las especie *Eichhornia Crassipes* y *Eichhornia Azurea* se acoplaron a las condiciones del agua residual inicial y al tratamiento.

Otro factor que puede influenciar es a la distribución del lecho de piedras que se instaló en las unidades experimentales, dependiendo del diámetro de la piedra existe mayor capacidad para que los sólidos disgregados queden atrapados en el lecho de la piedra.

En la figura 24 se describe el diagrama de cajas y bigotes, en el cual se puede observar la comparación de cada unidad experimental con la unidad de ensayo No 7, esta comparación es para el parámetro de turbidez y su tratamiento. Según los resultados obtenidos el análisis de esta figura indica una remoción por parte de todas las unidades con respecto a los valores iniciales del agua

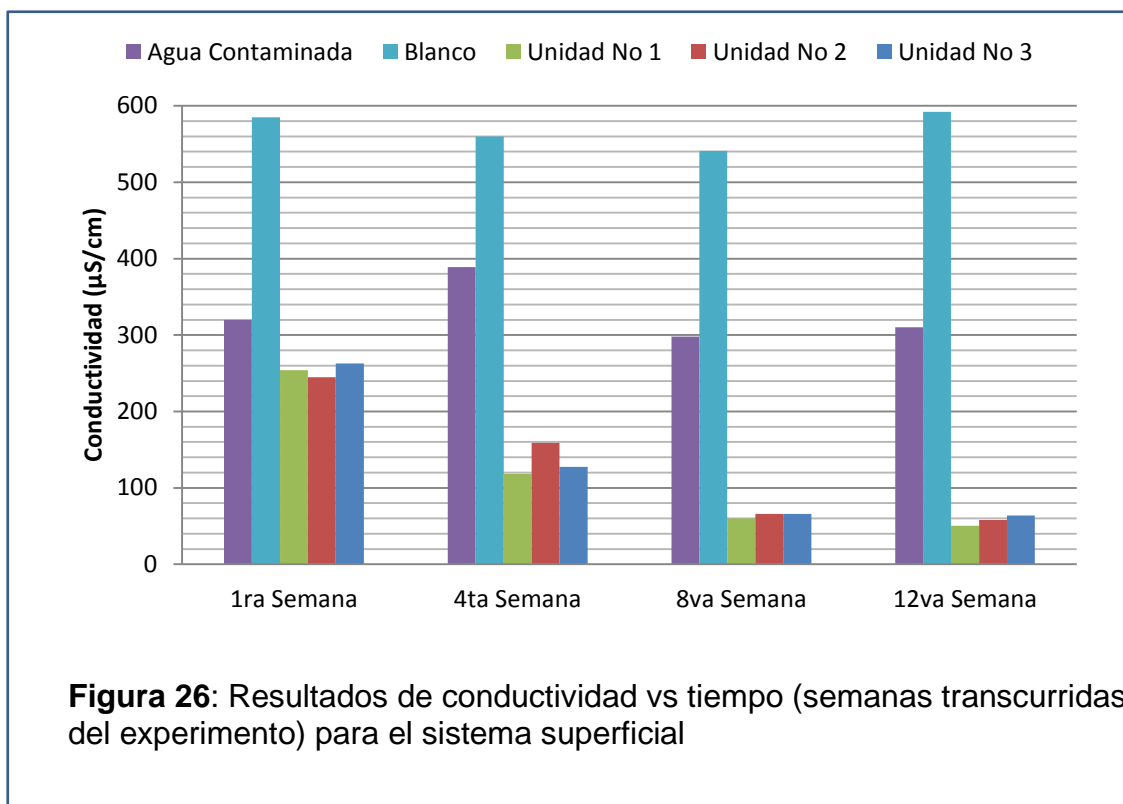
residual y a los resultados de nuestro tratamiento blanco. La menor eficiencia se encuentra en la unidad No 7 con una eficiencia del 58.53%, indicando que las especies vegetales representan hasta un 40 % más de eficiencia en la remoción de sólidos ubicados en el agua.



4.9. Conductividad

4.9.1. Resultados de conductividad en la especie *Eichhornia Crasspises* para el sistema superficial

En la figura 25 se detallan los resultados obtenidos durante el periodo de experimentación, como se detalla anteriormente los tratamientos son significativamente diferentes basados en el análisis de ANOVA.



Como se observa en la figura 25 existe una remoción para las unidades 1, 2 y 3 que pertenecen al sistema superficial, se puede evidenciar que para la unidad de ensayo (blanco) los niveles de conductividad aumentaron casi el doble en comparación al agua residual sin tratar. Como explica (Srisatit & Sengsai, 2003) el valor de conductividad aumenta mientras el tiempo de resistencia hidráulica es mayor, y al estar el humedal de ensayo con sustrato y sin especies vegetales el tiempo que demora el agua en fluir por todo el sistema será mayor.

El sistema obtiene valores iniciales que oscilan entre 290 y 320 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mientras transcurre el tiempo de experimentación los valores de conductividad disminuyen.

La unidad que mostro mayor eficiencia es la No 1, este humedal alcanzo niveles de 50.55 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en la última semana de experimentación. A su vez las Unidades 2 y 3 obtuvieron valores 57.9 y 63.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivamente. Cabe recalcar que los resultados obtenidos no se compararon con la normativa

ambiental porque no existen límites máximos para el parámetro de conductividad.

En la siguiente figura 26 se puede observar a la especie *Eichhornia Crassipes* al iniciar el experimento, comparado con la misma especie al finalizar el periodo de estudio.

