



**EVALUACION, A ESCALA EXPERIMENTAL, DE UN HUMEDAL SUBSUPERFICIAL
DE FLUJO HORIZONTAL COMO COMPLEMENTO AL SISTEMA DE
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES EN LA EMPRESA
UNIPALMA S.A. (CUMARAL, META).**

NATALY MOLINA BOCANEGRA

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias Contables Económicas y Administrativas
Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente
Manizales, Colombia
2019

**EVALUACION, A ESCALA EXPERIMENTAL, DE UN HUMEDAL SUBSUPERFICIAL
DE FLUJO HORIZONTAL COMO COMPLEMENTO AL SISTEMA DE
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES EN LA EMPRESA
UNIPALMA S.A. (CUMARAL, META).**

NATALY MOLINA BOCANEGRA

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente

Director:

Ph.D. Ing Agro. Juan Carlos Montoya Salazar

Asesor externo:

Ph.D. Ing Qco. Abelardo Prada Matiz

Línea de Investigación:

Biosistemas Integrados

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias Contables Económicas y Administrativas

Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente

Manizales, Colombia

2019

Dedicatoria

A Dios

Por haberme permitido lograr mis objetivos, por medio de su amor e inmensa generosidad que me da fuerzas y aliento para seguir cumpliendo su propósito y voluntad.

A mi Madre Elsa

Por haberme impregnado de su aliento y ánimo para salir adelante en busca de mi felicidad y de mi superación personal y laboral.

Agradecimientos

Debo agradecer en primer lugar Dios, por permitirme conquistar otro nuevo reto en mi vida, así mismo a mi director de tesis Doctor Juan Carlos Montoya, asesor externo Doctor Abelardo Prada, por sus valiosos consejos y el apoyo en sus asesorías y a Unipalma de los Llanos S.A, por permitirme desarrollar la experimentación del proyecto dentro de sus instalaciones. De igual manera a todos y cada uno de los docentes de las respectivas áreas cursadas durante la Maestría, que me permitieron avanzar cada vez más en el presente trabajo de investigación.

A todos ellos, muchas gracias.

Resumen

Se realizó la evaluación experimental de dos humedales subsuperficiales de flujo horizontal – HSSFH-, de 5 y 0,5 m² de área, como alternativa de reducción de los valores de las características físico-químicas de las aguas residuales de la Empresa UNIPALMA S.A, que superan los exigidos por la Resolución 631 de 2015 de MINAMBIENTE en complemento del sistema actual. La reducción se proyectó por medio de dos estrategias simultáneas: la retención física, físico-química y biológica en la capa inferior de grava, y, la adsorción de la contaminación del agua residual, por el sistema radicular del cultivo de acelga (*Beta vulgaris*), establecido en la capa superior de suelo. La propagación de la acelga en el humedal de 5m² se dificultó por condiciones climáticas. En el humedal de 0,5 m² el cultivo desarrolló un sistema radicular adventicio que no penetra la capa de suelo, no contacta con las aguas residuales y, por tanto, no se da la retención de contaminantes. Los resultados obtenidos no permiten considerar a la acelga cultivada en los humedales en condiciones similares a las del trabajo realizado, como herramienta para la reducción de contaminantes de las aguas residuales de la extracción de aceite de palma.

Palabras Claves: Extracción de aceite de palma. Aguas residuales. Humedal subsuperficial de flujo horizontal. Cultivo de acelga (*Beta vulgaris*). Retención de DQO, DBO, Cloruros, nitrógeno y fósforo.

Abstract.

The experimental evaluation was carried out of two subsurface wetlands of horizontal flow – HSSFH-, of 5 and 0.5 m² of area, as an alternative of reduction of the values of the physical-chemical characteristics of the wastewater of the company Unipalma S. A, exceeding those demanded by MINAMBIENTE resolution 631 of 2015 in addition to the current system. The reduction was projected by means of two simultaneous strategies: Physical, physical-chemical and biological retention in the lower gravel layer, and, the adsorption of residual water contamination, by the root system of the chard culture (*Beta vulgaris*), Established in the upper layer of soil. The propagation of the chard in the wetland of 5m² is difficult by climatic conditions. In the wetland of 0.5 m² the crop developed an adventitious root system that does not penetrate the soil layer, does not contact sewage and therefore no pollutant retention is given The results obtained do not allow to consider the chard cultivated in the wetlands in conditions similar to those of the work carried out, as a tool for the reduction of contaminants of the sewage from the extraction of palm oil.

Key words: Palm oil extraction. Effluent. Subsurface horizontal flow wetland. Cultivation of Chard (*Beta vulgaris*). Retention of COD, BOD, Chlorides, nitrogen and phosphorus

Contenido.

Dedicatoria	1
Resumen	3
1. Capítulo. Marco Teórico de Referencia.....	17
1.1. Producción de palma, economía y ambiente.....	17
1.2. Producción de palma en Colombia y consumo de agua	17
1.3. Elementos básicos de la contaminación de las aguas residuales.	18
1.4. Métodos de tratamiento de las aguas residuales de la extracción de aceite de palma.	20
1.5. Métodos de tratamiento de las aguas residuales de la extracción de aceite de palma en Colombia.....	21
1.6. Alternativas al tratamiento tradicional de las aguas residuales de la extracción de aceite de palma.....	23
1.7. Objetivo General.....	28
1.8. Objetivos Específicos.....	29
2. Capítulo. Materiales y Métodos.	30
2.1. Tipo de proyecto.	30
2.2. Ubicación del proyecto.	30
2.3. Objeto de estudio.	31

2.4. Evaluación del funcionamiento de los humedales subsuperficiales de flujo horizontal de 5,0 y 0,5 m ² de área.....	36
2.5. Establecimiento y evaluación del cultivo de acelgas (<i>Beta vulgaris</i>) en los humedales subsuperficiales de flujo horizontal de 5,0 y 0,5 m ² de área.....	38
2.6. Procesamiento de datos y evaluación de resultados.	41
3. Capítulo. Resultados y Discusión.	43
3.1. Ensayos con el objeto de estudio inicial – humedal de 5 m ² de área.	43
3.2. Ensayos en el humedal de 0,5 m ² de área.	47
3.3. Alternativa de posible reducción de la contaminación de aguas residuales, por medio de humedales subsuperficiales de flujo horizontal.	57
4. Capítulo. Conclusiones y Recomendaciones.....	59
4.1. Conclusiones.....	59
4.2. Recomendaciones	60
5. Capítulo. Anexos	61
Bibliografía.....	63

Lista de Figuras

Figura 1.1. Esquema del humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal.	24
Figura 2.1 Mapa de Ubicación del humedal subsuperficial experimental implementado como complemento al sistema de tratamiento de aguas residuales.	30
Figura 2.2 Esquema del sistema de tratamiento de aguas residuales con el humedal experimental incluido (Sin escala).	31
Figura 2.3 Descarga del lecho de grava en el humedal subsuperficial experimental implementado de 5 m ² de área.	32
Figura 2.4 Descarga del lecho de suelo en el humedal subsuperficial experimental implementado de 5m ² de área.	33
Figura 2.5 Adecuación del terreno del humedal de 5 m ² para la siembra de las plántulas de acelga	33
Figura 2.6 Experiencia de propagación del cultivo de acelga en la zona del piedemonte llanero, municipio de Acacías, Meta.....	34
Figura 2.7 Esquema del humedal artificial subsuperficial de flujo subsuperficial de 0,5 m ² de área (Sin escala).	35
Figura 2.8 Vista general del humedal subsuperficial experimental de 0,5 m ² de área.	36
Figura 2.9 Evolución del cultivo de acelgas en humedal subsuperficial de 5 m ²	40
Figura 2.10 Evolución del cultivo de acelgas en humedal subsuperficial de 0,5 m ²	41
Figura 3.1 Vista general del humedal subsuperficial de 5 m ² de área luego de un aguacero.....	46
Figura 3.2 Sistema de raíces adventicias desarrollado por las plántulas de Acelga (<i>Beta vulgaris</i>) en lecho de suelo del humedal de 0,5 m ² de área.....	54

Lista de gráficas

Grafica 3.1 Balance hídrico. Piedemonte del departamento del Meta a octubre 2018.	45
Grafica 3.2 Brillo Solar. Piedemonte del departamento del Meta a octubre 2018.	45
Grafica 3.3 Valores del pH de las aguas residuales a la Entrada y salida del lecho del humedal subsuperficial experimental de 0,5 m ² de área.....	50
Grafica 3.4 Valores de los sólidos suspendidos totales de las aguas residuales a la Entrada y salida del humedal subsuperficial experimental de 0,5 m ² de área.....	52
Grafica 3.5 Valores de los cloruros de las aguas residuales a la Entrada y salida del lecho del humedal subsuperficial experimental de 0,5 m ² de área.....	53
Grafica 3.6 Valores de la demanda química de oxígeno DQO de las aguas residuales a la Entrada y salida del lecho del humedal subsuperficial experimental de 0,5 m ² de área.....	55