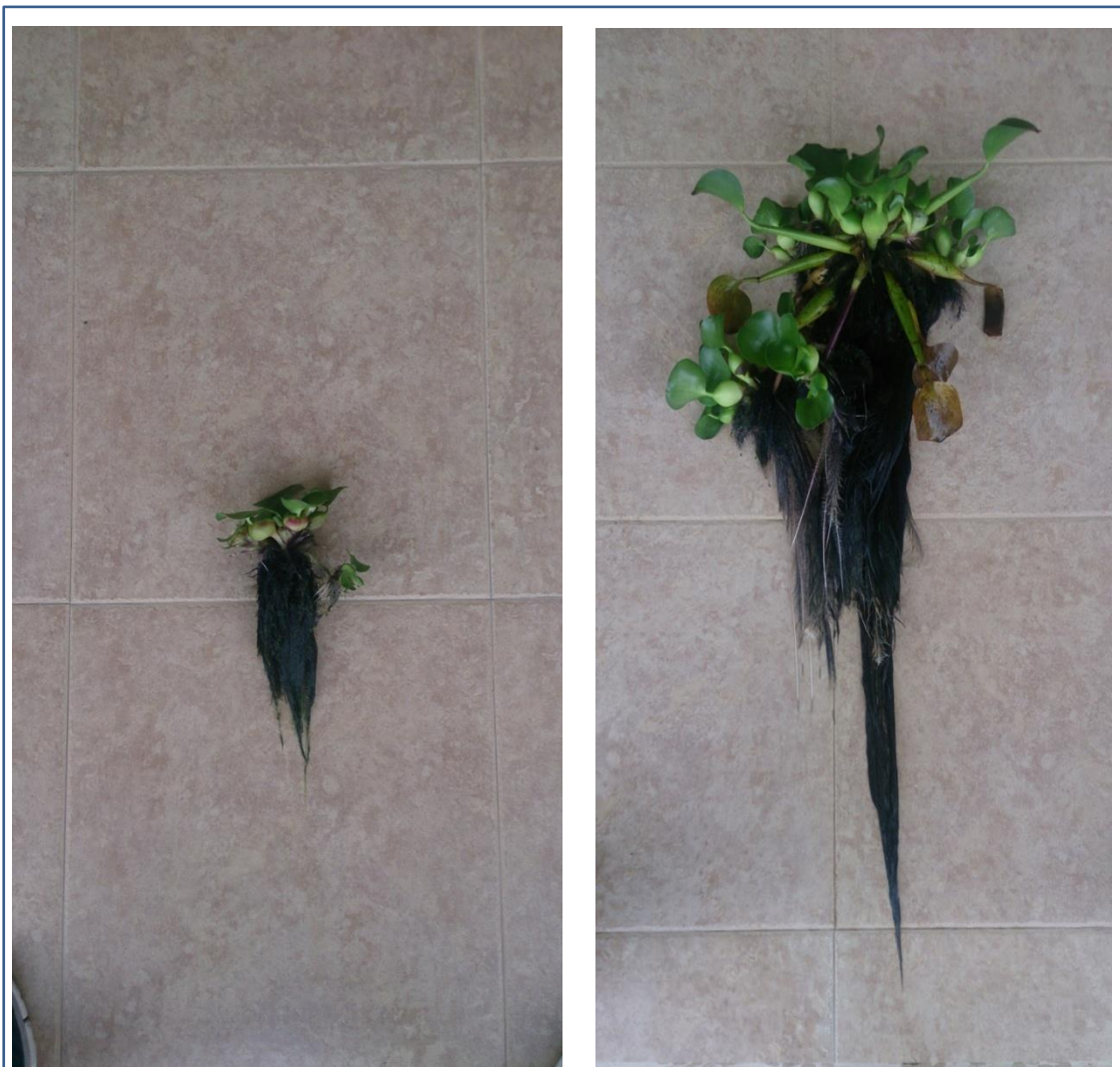


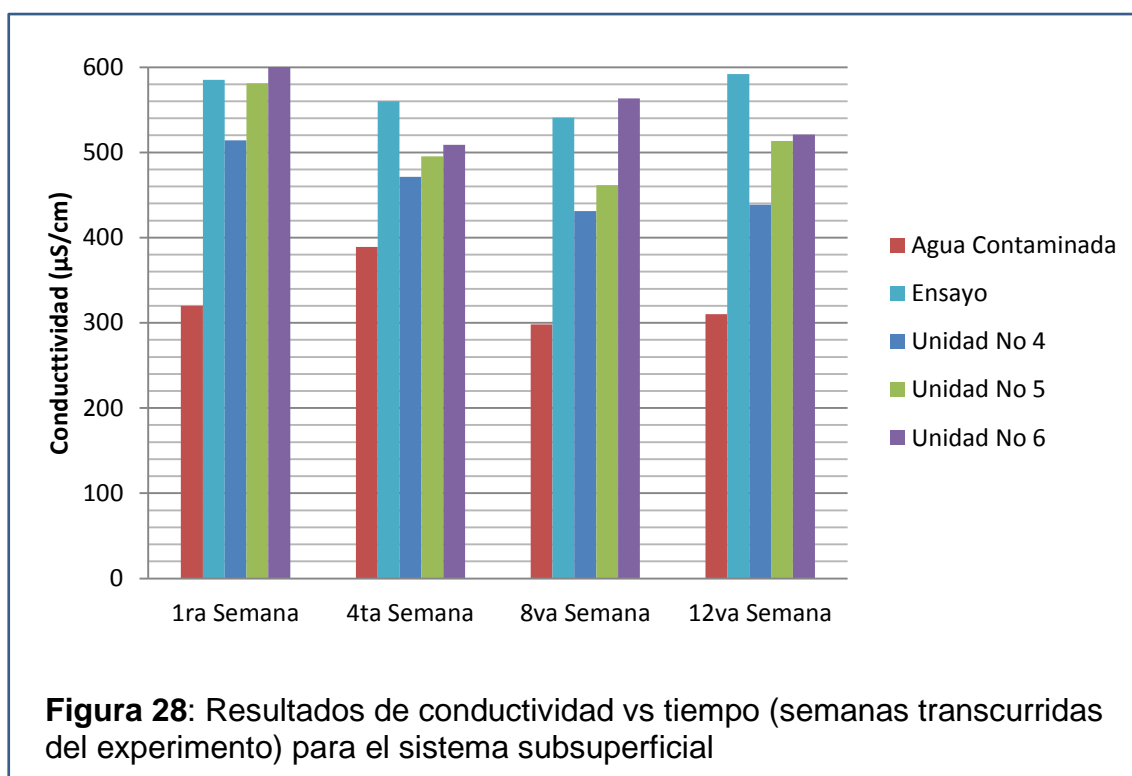
Figura 27: Fotografía comparativa entre primera y duodécima semana de experimentación.

La figura 27 indica el crecimiento de la especie *Eichhornia crassipes* en el transcurso del experimento, se puede observar que al finalizar el periodo de experimentación la planta aumenta en dimensiones y sus raíces son más

contundentes, esto se puede deber a que las plantas adsorben los nutrientes del agua residual y permiten un desarrollo óptimo, como lo explica (Torres, 2009) que el uso de flora acuática para la remediación de aguas residuales tiene una gran aceptación, gracias a la adsorción de nutrientes esenciales que realizan estas especies.

4.9.2. Resultados de conductividad en la especie *Eichhornia Azurea* para el sistema subsuperficial

Para el sistema subsuperficial se obtuvieron resultados totalmente diferentes en comparación a los datos para el sistema superficial, en la siguiente figura 27 se presenta el comportamiento del parámetro conductividad.



Con respecto a los niveles que se obtuvieron se puede decir que existe un incremento de la conductividad eléctrica, en su primera semana se puede observar que los niveles no se mantienen iguales en comparación al agua residual con valores de 514, 581 y 602 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivamente.

Desde la cuarta semana hasta terminar la experimentación los resultados obtenidos para la unidad No 4 se mantuvo con valores desde 431 hasta 471.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$, para la unidad No 5 los resultados oscilaron entre 461.5 y 513 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y para la unidad No 6 el nivel de conductividad se encontró entre 509 a 536.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los valores que fueron arrojados por los humedales llegan a mantener los mismos niveles que la Unidad de ensayo (blanco). Estos altos niveles se puede deber al sustrato instalado en el sistema subsuperficial, concordando con lo que explica (mongkon et al, 2003) que la conductividad tiende a aumentar cuando el flujo del agua residual pasa a través de un sustrato o capas de tierra, lo que restringe que las especies vegetales no tenga efecto en la disminución de las sales disueltas en el agua residual.

4.9.3. Eficiencia de remoción del parámetro de conductividad entre los sistemas

La eficiencia de los dos sistemas instalados es comparada con los niveles iniciales del agua residual, en la siguiente tabla se expresa la eficiencia de las Unidades experimentales para el parámetro de conductividad.

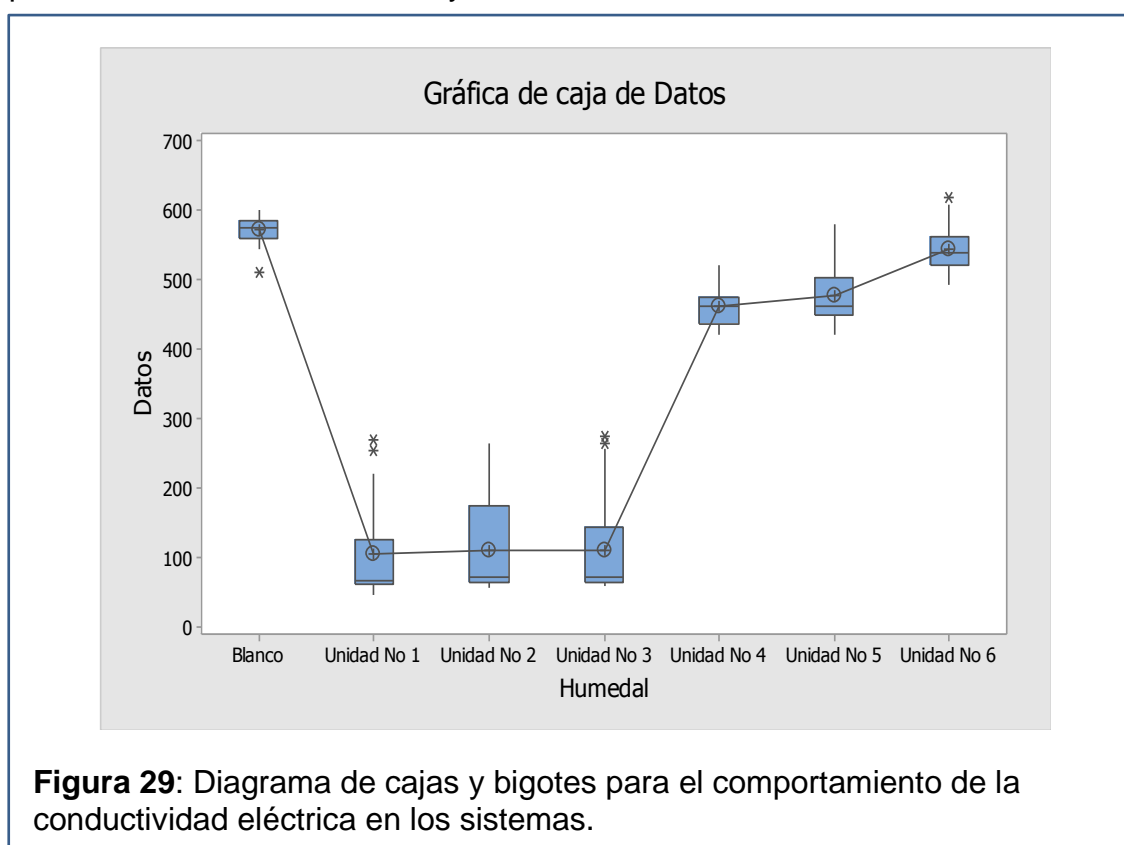
Tabla 31: Eficiencia de remoción de conductividad del sistema superficial y subsuperficial

Unidad Experimental	Valor inicial de turbidez en Agua Residual ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Condiciones finales de turbidez en Agua tratada ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Eficiencia de remoción (%)
No 1	331.25	50.55	84.73
No 2	331.25	57.95	82.5
No 3	331.25	63.8	80.73
No 4	331.25	438.5	-
No 5	331.25	513.3	-
No 6	331.25	521	-
No 7(Blanco)	331.25	592	-

Se desarrolló la eficiencia de remoción de cada unidad experimental y de acuerdo al análisis realizado se puede observar que el sistema superficial obtiene porcentajes de remoción de 84.73, 82.5 y 80.73% para las humedales No 1, 2 y 3 respectivamente.