Lista de Anexos

Anexo 5.1 Resultados de Análisis del Suelo del Humedal.....	61
Anexo 5.2 Resultados del Análisis de Suelo del Testigo	62

Lista de Tablas

Tabla 0.1 Valores de las características físico-químicas de las aguas efluentes del sistema de tratamiento de la Empresa UNIPALMA (noviembre 2017) y de la resolución 631 de 2015 de Minambiente.	11
Tabla 0.2 Análisis fisicoquímicos de las aguas residuales. Sistema tratamiento aguas residuales. UNIPALMA S.A. Período 2007-2016.....	12
Tabla 0.3 Valores calculados de las cargas contaminantes, mínima, promedio y máxima para el nitrógeno, el fósforo y los cloruros a diferentes valores de caudal. Sistema tratamiento aguas residuales. UNIPALMA S.A. Promedio histórico 2007-2016.	14
Tabla 2.1 Actividades adelantadas en la construcción del humedal subsuperficial de 5 m ² de área.....	32
Tabla 2.2 Parámetros de evaluación y técnicas de medición. Humedal de 5 m ² de área.....	37
Tabla 2.3 Parámetros de evaluación y técnicas de medición. Humedal de 0,5 m ² de área.....	38
Tabla 2.4 Plan implementación del cultivo de acelga.....	39
Tabla 3.1 Niveles de precipitación en el piedemonte metense en los años 2017- 2018.	44
Tabla 3.2 Resultados generales de la evaluación de las aguas residuales al paso por el humedal subsuperficial de 0,5 m ² de área. Caudal 230 l/día.	48
Tabla 3.3 Procesamiento de datos y cálculo del nivel de retención para los parámetros estudiados en el humedal subsuperficial de 0,5 m ² de área.	49

Lista de Abreviaturas.

AR: aguas residuales.

ARD: aguas residuales domésticas.

ARI: aguas residuales industriales

Mm³/año: millones de metros cúbicos año.

g/m³: gramo por metros cúbico, equivalente a mg/L. Unidades para medir la concentración de contaminantes de las aguas residuales.

mg/L: miligramo por litro, equivalente a g/m³. Unidades para medir la concentración de contaminantes de las aguas residuales.

pH: Parámetro que muestra la relación entre las sustancias de carácter ácido y las de carácter alcalinas presentes en una muestra de agua residual.

DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno. Parámetro que representa la materia orgánica degradable por métodos químicos y biológicos, presente en el agua residual. Se valora en miligramos de oxígeno por litro (mg O₂/L).

DQO: Demanda Química de Oxígeno. Parámetro que representa la materia orgánica total, degradable por métodos químicos y biológicos, y, la materia orgánica no degradable, presente en el agua residual. Se valora en miligramos de oxígeno por litro (mg O₂/L).

HSSFH: humedal subsuperficial de flujo horizontal.

HSSFV: humedal subsuperficial de flujo vertical

STAR: Sistema de tratamiento de aguas residuales.

SST: Sólidos Suspendidos Totales - Este parámetro muestra el nivel de transparencia del agua en estudio. Se valora en miligramos por litro (mg/L).

Introducción

Las aguas residuales, como subproducto de los procesos de extracción de aceite de palma de la empresa **PLANTACIONES UNIPALMA DE LOS LLANOS S. A, -UNIPALMA S.A. -** en **CUMARAL, Meta, Colombia**, no cumplen con la Resolución 631 de 2015 **MINAMBIENTE**, en razón de los altos valores de las características físico-químicas de conformidad con los datos de la **Tabla 0.1.**, lo que se convierte en una situación de alta responsabilidad para la Empresa.

Tabla 0.1 Valores de las características físico-químicas de las aguas efluentes del sistema de tratamiento de la Empresa UNIPALMA (noviembre 2017) y de la resolución 631 de 2015 de Minambiente.

Parámetro	Caudal (l/s)	Temp. (°C)	pH, (unidades)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	Grasas y aceites (mg/L)	Cloruros mg/l	Sulfatos (mg/l)	Nitrógeno total, (mg/L)	Fósforo Total, mg/L	SST (mg/L)
Tecno Ambiental 2017	4,32	31,95	8,39 a 8,57	199	1923	6,7	726	8	240	26,10	151
Resolución 631/2015 MINAMB	NA	40	6 - 9	600	1500	20	500	500	NA	NA	400

Fuente: (Tecnoambiental, Informe caracterización aguas residuales industriales y superficiales de Unipalma S.A., 2017).

Los valores de las características comunes de las aguas residuales de la industria extractora de aceite de palma en general son suficientemente altos, y, en consecuencia, se les cataloga como aguas de alta carga contaminante.

Tradicionalmente estas aguas han sido procesadas por medio del lagunaje como sistema de tratamiento. Los denominados STAR de la industria palmera – Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales, convalidados por las normas anteriores a la Resolución 631 de 2015, hoy en vigencia. Los STAR lograban niveles de retención que garantizaban el cumplimiento de las exigencias de la norma en su momento, sin embargo, en la actualidad no garantizan el ajuste del valor de las características de las aguas residuales – AR- en la actualidad, como lo muestran los datos históricos de la **Tabla 0.2**.

Tabla 0.2 Análisis fisicoquímicos de las aguas residuales. Sistema tratamiento aguas residuales. UNIPALMA S.A. Período 2007-2016.

Año		2007-2	2008-1	2008-2	2009-1	2009-2	2010-1	2010-2	2010-3	2011	2014	2015	2016	Promedio
pH	Entrada	4,5	4,5	4,3	4,5	4,7	4,3	4,2	4,7	5,3	4,3	4,2	4,5	4,5
	Salida	8,2		8,4	8,5	8,1	8,5	6,3	8,5	8,0	8,0	8,3	8,1	8,1
Caudal (L/s)	Entrada	7,0	8,7	10,6	4,6	3,3	4,8	13,3	3,5	6,7	15,5	5,8	7,6	7,6
	Salida	5,8	NSD	16,2	7,8	1,1	2,0	1,7	3,0	2,4	0,7	2,7	4,3	4,3
DBO-5 (mg/L)	Entrada	39283,0	23583,0	51627,0	23050,0	13416,0	9150,0	32625,0	35100,0	31830,0	764,0	32350,0	26045,3	26045,3
	Salida	187,0	NSD	134,0	325,0	500,0	212,0	548,0	132,0	973,0	369,0	208,0	375,6	375,6
DQO (mg/L)	Entrada	52800,0	67200,0	66240,0	34240,0	43040,0	18400,0	41569,0	57936,0	55144,0	74256,0	64456,0	51082,5	51082,5
	Salida	1008,0	NSD	688,0	1280,0	1504,0	1136,0	863,0	659,0	2263,0	2747,0	1852,0	1349,8	1349,8
Sólidos Suspendidos (mg/L)	Entrada	37600,0	33000,0	22367,0	22300,0	6200,0	1990,0	27725,0	65822,0	18460,0	49156,0	39100,1	28462,0	28462,0
	Salida	753,0	NSD	219,0	645,0	570,0	535,0	3090,0	420,0	1017,0	341,0	302,0	843,3	843,3
Grasas y Aceites (mg/L)	Entrada	1566,3	733,0	1098,0	852,0	1256,9	542,3	498,0	94280,0	16793,0	2910,0	832,1	12053,0	12053,0
	Salida	0,7	NSD	0,8	1,2	0,8	2,0	40,0	42,0	52,0	29,0	15,9	17,4	17,4
Temperatura (°C)	Entrada	50,0	53,0	49,0	54,0	47,0	49,0	50,7	52,7	58,0	44,8	66,2	50,8	50,8
	Salida	27,2	NSD	27,8	31,8	29,5	28,4	25,4	27,7	26,2	30,4	28,2	28,3	28,3

Fuente: Tomado y adaptado de: (Unipalma , 2016)

Al revisar los datos históricos (**Tabla 0.2**) de los valores de las características de las aguas residuales de la Empresa Unipalma, se puede puntualizar en lo siguiente:

1. Los valores del pH, los Sólidos Suspendidos totales, los sulfatos y las Grasas y Aceites se ajustan plenamente a las exigencias de la norma y se constituyen en un hecho positivo en favor del sistema STAR en funcionamiento.