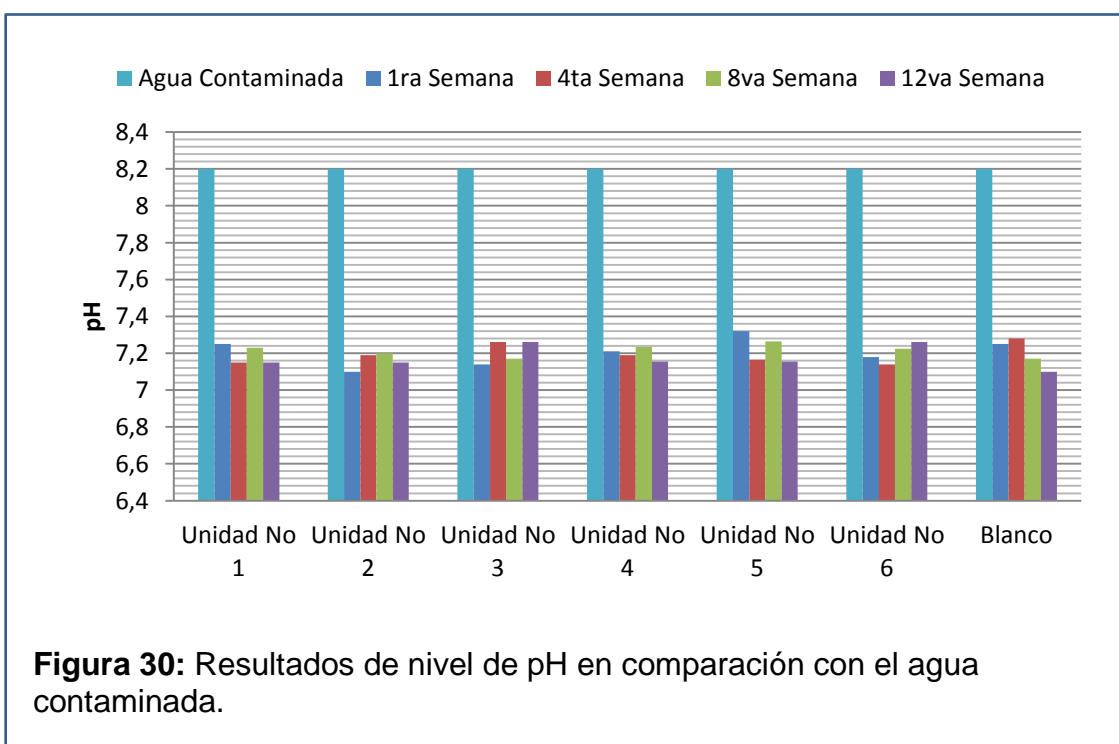
Para los tratamiento del sistema subsuperficial cabe recalcar que terminaron el periodo de experimentación con niveles que superar el valor inicial del agua residual, por tal motivo no se pudo realizar la eficiencia de remoción en este sistema. El alto índice de conductividad en las unidades No 4, 5 y 6 se puede deber a que el sustrato no permite la distribución adecuada de las sales solubles en el paso del agua residual, coincidiendo con lo dicho por (Casas, 2013) que el sustrato o la capa de tierra no permite la evapotranspiración del agua residual y por ende las sales minerales que se encuentran en ella permanecen atrapadas en el sustrato.

En la figura 28 se presenta el diagrama el diagrama de cajas y se puede observar que la comparación entre los diferentes tratamientos en el experimento. El análisis indica una reducción de la conductividad en los humedales que pertenecen al sistema superficial (No 1, No 2 y No3) mientras se compara con la unidad de ensayo (blanco). A su vez los valores obtenidos en el sistema subsuperficial mantienen un rango similar entre la unidad de ensayo, señalando que la principal diferencia entre sistemas es el sustrato que presenta las Unidades No 4, 5 y 6.



4.10. pH

En la figura 30 se presentan los resultados obtenidos de pH en el periodo de experimentación, se puede observar que en el transcurso del proyecto disminuye el valor inicial de pH. Es importante resaltar que el valor obtenido se mantiene en un valor neutro entre el rango de 7 a 7.5 de pH, las especies vegetales se mantienen con vida y desarrolladas entre un nivel de 6 a 7.7 de pH, es posible que éstas manejen el nivel de pH para favorecer su crecimiento y mantener en neutro, contradiciendo con lo dicho por (Santibáñez, 2011) explicando que la variación de pH tiene una influencia indirecta con el crecimiento de las especies vegetales, y otorga mayor valor a la disponibilidad de los elementos nutritivos en los suelos o sustratos.



5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Se realizaron los estudios en campo en la extractora de palma aceitera PEXA, éstas fueron tomadas en las piscinas de oxidación de la industria, luego se procedió a la caracterización física y química del agua residual. Donde las cargas de los parámetros fueron para DQO de 298 mgO₂/l, para DBO₅ de 73 mgO₂/l, el resultado de nitrógeno y fósforo total fue de 158 y 36.4 mg/l respectivamente. Los parámetros físicos estudiados fueron turbidez, conductividad y pH. En el análisis físico que se realizó al agua residual el resultado obtenido fue de 70.9 NTU para turbidez, 331.25 µS/cm para conductividad y un valor de 8.22 para pH.

De acuerdo al análisis químico del agua contaminada se obtuvo que dos parámetros se encontraban bajo el límite máximo permisible por el TULSMA, estos fueron DBO₅, aceites y grasas.

Se diseñaron los humedales artificiales mediante el modelo no mecanístico K-C*, para el cual se obtuvieron que los caudales de entrada de DQO sea de 0.007 m³/d, para nitrógeno un caudal de 0.0186 m³/d y para fósforo de 0.023 m³/d. Con el fin que no sobrepasen los límites permisibles se determinó que el caudal indicado para el sistema sería el más bajo, es decir, el valor obtenido del nitrógeno ya que permite una mayor interacción entre el agua residual y el humedal.

Al desarrollar el modelo K-C* también sirvió para calcular las medidas de construcción de los humedales artificiales y así evitar el sobredimensionamiento en el sistema, gracias al modelo no mecanístico se obtuvieron resultados favorables en la remoción de contaminantes.

Los resultados obtenidos para el sistema de flujo superficial fueron los siguientes: en DQO se evidenció un promedio de remoción del 52%, la eficiencia para el parámetro de DBO₅ se encuentra relativamente baja con un 44%, nitrógeno y fósforo total mantienen una eficiencia de 72% y 37%. Los

resultados obtenidos para los parámetros físicos en el sistema de flujo superficial se mantuvieron con altos niveles de remoción, para turbidez se obtuvo un 95% de eficiencia, para conductividad un promedio de 82% y un valor de pH entre 7 a 7.5 considerado como neutro.

Para el sistema de flujo subsuperficial el DQO obtuvo una eficiencia de 30%, los niveles de DBO₅ en el tratamiento fueron de 23%, Los parámetros de nitrógeno y fósforo total se encontraron con un promedio de remoción de 88% y 58% respectivamente.

En lo que se refiere a los parámetros físicos en el sistema de flujo subsuperficial, la turbidez se mantuvo con una eficiencia de 89%, siendo el parámetro con mejores resultados obtenidos para los dos sistemas. Para la conductividad el sistema alcanzó valores que sobrepasan las condiciones iniciales del agua residual, indicando que el sustrato y la materia orgánica son los factores principales para esta anomalía. El pH en el sistema se estabilizó a valores entre 7 y 7.5.