2. Los contenidos de la DBO cumplen con la exigencia de la norma, pero los de la DQO no, además las AR pueden ser catalogadas como aguas de baja degradabilidad, en razón que la relación DBO/DQO no llega al 28%, en el promedio histórico, y, en la medición de finales de 2017, apenas supera el 10%. Por tanto, es necesario reducir de manera sensible los valores de la DQO.

3. Para el nitrógeno y el fósforo en aguas residuales de la industria extractora de aceite de palma, la Resolución 631 de Minambiente no establece valores admisibles o máximos, cualquier contenido puede descargarse sin ninguna limitación. Sin embargo, estos dos elementos son nutrientes de amplio espectro que pueden ser asimilados por un amplio número de especies vegetales (Villareal Maury , 2013). En consecuencia, la descarga indiscriminada al suelo puede llevar a la proliferación de plantas no deseadas o que compitan con los cultivos en la producción agrícola, por tanto, se necesita diferenciar con precisión el posible reúso que se le vaya dar a las aguas residuales.

4. Los cloruros, por el contrario, sólo se requieren en pequeñas dosis para la mayoría de los cultivos, contenidos mayores suelen ser tóxicos para un elevado número de plantas (Mata, Rodríguez, ML, López, & Vela, 2014). Sin embargo, se conoce un pequeño grupo de cultivos que asimilan altas dosis de cloruros: la caña de azúcar, la remolacha azucarera, el coco común, el

algodón y las acelgas (Hi-Cal, 2016). Esta última consideración reviste especial importancia, dado que son ampliamente reconocidas las dificultades que se presentan para atrapar cloruros en la práctica del tratamiento de aguas (Boluda Botella & Martínez Moya, 2017); (Kemmer, 1983); (Jarava Galván & Planeta Barros, 2017).

5. La magnitud de las posibles cargas contaminantes, mínima, promedio y máxima que contienen las aguas residuales en estudio se puede apreciar al comparar los valores que se presentan en la **Tabla 0.3** De conformidad con los cálculos realizados la descarga máxima anual de fósforo se acerca a 5,0; la de nitrógeno a 30,0 y la de cloruros a 165,0 Ton. Estas cifras demandan la necesidad de reutilizar adecuadamente las dos primeras especies y de reducir la tercera para evitar los múltiples problemas que puede generar en el ambiente natural próximo.

Tabla 0.3 Valores calculados de las cargas contaminantes, mínima, promedio y máxima para el nitrógeno, el fósforo y los cloruros a diferentes valores de caudal. Sistema tratamiento aguas residuales. UNIPALMA S.A. Promedio histórico 2007-2016.

Valor	Caudal, l/s	Carga contaminante					
		Nitrógeno,		Fósforo,		Cloruros,	
		kg/día	Ton/año	kg/día	Ton/año	kg/día	Ton/año
Min.	4,3	48,7	17,8	7,9	2,9	271,9	99,1
<u>Prom</u>	5,7	64,6	23,6	10,5	3,8	360,0	131,4
Max	7,1	80,4	29,4	13,0	4,8	449,0	164,9

Con base en las consideraciones expuestas se puede concluir que para el mejoramiento de la calidad de las aguas residuales efluentes del STAR de Unipalma se requiere de un sistema que

actuó en dos direcciones: **Primero**, que permita reducir de manera significativa los valores de la DQO, ajustándolos a la norma vigente y mejorar la relación DBO/DQO. **Segundo**, que retenga nitrógeno y fósforo por medio de la introducción, en el sistema, de especies vegetales que los utilicen como nutrientes, pero que, prioritariamente, presenten alta afinidad a los cloruros, dada la toxicidad que éstos últimos representan para un elevado número de plantas (Mata, Rodríguez, ML, López, & Vela, 2014).

Esta situación, en consecuencia, dictamina la necesidad de buscar alternativas tecnológicas que permitan encontrar un **complemento** al sistema STAR, dada la elevada inversión que ha implicado su implementación y que, a pesar de no cumplir plenamente con los requerimientos de ley, sirve de barrera preliminar en la retención de los contaminantes presentes en las aguas residuales como la DBO, los sulfatos, los sólidos totales, las grasas y aceites y el ajuste del pH.

En este contexto, los humedales subsuperficiales de flujo horizontal –HSSFH- son una alternativa que amerita ser estudiada, en razón de que su estructura y dinámica de funcionamiento permiten la reducción de los niveles de las características como la DQO por medio de la retención **física**, **físico-química** y **biológica** que se logra en la **capa inferior de grava** y, además, por la **adsorción** de los elementos contenidos en las aguas por el sistema radicular de las plantas del cultivo de especies vegetales que en la **capa superior de suelo** del humedal se implemente (Peña Varón, Ginneken, & Madera P, 2011); (Rivera Vergara, 2015); (Suárez, Agudelo, Rincón, & Millán, 2014). En resumen, este tipo de humedales artificiales orientan su acción en dos direcciones: la **retención general y amplia** de contaminantes en la **capa inferior de grava** y la **adsorción específica** de nutrientes para la especie vegetal cultivada en la capa superior de suelo del humedal.

En este grupo se encuentran los sulfatos, el nitrógeno, el fósforo y los cloruros, entre otros (Villareal Maury , 2013).

Lo expuesto, sirvió de base para que en el presente trabajo se proyectara, por una parte, la evaluación de la capacidad de retención de fósforo, nitrógeno y cloruros por los respectivos cultivos de acelgas, adelantados en las capas superiores de dos humedales subsuperficiales de flujo horizontal - HSSFH-, uno de 5 m² y otro de 0,5 m² de área, y, por la otra parte, las posibilidades de captura de contaminantes generales, tipo DQO, en las capas inferiores de grava de los humedales en mención.

1. Capítulo. Marco Teórico de Referencia.

1.1. Producción de palma, economía y ambiente.

La producción de palma es un renglón de considerable importancia en la economía de países, ubicados en zonas tropicales del globo terráqueo, en particular en países del sudeste asiático como Malasia, Indonesia y Tailandia. Al mismo tiempo, a la par con el desarrollo económico, se ha generado un importante crecimiento de la contaminación ambiental, y, dentro de ella, la descarga de las aguas residuales producto de la extracción del aceite de palma ((Hassan & Suraini Abd-Aziz, 2012); (Muhammad, Azizah, Farah Hannan, & Rizafizah, 2018).

La creciente demanda de aceite de palma de aceite, ha generado, en consecuencia, una creciente producción de aguas residuales, lo que ha llevado a tomar diferente tipo de medidas que incluyen altas tarifas y restricciones a través de normas ambientales que regulan la actividad productiva. Pero también por medio de procesos de investigación que lleven a proponer soluciones a la situación generada (Hassan & Suraini Abd-Aziz, 2012); (Muhammad, Azizah, Farah Hannan, & Rizafizah, 2018).

1.2. Producción de palma en Colombia y consumo de agua

Colombia es el cuarto productor de aceite de palma a nivel mundial. La producción alcanza 2 millones de toneladas de aceite al año y el área cultivada se acerca a 500.000 hectáreas (Fedepalma, 2016); (Ideam, 2014) (Portafolio, 2014). Aunque aún se está muy lejos del primer productor –Indonesia - con 2.000.000 millones de hectáreas cultivadas y 56 millones de toneladas de aceite (Dangond Lacouture, 2014), la producción nacional de aceite de palma es el 1,5 % del PIB y genera del orden de 200.000 empleos al año (Gonzalez, 2014).

Para la extracción del aceite de palma se requieren importantes caudales de agua (Ideam, 2018). De conformidad con los estudios realizados la demanda, para todas las necesidades de producción del sector palmero, alcanza el orden de 825 Mm³/año (Ideam, 2010), (Ideam, 2014). Al tiempo, que en promedio se descarga 0,8 m³ por tonelada de racimos de fruto fresco (Santos, 2007).

En el caso concreto de la Empresa **UNIPALMA S.A.**, el número de hectáreas sembradas alcanza el valor de 5.200 y el consumo de agua la cifra de 578 l/s que equivalen a 18 Mm³/año (Unipalma, 2019)

1.3. Elementos básicos de la contaminación de las aguas residuales.

La contaminación de las aguas residuales se refiere a aquellos elementos que se incorporan al agua captada luego de determinado uso. Para definir y valorar los niveles adquiridos se introducen ciertas características o parámetros. Dentro de estas características químicas y fisicoquímicas se distinguen y destacan las siguientes (Fedepalma, 2011); (Kemmer, 1983):

1.3.1. El pH o Índice de acidez. Este parámetro muestra la relación entre las sustancias de carácter ácido y las de carácter alcalinas presentes en una muestra determinada de agua residual. Si el valor del pH es cercano a 7.0, el agua es neutra; si es superior a 7.0, se le denomina alcalina o básica y si es inferior a 7.0 – ácida. Se mide en unidades.