En cuanto se refiere al análisis ANOVA realizado en el estudio, los tratamientos que mantienen mayor diferencia comparando con el tratamiento de testigo son las unidades No 1, 2 y 3. El análisis fue realizado para los parámetros físicos de turbidez y conductividad, estas tres unidades serían los humedales más eficientes y óptimos, por la razón de que mantienen el mismo principio de tratamiento. Para DQO es importante resaltar que los dos sistemas terminan el periodo de experimentación con valores que se encuentran bajo el límite permisible. En cambio para DBO₅ la baja eficiencia en los sistemas se debe a que el valor del agua residual inicial es bajo, y por lo tanto los resultados se mantienen casi iguales.

Realizar la experimentación en un periodo de tres meses permitió determinar la eficiencia de cada parámetro estudiado, se pudo obtener que las réplicas de humedales de flujo superficial son mayor eficientes en la remoción de DQO, DBO₅, turbidez y conductividad. En cambio para la remoción de nitrógeno total y fósforo total los humedales de flujo subsuperficial obtienen mayor eficiencia.

5.2. Recomendaciones

Para mejorar los niveles de eficiencia para el tratamiento de agua residual con humedales artificiales, se recomienda instalar los dos sistemas estudiados en serie.

REFERENCIAS

- Arias, O. (2004). *Estudio de la biodegradación de la materia orgánica en humedales construidos de flujo subsuperficial*. Departamento de Ingeniería Hidráulica, marítima y ambiental. Tesina, Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Barret, S. (1998) *Floral Biology of Eichhornia Azurea (Swartz) Kunth (Pontederiaceae)*. Volumen 5, Elsevier: Aquatic Botany.
- Carrión, L. (2009). *Bioensayo con macrófitas acuáticas para el tratamiento de lixiviados procedentes del relleno sanitario de Pichacay*. Empresa Municipal de aseo de Cuenca (EMAC). Departamento técnico.
- Casas, R. (2013). *Fitorremediación de suelos salinos*. Primer taller internacional de biorremediación. Facultad de Agronomía de la UBA. Buenos Aires, Argentina: Universidad de Buenos Aires.
- CNRH. (2007). *Gestión integrada del recurso hídrico en Ecuador. Los recursos hídricos del Ecuador*. Organismo rector del agua en el país.
- Constitución Política de la República del Ecuador (2010). *Decreto Legislativo # 0*.
- Delgadillo, O. Camacho, A. Pérez, L. & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Cochabamba: Nelson Antaquera Durán.
- De la vara, R. Gutiérrez, H. (2008) *Análisis y diseño de experimentos*. Segunda edición. México: McGraw Hill.
- FAO. (2011) *Base de datos AQUASTATS*. Recuperado el 02 de diciembre de 2014 de: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/glossary/search.html?langs&keywords=Agua+residual&submit=Buscar&subjectId=-1&submitBtn=-1&_p=100&termId=-1
- Fedepal. (2015). *Producción, consumo y excedentes de aceite de palma africana*. Estadísticas nacionales. Recuperado el 10 de enero de 2015 de: <http://fedapal.com/web/index.php/joomla/estadisticas-nacionales>

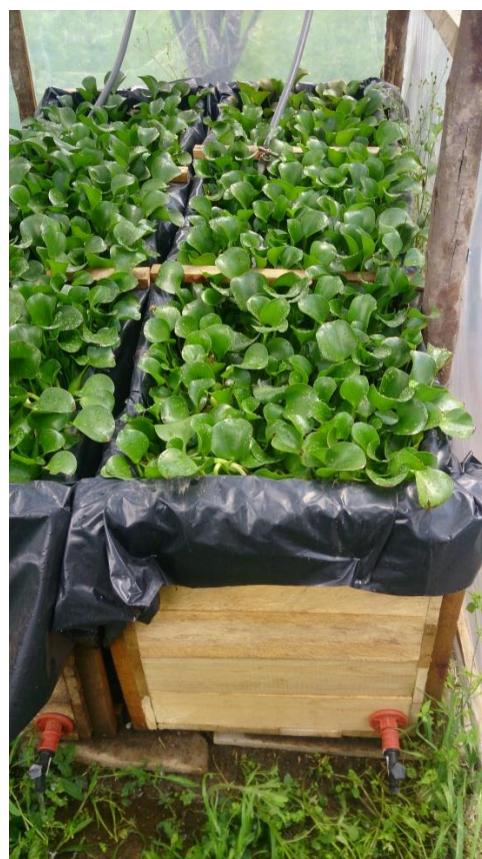
- Fernández, J. Beascochea, E. Muñoz, J. Curt, M. (2011). *Manual de fitodepuración, filtros de macrofitas en flotación*. España: Edita.
- Fernández, J. Curt, M. (2007) *Métodos Analíticos para aguas residuales*. Recuperado el 16 de marzo de 2015, de: http://www.cienciasmarinas.uvigo.es/bibliografia_ambiental/outros/Manual%20de%20fitodepuracion/Capitulos%20Anexos1.pdf
- Garbisu, C. Becerril, J. Epelde, L. Alkorta, I. (2009). *Bioindicadores de la calidad del suelo: Herramienta metodológica para la evaluación de la eficiencia de un proceso fitorremediador*. Ecosistemas.
- González (2011). *Monitoreo de la calidad del agua, la turbidez*. Servicios de extensión agrícola. Puerto Rico: Universidad de Puerto Rico.
- González, J. (2007) *Humedales artificiales para la depuración*. Recuperado el 26 de agosto de 2014 de: http://www.cienciasmarinas.uvigo.es/bibliografia_ambiental/outros/Manual%20de%20fitodepuracion/Capitulos%206.pdf.
- Lara, B. Jaime, A. (2009). *Depuración de Aguas Residuales mediante Humedales Artificiales*. Tesis de Maestría. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña – Instituto Catalán de Tecnología
- Ley de Aguas (2014). *Título II.- Capítulo segundo.- De la contaminación; Título III.- De la adquisición de los derechos de aprovechamiento; Título IV.- De los usos de agua y prelación; Título VII.- De las aguas para fines energéticos, industriales y mineros*.
- Ley de Gestión Ambiental (2004). *Título III – capítulo segundo.- Evaluación de impacto ambiental y del control ambiental; capítulo quinto.- Instrumentos de aplicación de normas ambientales*.
- Ley de prevención y control de contaminación ambiental (2004). *Capítulo II.- De la prevención y control de la contaminación de las aguas*.
- López, D. (2012). *Aprovechamiento del lechuguin (Eichhornia Crassipes) para la generación de abono orgánico mediante la utilización de tres diseños diferentes de biodigestores*. Cuenca, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.

- Lowe, S. (2010). *100 de las especies exóticas invasoras más dañinas del mundo: una selección del Global Invasive Species Database*. Unión internacional para la conservación de la naturaleza.
- MAE. (2013). *Procesos de una extractora de aceite de palma*. Recuperado 12 de diciembre de 2014 de: <http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/03/PART11.pdf> – DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESOS EN UNA EXTRACTORA
- MAGAP. (2012). *Informe situacional de la cadena de palma africana en el Ecuador*. Subsecretaria de comercialización. Recuperado el 30 de septiembre de 2014 de: <http://sinagap.agricultura.gob.ec/phocadownloadpap/Comercializacion/Boletines/palma/Boletin%20Palma%202012.pdf>.
- Ministerio del Ambiente (2015). *Sustituyese el libro VI del texto unificado de legislación secundaria*. Acuerdo ministerial No. 061.
- Mongkon, T. Patcharee, Santibhab, P. Sultipong, P. (2003). *Vetiver grass research: Primary management of wastewater from community*. Vetiver y agua. Guangzhou, República Popular de China.
- Obando, J. (2006). *Estanques de Jacinto de agua (Eichhornia crassipes) para el tratamiento de residuos industriales*. España: Universidad del valle.
- Reyes, S. (2012). *Estrategia ambiental en el manejo de efluentes en la extracción de aceite de palma*. Maracaibo, Venezuela: Telos.
- Rolim, S. (2000). *Sistemas de lagunas de estabilización. Cómo utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de riego*, McGraw Hill, Institute of Technology. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana.
- Santibáñez, C. (2011). *Modernización e Integración Transversal de la enseñanza de Pregrado en Ciencias de la Tierra*. Región Metropolitana de Santiago, Chile: Universidad de Chile.
- Scavo, M. Rodríguez, O. (2012). *Estudio de un sistema de tratamientos de aguas residuales complementario, con pasto vetiver (VETIVERIA ZIZANIODES L.), provenientes de una planta de producción de gaseosas*. Estado Aragua, Venezuela.

- Smeal, C. Hackett, M. Truong, P. (2003). *Vetiver system for industrial wastewater treatment in Queensland, Australia*. Tercera conferencia internacional y exhibición. Vetiver y agua. Guangzhou, República Popular de China.
- Tolosa, H. (2012) *Plantas y Hongos de la provincia de Buenos Aires*. Buenos Aires, Argentina.
- Torres, S. (2009). *Estudio de aprovechamiento del lechuguín Eichhornia crassipes, del embalse de la represa Daniel Palacios como biosorbente de metales pesados en el tratamiento de aguas residuales*. Tesis de Ingeniero Ambiental. Cuenca, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.
- Vargas, W. (2010). *Siglo XXI: ¿El agua es un recurso natural renovable?:* Redesma
- Vyzmazal, J. (2008) *Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: A review*. Ecological Engineering, Republica Checa: Cezch University of life sciences Prague.
- Wagner, S. Trong, P. Vieritz, A. Smeal, C. (2003). *Response of vetiver grass to extreme nitrogen and phosphorus supply*. Tercera conferencia internacional y exhibición. Vetiver y agua. Guangzhou, República Popular de China.
- Zarela, G. (2012). *Comparación y evaluación de tres plantas acuáticas para determinar la eficiencia de remoción de nutrientes en el tratamiento de aguas residuales domésticas*. Tesis de Ingeniero Sanitario. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.

ANEXOS

ANEXO 1**Registro Fotográfico de la distribución del experimento**



ANEXO 2

Resultados de Laboratorio



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
OFERTA DE SERVICIOS Y PRODUCTOS

LABORATORIO DE QUÍMICA AMBIENTAL
INFORME DE RESULTADO

SP-LAB-QQA-10138
ORDEN DE TRÁFICO No 10012

SOLICITADO POR:	COMTE INVITADO
DIRECCIÓN:	TUVEAJO
FECHA DE RECEPCIÓN:	28/05/14
HORA DE RECEPCIÓN:	14H14
MUESTRA DE:	AGUA
DESCRIPCIÓN:	AGUA RESIDUAL DE EXTRACTORA DE PALMOS AFRICANOS
FECHA DE ANÁLISIS:	DEL 28/05 AL 07/07/14
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS A LA SECRETARÍA:	14/07/14
CARACTERÍSTICAS DE LAS MUESTRAS:	TURBIO
ESTADO:	LÍQUIDO
CONTENIDO:	4 LITROS
MUESTREADO POR:	S. CUEVA
OBSERVACIONES:	Los resultados que aparecen en el presente informe se refieren a la muestra tomada para el análisis y entregada al personal técnico del QAF.

INFORME

PARÁMETRO	UNIDADES	RESULTADOS	MÉTODO
SUSTANCIAS SOLUBLES EN HEXANO (ACEITES Y GRASAS)	mg/l	5.0	MAVI-40 / APHA5520 G MODIFICADO
CO ₂	mgO ₂ /l	73	MAVI-28 / APHA5210 G MODIFICADO
CO ₃	mgO ₂ /l	298	MAVI-28a / COLORIMÉTRICO (NIPRO) MODIFICADO
FOSFORO TOTAL	mg/l	26.4	MAVI-17/APHA 4500-P 2 y/o CY E MODIFICADO
NITROGENO TOTAL	mg/l	158	MAVI-45 / COLORIMÉTRICO NITROX



Los análisis marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del CAE.
NOTA: LA FECHA DE LA RECEPCIÓN CORRESPONDE A LA FECHA EN LA QUE SE EMITE LA FACTURA.

BIBI ALICIA CUEVA
JEFE DE QUÍMICA AMBIENTAL

1 / 1

RAM-6.1-04





UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
OFERTA DE SERVICIOS Y PRODUCTOS

LABORATORIO DE QUÍMICA AMBIENTAL
INFORME DE RESULTADO

INF-LAB-QAM-40125
ORDEN DE TRABAJO No 46025

SOLICITADO POR: CORTES SANTIAGO
DIRECCIÓN: TUMBACO
FECHA DE RECEPCIÓN: 12/01/15
HORA DE RECEPCIÓN: 11H25
MUESTRA DE: AGUA
DESCRIPCIÓN: TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL
FECHA DE ANÁLISIS: DEL 12/01 AL 26/01/15
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS A LA SECRETARÍA: 02/02/15
CARACTERÍSTICAS DE LAS MUESTRAS: TURBIA/CLARO
ESTADO: LÍQUIDO
CONTENIDO: 7 LITROS
MUESTREO POR: EL CLIENTE
OBSERVACIONES: Los resultados que constan en el presente Informe se refieren a la muestra tomada por el cliente y entregado al personal técnico del OSP.