1.3.2. La temperatura. Muestra la energía calorífica adsorbida por el agua en el proceso de uso. La descarga de aguas a temperaturas, consideradas altas, puede llevar a generar procesos impredecibles en las fuentes y cuerpos receptores. Se determina en grados °C.

1.3.3. La Demanda Química de Oxígeno – DQO. Esta característica representa la materia orgánica total presente en el agua residual, esto es, la materia orgánica, degradable por métodos químicos y biológicos, y la materia orgánica no degradable. Se valora en mgO_2/L .

1.3.4. La Demanda Bioquímica de Oxígeno – DBO. Esta característica representa la materia orgánica degradable presente en el agua residual. Se valora en $\text{mg O}_2/\text{L}$. Se valora en $\text{mg O}_2/\text{L}$. La relación de la DBO y la DQO (DBO/DQO) es un indicador relativo de la degradabilidad de las aguas residuales en estudio.

1.3.5. Las Grasas y Aceites. Esta es una característica específica de la industria palmera, entre otras. Muestra los niveles de estos parámetros en el agua en estudio. La descarga de aguas residuales con altos niveles de grasas y aceites a fuentes hídricas puede interferir de manera importante en los procesos naturales. De manera que su reducción o remoción es muy importante. Se valoran en mg/L .

1.3.6. Sólidos Suspendidos Totales- SST. Este parámetro muestra el nivel de transparencia del agua en estudio. La descarga de aguas residuales con bajos niveles de transparencia a fuentes hídricas puede interferir de manera considerable en los procesos naturales. De manera que la reducción o remoción de los SST es muy importante. Se valoran en mg/L .

1.3.7. El Nitrógeno (N), el Fósforo (P) y los Cloruros (Cl⁻). El nitrógeno y el fósforo son nutrientes de amplio espectro que pueden ser asimilados por un amplio número de especies vegetales (Villareal Maury , 2013); los cloruros, por el contrario, sólo se requieren en pequeñas dosis para la mayoría de los cultivos, de manera que contenidos mayores suele ser tóxicos para un elevado número de plantas (Mata, Rodríguez, ML, López, & Vela, 2014). Se valoran en mg/L .

1.4. Métodos de tratamiento de las aguas residuales de la extracción de aceite de palma.

La esencia de los métodos de tratamiento de las aguas residuales de la extracción de aceite de palma es la de transformar estos desechos de la producción agrícola en recursos aprovechables por medio de procesos biológicos, fisicoquímicos, termoquímicos o procesos combinados (Althausen, 2016).

En términos generales, se han privilegiado los métodos de tratamiento biológico en general, en razón de la facilidad de manejo, relativos bajos costos a largo plazo, aunque exigen largos tiempo de retención métodos físico- y termoquímicos y su eficiencia ha sido cuestionada en los últimos tiempos ((Bello & Abdul Aziz Abdul Raman, 2017); (Zhan Sheng, Sim Yee, Jun Wei, Thongthai, & Chin Kui, 2019).

A pesar de la intensa y amplia prelación que los métodos biológicos, fundamentados en el lagunaje, han recibido, en los últimos tiempos se ha presentado una importante búsqueda de alternativas, orientadas a mejorar la eficiencia y ampliar el espectro de retención de contaminantes. Se conocen experiencias de uso de separación de contaminantes con membranas sintéticas, en las que se lograron remociones de sólidos suspendidos del orden del 72% (Nazatul & Khairul Faezah Md, 2014). De igual manera, se conocen ensayos con reactores de biopelículas de lecho móvil con el propósito de introducir tecnologías de punta y técnicas avanzadas de afinamiento o de las aguas residuales de la extracción de aceite de palma (Siti Nur Hatika Abu Bakar, y otros, 2018). Los métodos combinados de producción de aceites y lípidos microbianos utilizando aguas residuales de la extracción de aceite de palma, de igual manera, ha sido utilizados como una forma de

producir energía y mejorar el estado del ambiente natural (M. Amirul Islam, y otros, 2018); (Wai Yan Cheah, Pau Loke Show, Joon Ching Juan, Jo-Shu Chang, & Tau Chuan Ling, 2018); (Jatta M., Aino-Maija, Perttu E.P., Jo-Shu, & Jaakko A., 2015).

Para concentraciones suficientemente altas de DQO (51.000 mg/L), DBO (25.000 mg/L) y Sólidos Totales (6.000 mg/L) se ha experimentado con la oxidación avanzada con resultados altamente favorables (Bello & Abdul Aziz Abdul Raman, 2017). Las nanopartículas de cobre también han sido utilizadas (Palaniselvam, y otros, 2017), mostrándose como una alternativa de amplio futuro.

La revisión de las tecnologías de posible aplicación en la práctica diaria del tratamiento de las aguas residuales de la industria de la extracción de aceite de palma, muestra importantes oportunidades, sin embargo, aún no han recibido aplicación, unas aún están en la etapa de laboratorio, y, además, se encargan de producir energía o de retener contaminantes por fuera de las prioridades ambientales de los países productores, todos ellos ubicados en el trópico, como es el caso de los cloruros que preocupa de especial manera a los productores de aceite en Colombia, sin descontar los costos de generación e implementación de estas tecnologías que podrían ser difíciles de ser asumidos a nivel de cada país.

1.5. Métodos de tratamiento de las aguas residuales de la extracción de aceite de palma en Colombia.

En Colombia, como ya se hizo alusión, en el tratamiento de las aguas residuales de la extracción de palma de aceite, se han utilizado los denominados STAR – Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales- ampliamente difundidos por las organizaciones del sector (Fedepalma, 2011),

compuestos básicamente por lagunas de oxidación o de estabilización: la **laguna anaeróbica** para la conversión de la materia orgánica de mayor tamaño en lodos y gases en ausencia del aire, de manera que dentro de los productos básicos de esta laguna se encuentran el metano - CH_4 -y el sulfuro de hidrógeno - H_2S ; la **laguna facultativa** que, de igual manera, transforma materia orgánica en condiciones anaeróbicas y genera metano y sulfuro de hidrógeno y - logra con la ayuda del oxígeno de aire, la oxidación y mineralización de otra parte de los componentes de las aguas residuales en tratamiento.

Las aguas efluentes de los STAR cumplieron, hasta antes del año 2015, plenamente con las exigencias de las normas vigentes (decreto 1594/ 1984), decreto que no contemplaba la valoración de características como los cloruros (Cl^-), el fósforo (P) y el nitrógeno (N). Aparece, en estas circunstancias, la Resolución 631 de MINAMBIENTE de 2015 que precisa los valores de los ya contemplados e introduce nuevos que no habían sido normalizados con anterioridad a su expedición.

La Empresa **PLANTACIONES UNIPALMA DE LOS LLANOS S.A**, no escapa a esta situación como ya se mostró en la **Tabla 0.1** de la introducción del presente documento y con mayor amplitud por su cobertura en el tiempo en la **Tabla 0.2** (Unipalma , 2016).

La superación de esta situación se convierte en un importante reto para la Empresa, en razón de los múltiples temas, de índole social, ambiental y socio-ambiental, con los que tiene conexión la actividad productiva que UNIPALMA S. A. adelanta en la actualidad.

Los problemas que se presentan con la calidad de las aguas residuales efluentes de la empresa Unipalma S.A, se detallaron en la introducción del presente trabajo, sin embargo, son de resaltar la baja degradabilidad, por la baja relación DBO/DQO y la elevada presencia de cloruros por su

toxicidad para especies vegetales y el fósforo y el nitrógeno por su importancia como nutrientes, de manera que su descarga puede ser un considerable desperdicio.

1.6. Alternativas al tratamiento tradicional de las aguas residuales de la extracción de aceite de palma.

Para mejorar la calidad de las aguas residuales del proceso de extracción de aceite de palma en el caso concreto, en estudio, de la Empresa **Unipalma S.A.**, la alternativa más adecuada podría concentrarse en seleccionar una propuesta tecnológica que sirva de **complemento** al sistema STAR en funcionamiento, el cual a pesar de las deficiencias, en concordancia con las consideraciones enunciadas, ofrece un producto que puede y debe ser afinado para llevar las características de los vertimientos al nivel de las nuevas exigencias de las instituciones encargadas del control ambiental.