INFORME

PARÁMETRO	MUESTRA	UNIDADES	RESULTADOS	MÉTODO
DSO5	1	mgO ₂ /l	51	MAM-55 / APHAS210 B MODIFICADO
DSO5	2	mgO ₂ /l	60	MAM-55 / APHAS210 B MODIFICADO
DSO5	3	mgO ₂ /l	46	MAM-55 / APHAS210 B MODIFICADO
DSO5	4	mgO ₂ /l	37	MAM-55 / APHAS210 B MODIFICADO
DSO5	5	mgO ₂ /l	64	MAM-55 / APHAS210 B MODIFICADO
DSO5	6	mgO ₂ /l	62	MAM-55 / APHAS210 B MODIFICADO
DSO5	7	mgO ₂ /l	71	MAM-55 / APHAS210 B MODIFICADO



LABORATORIO DE QUÍMICA AMBIENTAL
NOTA: LA FECHA DE LA RECEPCIÓN CORRESPONDE A LA FECHA EN LA QUE SE EMITE LA FACTURA


BIO. Alicia Cepa
JEFE DE QUÍMICA AMBIENTAL

1 / 2

RAM-4.2-04



Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gatto Subral - Teléfonos: 2502-262 / 2502-456, ext. 15, 18, 21, 31, 33



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
OFERTA DE SERVICIOS Y PRODUCTOS

LABORATORIO DE QUÍMICA AMBIENTAL
INFORME DE RESULTADO

INF-LAB-QAM-42727
ORDEN DE TRABAJO No 42713

SOLICITADO POR:	CORTES SANTIAGO
DIRECCIÓN:	TUMBACO
FECHA DE RECEPCIÓN:	17/02/15
HORA DE RECEPCIÓN:	15:20
MUESTRA DE:	AGUA
DESCRIPCIÓN:	TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL
FECHA DE ANÁLISIS:	DEL 17/02 AL 01/03/15
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS A LA SECRETARÍA:	10/02/15
CARACTERÍSTICAS DE LAS MUESTRAS:	TURBIA/CLARO
ESTADO:	LÍQUIDO
CONTENIDO:	7 LITROS
MUESTREO POR:	EL CLIENTE
OBSERVACIONES:	Los resultados que constan en el presente informe se refieren a la muestra tomada por el cliente y entregado al personal técnico del OSP.

INFORME

PARÁMETRO	MUESTRA	UNIDADES	RESULTADOS	MÉTODO
DBO5	1	mgO ₂ /l	48	MAM-38 / APHAS210 8 MODIFICADO
DBO5	2	mgO ₂ /l	40	MAM-38 / APHAS210 8 MODIFICADO
DBO5	3	mgO ₂ /l	58	MAM-38 / APHAS210 8 MODIFICADO
DBO5	4	mgO ₂ /l	54	MAM-38 / APHAS210 8 MODIFICADO
DBO5	5	mgO ₂ /l	59	MAM-38 / APHAS210 8 MODIFICADO
DBO5	6	mgO ₂ /l	55	MAM-38 / APHAS210 8 MODIFICADO
DBO5	7	mgO ₂ /l	63	MAM-38 / APHAS210 8 MODIFICADO



LABORATORIO
SERVICIOS

* Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del OAE*

NOTA: LA FECHA DE LA RECEPCIÓN CORRESPONDE A LA FECHA EN LA QUE SE EMITE LA FACTURA



Bióg. Alicia Cepa
JEFE DE QUÍMICA AMBIENTAL

1 / 1

RAM-4.1-04



ANEXO 3

Normativa de descargas de efluentes a un cuerpo de agua o receptor:
 Agua dulce y agua marina. TEXTO UNIFICADO DE LEGISLACIÓN
 SECUNDARIA MEDIO AMBIENTAL LIBRO VI Anexo I



PRESIDENCIA DE LA REPUBLICA

Parámetros	Expresado como	Unidad	Limite máximo permisible
Aceites y Grasas.	Sustancias solubles en hexano	mg/l	0,3
Alkil mercurio		mg/l	No detectable
Aldehidos		mg/l	2,0
Aluminio	Al	mg/l	5,0
Arsénico total	As	mg/l	0,1
Bario	Ba	mg/l	2,0
Boro total	B	mg/l	2,0
Cadmio	Cd	mg/l	0,02
Cianuro total	CN ⁻	mg/l	0,1
Cloro Activo	Cl	mg/l	0,5
Cloroformo	Extracto carbón cloroformo ECC	mg/l	0,1
Cloruros	Cl ⁻	mg/l	1 000
Cobre	Cu	mg/l	1,0
Cobalto	Co	mg/l	0,5
Coliformes Fecales	Nmp/100 ml		⁸ Remoción > al 99,9 %
Color real	Color real	unidades de color	* Inapreciable en dilución: 1/20
Compuestos fenólicos	Fenol	mg/l	0,2
Cromo hexavalente	Cr ⁺⁶	mg/l	0,5
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	D.B.O ₅ .	mg/l	100
Demanda Química de Oxígeno	D.Q.O.	mg/l	250
Dicloroetileno	Dicloroetileno	mg/l	1,0
Estaño	Sn	mg/l	5,0
Fluoruros	F	mg/l	5,0
Fósforo Total	P	mg/l	10

Continuación...

TABLA 12. Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Nitrógeno Total Kjeldahl	N	mg/l	15
Organoclorados totales	Concentración de organoclorados totales	mg/l	0,05
Organofosforados totales	Concentración de organofosforados totales.	mg/l	0,1
Plata	Ag	mg/l	0,1
Plomo	Pb	mg/l	0,2
Potencial de hidrógeno	pH		5-9
Selenio	Se	mg/l	0,1
Sólidos Sedimentables		ml/l	1,0
Sólidos Suspendidos Totales		mg/l	100
Sólidos totales		mg/l	1 600

ANEXO

Registro de datos en parámetros físicos

1ra SEMANA															
Unidades Experimentales															
Parametro/Día	No 1		No 2		No 3		No 4		No 5		No 6		No 7		UNIDADES
	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	
Turbidez	-	60.4	-	54.7	-	58.4	-	79.8	-	81.3	-	73.2	-	68.1	NTU
Conductividad	-	254	-	245	-	263	-	514	-	581	-	602	-	585	μS
pH	-	7.25	-	7.1	-	7.14	-	7.21	-	7.32	-	7.18	-	7.25	-

2da SEMANA															
Unidades Experimentales															
Parametro/Día	No 1		No 2		No 3		No 4		No 5		No 6		No 7		UNIDADES
	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	
Turbidez	63.7	58.7	62.4	60.9	45.7	49.9	82.2	77.5	75.4	80	68.4	69.7	75.4	72.9	NTU
Conductividad	219	268	265	233	255	274	504	521	573	562	608	620	598	581	μS
pH	7.17	7.14	7.21	7.1	7.2	7.32	7.21	7.17	7.18	7.15	7.19	7.11	7.31	7.26	-

3ra SEMANA															
Unidades Experimentales															
Parametro/Día	No 1		No 2		No 3		No 4		No 5		No 6		No 7		UNIDADES
	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	
Turbidez	42.4	49.7	52.1	47.5	34.6	42.1	59.7	51.4	68.1	58.3	57.4	49.2	65.7	70.1	NTU
Conductividad	187	196	212	206	198	176	498	479	518	532	536	576	583	567	μS
pH	7.21	7.25	7.15	7.1	7.28	7.14	7.25	7.21	7.14	7.32	7.17	7.18	7.14	7.25	-

4ta SEMANA															
Unidades Experimentales															
Parametro/Día	No 1		No 2		No 3		No 4		No 5		No 6		No 7		UNIDADES
	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	
Turbidez	19.1	25.7	31.2	24.5	17.5	15	22.6	20.7	29.8	34.7	35.1	29.3	49.7	57.4	NTU
Conductividad	125	112	175	143	112	143	475	468	487	504	520	498	576	544	μS
pH	7.17	7.14	7.17	7.21	7.2	7.32	7.21	7.17	7.18	7.15	7.17	7.11	7.31	7.26	-

5ta SEMANA															
Unidades Experimentales															
Parametro/Día	No 1		No 2		No 3		No 4		No 5		No 6		No 7		UNIDADES
	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	
Turbidez	8.45	7.87	16.4	9.68	8.14	10.4	19.8	21.6	24.7	35.5	15.9	26.2	39.8	48.1	NTU
Conductividad	82.4	89.7	71.8	78.4	82.5	91.4	468	421	447	432	504	522	547	598	μS
pH	7.3	7.25	7.15	7.1	7.28	7.14	7.25	7.21	7.14	7.32	7.1	7.18	7.14	7.25	-

6ta SEMANA															
Unidades Experimentales															
Parametro/Día	No 1		No 2		No 3		No 4		No 5		No 6		No 7		UNIDADES
	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	
Turbidez	6.23	4.84	8.74	5.63	7.12	8.52	14.2	13.2	12.1	14.7	17.2	16.2	36.5	33.1	NTU
Conductividad	84.4	83.3	69.9	72.9	86.4	80.4	459	463	440	455	493	533	566	549	μS
pH	7.17	7.14	7.21	7.1	7.2	7.32	7.21	7.17	7.18	7.15	7.19	7.11	7.31	7.26	-

7ma SEMANA	Unidades Experimentales															UNIDADES
	No 1		No 2		No 3		No 4		No 5		No 6		No 7			
	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2		
Parametro/Día																
Turbidez	2.39	2.34	2.77	3.72	3.12	3.54	17.6	14.7	22.1	20.5	12.1	17.8	40.5	35.1		NTU
Conductividad	62.4	66.4	64.4	78	71.1	68.9	475	454	442	437	496	548	559	563		μS
pH	7.14	7.19	7.21	7.17	7.1	7.14	7.2	7.18	7.12	7.28	7.16	7.23	7.21	7.17		-

8va SEMANA	Unidades Experimentales															UNIDADES
	No 1		No 2		No 3		No 4		No 5		No 6		No 7			
	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2		
Parametro/Día																
Turbidez	2.43	2.87	2.42	2.78	3.59	3.14	21.1	18.7	16.5	14.1	10.4	15.4	34.7	47.7		NTU
Conductividad	57.7	62.1	58.4	73.8	66.9	65.1	435	427	458	465	566	561	572	510		μS
pH	7.28	7.19	7.29	7.18	7.21	7.14	7.3	7.17	7.35	7.18	7.25	7.2	7.21	7.14		-

9na SEMANA	Unidades Experimentales															UNIDADES
	No 1		No 2		No 3		No 4		No 5		No 6		No 7			
	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2		
Parametro/Día																
Turbidez	4.1	2.98	2.8	3.1	2.53	3.9	8.96	7.5	7.43	8.42	9	10.7	28.4	35.2		NTU
Conductividad	64.5	60.2	57.1	67.3	57.8	59.7	470	453	510	542	525	549	571	590		μS
pH	7.28	7.19	7.29	7.12	7.21	7.3	7.3	7.24	7.35	7.13	7.25	7.17	7.21	7.25		-

10ma SEMANA	Unidades Experimentales															UNIDADES
	No 1		No 2		No 3		No 4		No 5		No 6		No 7			
	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2		
Parametro/Día																
Turbidez	3.52	3.12	2.98	2.59	2.94	3.12	8.42	8.97	7.95	7.28	10.2	9.16	32.4	31.1		NTU
Conductividad	59.7	57.8	60.2	64.7	67.3	57.1	420	467	527	518	536	552	598	559		μS
pH	7.14	7.32	7.17	7.18	7.14	7.25	6.7	7.21	7.14	7.32	7.1	7.18	7.14	7.25		-

11va SEMANA	Unidades Experimentales															UNIDADES
	No 1		No 2		No 3		No 4		No 5		No 6		No 7			
	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2		
Parametro/Día																
Turbidez	2.97	3.91	3.42	2.71	3.87	2.51	9.6	8.42	7.51	6.98	8.78	9.87	36.5	31.7		NTU
Conductividad	58.8	60.1	63.3	62.5	65.9	60.2	458	431	510	531	542	549	602	576		μS
pH	7.3	7.17	7.35	7.18	7.25	7.2	7.17	7.18	7.15	7.17	7.11	7.31	7.26	7.1		-

12va SEMANA	Unidades Experimentales															UNIDADES
	No 1		No 2		No 3		No 4		No 5		No 6		No 7			
	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2	DIA 1	DIA 2		
Parametro/Día																
Turbidez	3.18	4.1	3.56	4.5	2.89	3.42	8.26	9.21	7.46	8.41	7.06	7.59	29.4	30.9		NTU
Conductividad	49.9	51.2	58.7	57.2	63.1	64.5	432	445	517	510	529	513	586	598		μS
pH	7.14	7.32	7.1	7.18	7.14	7.25	7.17	7.14	7.21	7.1	7.2	7.32	7.5	6.3		-