Dentro de las alternativas tecnológicas que ameriten ser analizadas como complemento de los sistemas STAR se encuentran los **humedales artificiales**, que hacen parte de los denominados **sistemas naturales**, en particular los **humedales subsuperficiales de flujo horizontal** – HSSFH- que por su estructura y componentes ofrecen importantes posibilidades, que se utilizan ampliamente en el tratamiento de aguas residuales domésticas (Peña Varón, Ginneken, & Madera P, 2011); (Rivera Vergara, 2015); (Pérez Salazar, Alfaro Chinchilla, Sasa Marín, & Agüero Pérez, 2013) (Suárez, Agudelo, Rincón, & Millán, 2014); (Torres, 2012) en el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios (Peña, 2007), aunque no se encuentran desarrollos ni trabajos de investigación relacionados con el tratamiento de las aguas residuales de la industria extractora de

aceite. Sin embargo, la experiencia de uso de humedales subsuperficiales en el Ecuador muestra las posibilidades generales de esta tecnología dentro de los propósitos del presente proyecto (Panchi, 2013).

Un **humedal subsuperficial de flujo horizontal** – HSSFH- es una instalación que se construye, directamente en el suelo, en una excavación impermeabilizada de aproximadamente un metro de profundidad. El humedal se conforma por dos capas, una **capa inferior de grava** – hasta la altura de 0,6 - 0,7 m. por la que fluye el agua residual y otra **capa superior de suelo** de 0,3 a 0,4 m de grosor que se dispone sobre la capa de grava (**Figura 1.1**). En esta **capa de suelo** se cultivan especies vegetales de características específicas que atrapan, con su sistema radicular, aquellos componentes de las aguas residuales que sirvan de nutrientes a la especie cultivada.

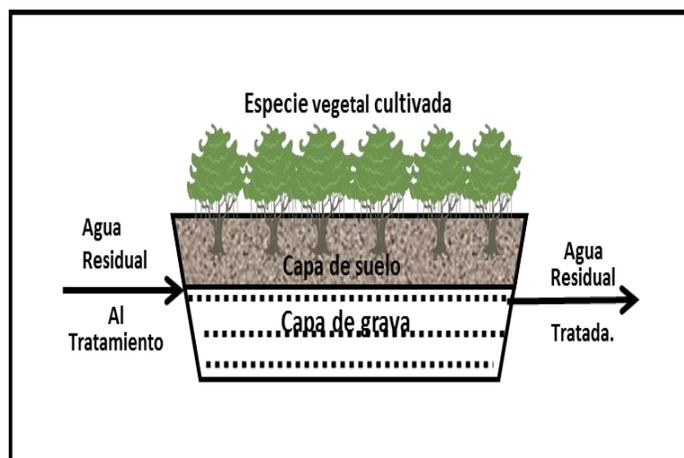


Figura 1.1. Esquema del humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal.

Fuente: Autor del Proyecto

Los HSSFH han recibido importante aplicación en la práctica del tratamiento de las aguas residuales domésticas, de los lixiviados generados en rellenos sanitarios, en razón que muestran para un elevado número ítems, relacionados en conjunto, los mejores indicadores (Peña , 2007), dentro de los que se destacan: **diseño** (baja formación de precipitados, elevada toxicidad para microorganismos, baja formación de espumas, reducida emisión de Compuestos Orgánicos Volátiles, baja sensibilidad a variaciones del caudal, baja generación y fácil manejo de lodos, baja presencia de malos olores, bajo requerimiento de área, bajos costos de construcción, reducidos tiempos de retención); **operación y el mantenimiento** (nula necesidad de insumos químicos, bajo requerimiento de insumos operacionales, suministro de partes, energía eléctrica, bajos costos de operación y mantenimiento, baja complejidad operacional) y **la eficiencia en la remoción de contaminantes** (alta retención de DBO, Nutrientes, Metales y Patógenos).

De la práctica del tratamiento de las aguas residuales domésticas se reconoce la existencia de dos tipos de humedales subsuperficiales: los humedales **subsuperficiales de flujo horizontal (HSSFH)** y los **humedales subsuperficiales de flujo vertical (HSSFV)**. Las diferencias radican en la dirección del flujo de las aguas en tratamiento, la forma de organización de la instalación y en la retención específica de cierto tipo de contaminantes (Garcia & Junqueras, 1997), (García Serrano & Corzo Hernández , 2008)).

Desde el punto de vista de la retención de DQO y DBO son comparables, sin embargo, la presencia de oxígeno en los HSSFV permite la nitrificación del nitrógeno, mientras que los HSSFH retienen de nitrógeno total, este hace que se utilice preferencialmente uno u otro tipo de humedal en función de los requerimientos.

Podría considerarse que los HSSFV son más eficientes que los HSSFH, en razón que, en igualdad de condiciones, los primeros trabajan con cargas de 20 g DBO/m².día, mientras que los segundos con cargas de 6,0 g DBO/m².día (García Serrano & Corzo Hernández , 2008). A pesar de estas consideraciones, los HSSFH han recibido, hasta el momento, mayor uso que los HSSFV por la facilidad de construcción, operación, mantenimiento, ausencia de olores, larga vida útil (García Serrano & Corzo Hernández , 2008) (Cisneros , 2010).

De otra parte, el trabajo realizado en un HSSFH experimental en el relleno sanitario de la vereda Caños Negros de la empresa Bioagrícola del Llano, en Villavicencio, mostró alta eficiencia en la retención de contaminantes de los lixiviados de relativa baja degradabilidad y contenidos considerables de fósforo y nitrógeno con cargas de hasta 133 g DBO/m².día (Tabaco, 2014).

La dificultad para la implementación de los HSSFH radica en que este tipo de humedales presenta características individuales, de manera que se requiere, en cada caso, de un trabajo experimental en un modelo a escala que permita definir el alcance del humedal, las características y las dimensiones en condiciones reales del mismo.

Con base en lo expuesto, para el caso concreto del presente proyecto, la posibilidad de éxito en la reducción de los valores de las características de las aguas residuales de Unipalma S.A., que se espera obtener con la implementación de un HSSFH experimental como complemento del sistema STAR, radica en la siguiente consideración: en la **capa inferior de grava** del humedal debe retenerse, básicamente, la contaminación de amplio espectro como la DBO, la DQO, los sólidos

suspendidos, las grasas y los aceites, mientras que en la **capa superior de suelo**, - debe darse, preferencialmente, la retención del fósforo, el nitrógeno y los cloruros por adsorción, como nutrientes, por medio del sistema radicular de la especie cultivada. Por esta razón, en la capa de suelo del humedal se debe adelantar un cultivo dentro del reducido número de especies vegetales que como las acelgas, el algodón, la caña, el coco común y la remolacha azucarera presentan alta afinidad a los cloruros ((Hi-Cal, 2016); (Permakulturnik, 2015).

La necesidad de reducir en las aguas residuales de **Unipalma S.A.** el nitrógeno, el fósforo y los cloruros se puede apreciar si se comparan los valores de las cargas contaminantes que se generan para cada una de estas especies, haciendo uso de los valores mínimo, máximo y promedio del caudal apropiado en los últimos años en la Empresa. Los datos que se presentan en la **Tabla 0.3** muestran que la descarga máxima anual de fósforo se acerca a 5,0, la de nitrógeno a 3,0 y la de cloruros a 165,0 Ton.

Los valores estimados muestran la esencia de la situación. El N y el P son nutrientes de amplio espectro que pueden ser asimilados, como ya se hizo referencia por un amplio número de plantas (Villareal Maury , 2013).

Muy diferente es la situación con los cloruros. Esta especie es un micronutriente que se requiere sólo en pequeñas cantidades para las mayorías de las plantas, además, cantidades mayores pueden ser tóxicas para un amplio espectro de cultivos como ya se hizo referencia. Por esta razón los cloruros son considerados como una especie que no debe descargarse al ambiente de manera indiscriminada.

Al respecto, en materia de captura de cloruros de las aguas residuales de la industria extractora de aceite de palma se encuentra la experiencia de extracción mecánica, a nivel de laboratorio, posterior a la entrada en vigencia de la Resolución 631 de 2015, en la que se reporta una reducción del 62,7% por debajo de la exigencia de la norma (Buitrago Barbosa, 2018) para volúmenes hasta de 1000 Litros.

Estas últimas consideraciones podrían ofrecer posibilidades de atacar la contaminación de las aguas residuales efluentes del STAR de Unipalma por medio de un humedal subsuperficial de flujo horizontal, como complemento del sistema, que permita, de una parte, la reducción, por retención física, físico-química y biológica en el lecho de grava, de la DBO, la DQO, los Sólidos suspendidos y las grasas y los aceites y, de otra parte, la retención de contaminantes como el Nitrógeno, el Fósforo y los Cloruros por el sistema radicular de la especie vegetal que se establezcan en el humedal, sin descontar la captura de materia orgánica (DQO, DBO y grasas y aceites) que la especie vegetal realice.

Para la realización del trabajo se formularon los siguientes objetivos:

1.7. Objetivo General.

Evaluar un humedal experimental subsuperficial de flujo horizontal como complemento del sistema de tratamiento de aguas residuales industriales de la empresa Unipalma con el propósito de cumplir las normas vigentes.

1.8. Objetivos Específicos.

- Implementar un humedal subsuperficial de flujo, a escala experimental, como complemento del sistema actual de tratamiento de aguas residuales industriales de la empresa Plantaciones Unipalma de los llanos S.A.
- Determinar periódicamente los niveles de las características fisicoquímicas de las aguas residuales afluentes y efluentes y el estado de desarrollo de la especie establecida en el humedal subsuperficial experimental de flujo horizontal.
- Definir el alcance de la propuesta tecnológica implementada y las posibilidades de aplicación dentro del sistema actual de tratamiento de aguas residuales.

2. Capítulo. Materiales y Métodos.

2.1. Tipo de proyecto.

La metodología propuesta se acoge a la de un proyecto de investigación aplicada, en el que confluyen los métodos de las ciencias química y agronómica en temas relacionados con el tratamiento de las aguas residuales de la producción de aceite de palma.

2.2. Ubicación del proyecto.

El proyecto se desarrolló en las instalaciones de la planta extractora de aceite de palma de la Empresa PLANTACIONES UNIPALMA DE LOS LLANOS S.A. ubicada en municipio de Cumaral, departamento del Meta, Colombia, de conformidad con lo expuesto en la **Figura 2.1** y **Figura 2.2**.

Coordenadas: 4°13' 28.35'' – N; 73° 15' 17.61'' – O

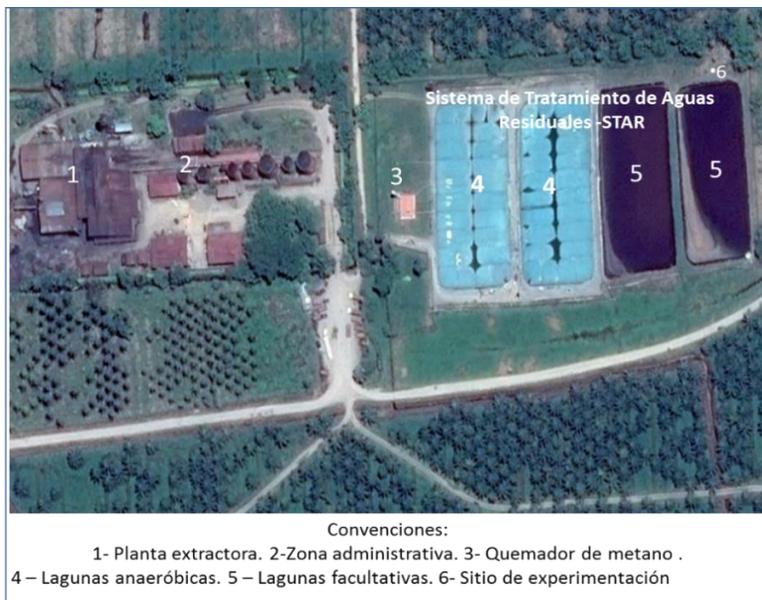


Figura 2.1 Mapa de Ubicación del humedal subsuperficial experimental implementado como complemento al sistema de tratamiento de aguas residuales.

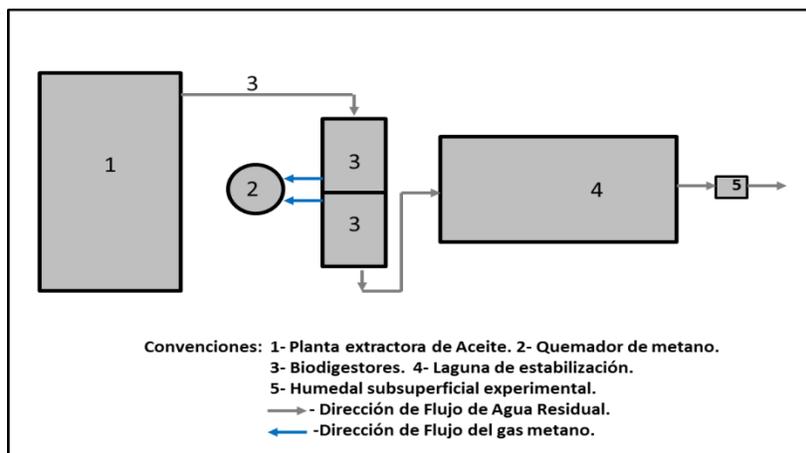


Figura 2.2 Esquema del sistema de tratamiento de aguas residuales con el humedal experimental incluido (Sin escala).

2.3. Objeto de estudio.

En el desarrollo del proyecto se utilizaron dos tipos de objetos de estudios: el objeto de estudio inicial y el objeto de estudio de emergencia.

2.3.1. Objeto de estudio inicial (humedal de 5 m² de área). Se utilizó un humedal subsuperficial de flujo horizontal (**Figura 1.1**) Capítulo. Anexos de 5 m², construido dentro del sistema de tratamiento de las aguas residuales - STAR - de Unipalma S.A, organizado de conformidad con la **Figura 2.2**, El área del humedal (5 m²) se calculó por medio del método de la población humana equivalente (Mendonca, 2000).

Las actividades de construcción del humedal se realizaron de conformidad con los datos que se presentan en la **Tabla 0.32.1** y parcialmente se visualizan en las **Figura 2.3**, **Figura 2.4** y **Figura 2.5**.

Tabla 2.1 Actividades adelantadas en la construcción del humedal subsuperficial de 5 m² de área.

No.	Actividad	Fecha	Duración
1	Adquisición de materiales	Octubre/2017	1 mes
2	Remoción de suelo	1 ^a semana Nov/2017	8 días
3	Adecuación suelo	2 ^a semana Nov/2017	8 días
4	Instalación geomembrana	3 ^a semana Nov 2017	5 días
5	Descargue de capas de grava y suelo	4 semana Non/2017	5 días
6	Pruebas de funcionamiento	1 ^a y 2 ^a semanas Dic/2017	15 días
	Total		2- 2,5 meses



Figura 2.3 Descarga del lecho de grava en el humedal subsuperficial experimental implementado de 5 m² de área.



Figura 2.4 Descarga del lecho de suelo en el humedal subsuperficial experimental implementado de 5m² de área.



Figura 2.5 Adecuación del terreno del humedal de 5 m² para la siembra de las plántulas de acelga

2.3.2. El humedal se construyó de dos capas (**Figura 1.1**): la capa inferior de grava, por la cual atraviesan las aguas residuales. En la capa superior de suelo se adelantó un cultivo de acelgas (*Beta vulgaris*) por las siguientes razones:

- a. Es una de las especies vegetales de alta afinidad a los cloruros, especie química, cuyos niveles, como contaminantes, deben ser, prioritariamente, reducidos de las aguas residuales, por el riesgo que representa su descarga al ambiente natural, dada la alta toxicidad que presentan para cultivos y flora, en general.
- b. Por ser un cultivo de corta duración en el proceso siembra - cosecha lo que permitiría obtener resultados a corto plazo.
- c. Por haber hecho contacto con una experiencia de propagación del cultivo de acelga en la zona del piedemonte llanero, municipio de Acacias, Meta (Gomez, 2017) (**Figura 2.6**).



Figura 2.6 Experiencia de propagación del cultivo de acelga en la zona del piedemonte llanero, municipio de Acacias, Meta.

2.3.3. Objeto de estudio de emergencia. Posteriormente, ante las dificultades en la propagación de la acelga en el humedal de 5 m² de área, se construyó otro humedal subsuperficial de 0,5 m² de área con canecas plásticas de 200 litros de capacidad (**Figura 2.7** y **Figura 2.8**), conservando la estructura y características de este tipo de humedales.

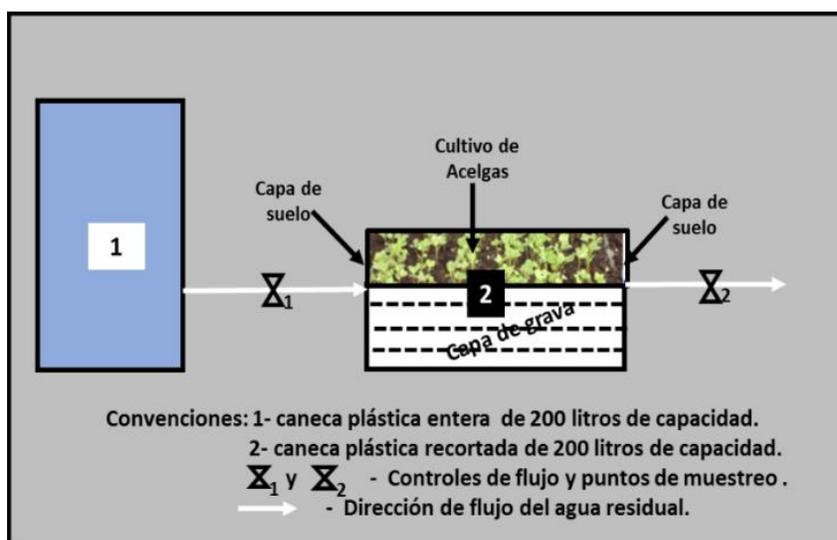


Figura 2.7 Esquema del humedal artificial subsuperficial de flujo subsuperficial de 0,5 m² de área (Sin escala).

Fuente: Autor proyecto.



Figura 2.8 Vista general del humedal subsuperficial experimental de 0,5 m² de área.

2.4. Evaluación del funcionamiento de los humedales subsuperficiales de flujo horizontal de 5,0 y 0,5 m² de área.

2.4.1. Humedal subsuperficial de 5,0 m² de área. La evaluación del funcionamiento se proyectó por medio de análisis de muestras compuestas de agua, tomadas a la entrada y salida del humedal, con base en los parámetros de la **Tabla 0.3** de conformidad con las normas vigentes, realizados por una empresa certificada.

Tabla 2.2 Parámetros de evaluación y técnicas de medición. Humedal de 5 m² de área.

No.	Parámetro	Método
1	pH	Electrométrico, in situ
2	DBO	Dilución
3	DQO	Colorimetría, reflujo cerrado
4	Aceites y grasas	Extracción Soxhlet
5	Cloruros	Argentométrico
6	Nitrógeno Total	Adsorción atómica
7	Fósforo Total	Digestión Ac Sulfúrico, Ac. Nítrico, cloruro estannoso
8	Sólidos suspendidos Totales	Gravimetría.

2.4.2. Humedal subsuperficial de 0,5 m² de área. La evaluación se proyectó por medio del análisis de muestras compuestas de agua a la entrada y salida del humedal, aplicando las características que se exponen en la **Tabla 2.3** de conformidad con las normas vigentes (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015), realizados en el laboratorio que Unipalma S.A utiliza para los controles internos de rutina.

Tabla 2.3 Parámetros de evaluación y técnicas de medición. Humedal de 0,5 m² de área

No.	Parámetro	Método
1	pH	Electrométrico, in situ
2	DQO	Colorimetría, reflujo cerrado
3	Cloruros	Argentométrico
4	Sólidos suspendidos Totales	Gravimetría.

2.5. Establecimiento y evaluación del cultivo de acelgas (*Beta vulgaris*) en los humedales subsuperficiales de flujo horizontal de 5,0 y 0,5 m² de área.

2.5.1. Humedal subsuperficial de 5,0 m² de área. Para el establecimiento y la evaluación del cultivo de acelgas en este humedal se proyectaron las siguientes actividades:

2.5.1.1. Realización de análisis de caracterización de suelos del humedal y del testigo incluyeron los siguientes parámetros: índice de acidez, materia orgánica, sodio, potasio, calcio, magnesio, fósforo, nitrógeno, sulfatos y aluminio (**Anexo 5.1** y **Anexo 5.2**). Los resultados de los análisis de suelos se utilizaron para establecer el plan de implementación del cultivo de acelgas de conformidad con la **Tabla 2.4** . En cada predio (humedal y testigo) se sembraron entre 30-35 plántulas, de un semillero establecido con diseño experimental plenamente al azar (Martinez & Martinez , 1997).

Tabla 2.4 Plan implementación del cultivo de acelga

No	Espacio	Actividad	Observación
1	Testigo	1. Primera aplicación (Primera semana). Aplicar 20 g/m ² de abono 15-15-15 a 4-5 cm de profundidad en el suelo	Aplicar 100 g. abono 15-15-15 al área del Testigo.
2	Testigo	2. Siembra . Realizar máximo 3 días después de la primera aplicación.	
3.	Testigo	3. Riego 1 . En las dos semanas siguientes regar tres (3) veces, aportando en cada riego: 0,1 g/m ² de nitrógeno; 0,15 g/m ² de anhídrido fosfórico (P ₂ O ₅) y 0,1 g/m ² de óxido de potasa (K ₂ O).	Tener en cuenta los 5 m ² de área del testigo para las aplicaciones
4.	Testigo	4. Riego 2 . Durante el mes siguiente, regar tres (3) veces por semana, aportando en cada riego: 0,20 g/m ² de nitrógeno; 0,15 g/m ² de anhídrido fosfórico (P ₂ O ₅); 0,10 g/m ² de óxido de potasa (K ₂ O).	Tener en cuenta los 5 m ² de área del testigo para las aplicaciones
5.	Testigo	5. Riego 3 . Durante el mes siguiente, regar tres (3) veces por semana, aportando en cada riego: 0,3 g/m ² de nitrógeno; 0,10 g/m ² de óxido de potasa (K ₂ O).	Tener en cuenta los 5 m ² de área del testigo para las aplicaciones
6	Testigo	6. Riego 4 . Posteriormente y hasta 15 días antes de finalizar el cultivo, regar tres (3) veces por semana, aportando en cada riego: 0,50 g/m ² de nitrógeno.	Tener en cuenta los 5 m ² del área del testigo para aplicación.
7	Humedal	Realizar las actividades 1 y 2 indicadas para el testigo. Las demás se omiten. La fuente de alimentación son los nutrientes de las aguas residuales en tratamiento.	Tener en cuenta los 5 m ² del área del Humedal en la aplicación



Figura 2.9 Evolución del cultivo de acelgas en humedal subsuperficial de 5 m².

2.5.2. Evaluación de las plántulas del cultivo de acelga. Se proyectó determinar los valores de características como: altura de plántula, longitud de raíces, peso fresco y peso de plantas y raíces, número de hojas, grosor del tallo. Al concluir el experimento con los dos cultivos (humedal y testigo) se previó una valoración bromatológica que permita establecer el porcentaje de proteína, energía metabolizable, porcentaje de carbohidratos, grasas y lípidos, entre otros.

2.5.2.1. Humedal Subsuperficial de 0,5 m² de área. Para el establecimiento y la evaluación del cultivo de acelgas en este humedal se proyectaron las siguientes actividades:

- a.** Aplicación de los resultados del análisis de caracterización de suelos del humedal y del testigo.

- b. Implementación del cultivo de acelgas, con base en los criterios de la **Tabla 0.3** Se sembraron de cada predio (humedal y testigo) cerca de 10-12 plántulas.



Figura 2.10 Evolución del cultivo de acelgas en humedal subsuperficial de 0,5 m².

2.6. Procesamiento de datos y evaluación de resultados.

2.6.1. Procesamiento de datos. Los valores de los resultados obtenidos se procesaron por medio del método estadístico de la Media Verdadera para niveles del 95% de confianza. ((Martinez & Martinez , 1997), de conformidad con las siguientes Ecuaciones 1 y 2.

$$MV = X \pm EE. \quad \text{Ecuación 1.}$$

Dónde: MV – media verdadera. X – promedio aritmético. EE – Error estándar

El error estándar **EE** se calcula por la Ecuación siguiente:

$$\mathbf{EE = (\sigma.T) / \sqrt{n}. - Ecuación 2}$$

Dónde: σ – Desviación estándar; T- parámetro estadístico del 95% de confianza. Y, n – número de ensayos.

2.6.2. Evaluación de resultados. Como criterio de evaluación se utiliza el nivel de Retención – R, cuyo valor promedio, para un parámetro determinado, se calcula por la siguiente Ecuación:

$$\mathbf{R = [(X_{ent} - X_{sal}) / X_{ent}] 100. \quad Ecuación 3}$$

Dónde: **X_{ent}** – Valor promedio del parámetro a la Entrada del humedal.

X_{sal} - Valor promedio del parámetro a la salida del humedal.

Los valores mínimo y máximo del nivel de retención **R** se calculan, por analogía, sumando o restando el error estándar EE del promedio X

3. Capítulo. Resultados y Discusión.

La presentación y discusión de resultados parte del cumplimiento de los objetivos específicos planteados en el presente trabajo que cobijan tanto el **objeto de estudio inicial** – humedal de 5 m² de área -, como el **objeto de estudio de emergencia** - humedal de 0,5 m² de área -.

3.1. Ensayos con el objeto de estudio inicial – humedal de 5 m² de área.

3.1.1. Construcción del humedal y acciones preliminares. Para el humedal de 5 m² de área se cumplió plenamente con el primer objetivo específico, relacionado con la implementación, de conformidad con las actividades previstas en la **Tabla 2.1**. El humedal fue construido y se realizaron pruebas de funcionamiento hidráulico. Se utilizaron caudales aproximados al 0,0025 % del caudal máximo de las aguas residuales de la Empresa Unipalma S.A, del orden de 1.500 L/día, de manera que la carga superficial contaminante por DBO no superara los 100 g/m², atendiendo la experiencia del tratamiento de las aguas residuales domésticas. (Mendonca, 2000). Se tomaron muestras y se obtuvieron los resultados de análisis de suelo (**Anexo 5.1** y **Anexo 5.2**). Estos resultados indican la alta acidez de estos suelos, su pobreza en materia orgánica y en minerales, falencias que se proyectó superar en el desarrollo del cultivo de acelga a partir del plan de implementación del cultivo con base en el plan de la **Tabla 2.4** y de los contenidos físico-químicos de la aguas en estudio.

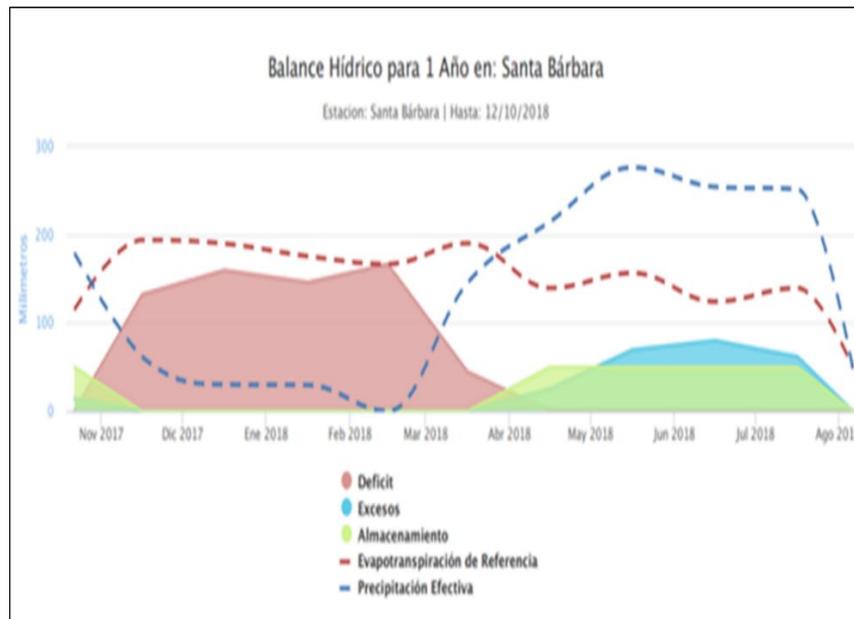
3.1.2. La propagación de la acelga. Se procede al establecimiento del cultivo de acelga en el humedal de 5 m² de área, con base en el plan de la **Tabla 2.4**.

3.1.3. El cultivo se dificulta, se realizan varios ensayos, entre marzo y julio de 2018, con resultados no exitosos en todos los casos. Esta situación se atribuye a las condiciones climáticas excesivamente adversas para el desarrollo del cultivo: alta pluviosidad y bajo brillo solar como lo muestran la **Tabla 3.1**, **Grafica 3.1** y **Grafica 3.2**.

Tabla 3.1 Niveles de precipitación en el piedemonte metense en los años 2017- 2018.

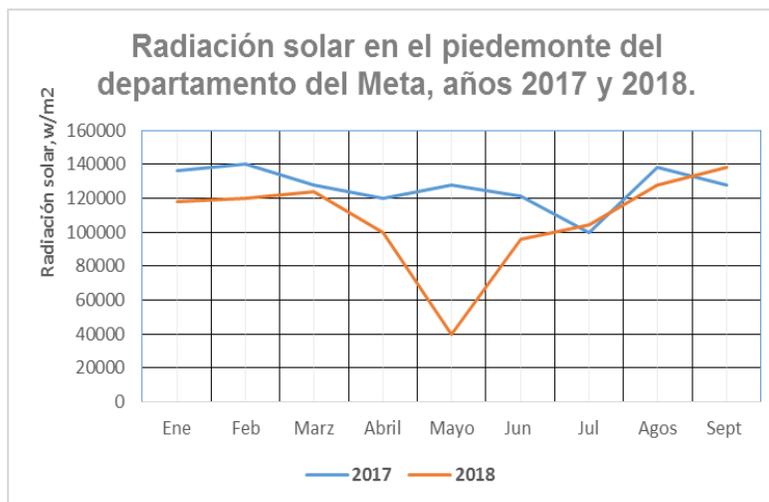
	Año	2018								
	Mes	Ene	Febr	Marzo	Abril	Mayo	Jun	Jul	Agosto	Sept
Precipitación.mm	Piedemonte	50-100	50-150	300-400	400-600	400-600	400-600	400-600	300-400 400-600(25%)	300-400 (95%) 400-600(5%)
	Dpto Meta	0-50	0-100	50-100	200-400	300-400	200-300	200-300	300-400	200-300
	Año	2017								
	Mes	Ene	Febr	Marzo	Abril	Mayo	Jun	Jul	Agosto	Sept
	Piedemonte	50-100	100-150	150-300	400-600	400-600	400-600	400-600	300-400(30%) 400-600 (70%)	300-400 (10%) 400-600 (90%)
	Dpto Meta	0-50	50-100	150-200	300-400	300-400	300-400	300-400	300-400	200-300

Fuente: (Ideam, Boletín Agroclimático, 2018)



Grafica 3.1 Balance hídrico. Piedemonte del departamento del Meta a octubre 2018.

Fuente: (Geoportal, 2018)



Grafica 3.2 Brillo Solar. Piedemonte del departamento del Meta a octubre 2018.

Fuente: (Weatherlink, 2018).



Figura 3.1 Vista general del humedal subsuperficial de 5 m² de área luego de un aguacero

3.1.4. Balance del desarrollo de los ensayos en el humedal de 5 m² de área. Como ya se hizo alusión, en el trabajo con el humedal de 5 m² de área sólo se dio cumplimiento al primer objetivo relacionado con su implementación, sin embargo, el logro de los objetivos específicos dos y tres no fue posible, en razón, que las dificultades con la propagación del cultivo de acelgas no permitieron ni “Determinar periódicamente los niveles de las características fisicoquímicas de las aguas residuales afluentes y efluentes y el estado de desarrollo de la especie establecida en el humedal subsuperficial experimental de flujo horizontal”, ni “Definir el alcance de la propuesta tecnológica implementada y las posibilidades de aplicación dentro del sistema actual de tratamiento de aguas residuales”. En conclusión, la presentación y discusión de resultados para este humedal se reduce al hecho de su implementación.

3.2. Ensayos en el humedal de 0,5 m² de área.

La imposibilidad expuesta de obtener resultados dentro de los objetivos del proyecto en el humedal de 5 m² de área, indujo la necesidad de realizar ensayos, de emergencia, alternativos, en un humedal de menor área - 0,5 m²- (**Figura 2.2** e **Figura 2.8** y **Figura 2.10**) que permitiera la propagación de la acelga y el contacto de las raíces con las aguas residuales en estudio para caudales bajos del orden de 230 L/día.

3.2.1. Evaluación de resultados. Para la evaluación de los ensayos del humedal de 0,5 m² de área se utilizaron cuatro parámetros (**Tabla 2.3**) : pH, Sólidos Suspendidos Totales -SST, los cloruros (Cl⁻) y la Demanda Química de Oxígeno – DQO. Los análisis se realizaron en el laboratorio que Unipalma S.A utiliza para los controles internos de rutina. Los resultados se exponen en la (**Tabla 3.2**).

El procesamiento de datos con base en el análisis de la Media Verdadera con niveles de confianza del 95%, de conformidad con las Ecuaciones 1,2 y 3 del **numeral 2. 6** del presente trabajo y el cálculo de los niveles de retención para cada parámetro estudiado en el humedal de 0,5 m² de área, se exponen en la **Tabla 3.3**. La evaluación lleva a las siguientes consideraciones:

Tabla 3.2 Resultados generales de la evaluación de las aguas residuales al paso por el humedal subsuperficial de 0,5 m² de área. Caudal 230 l/día.

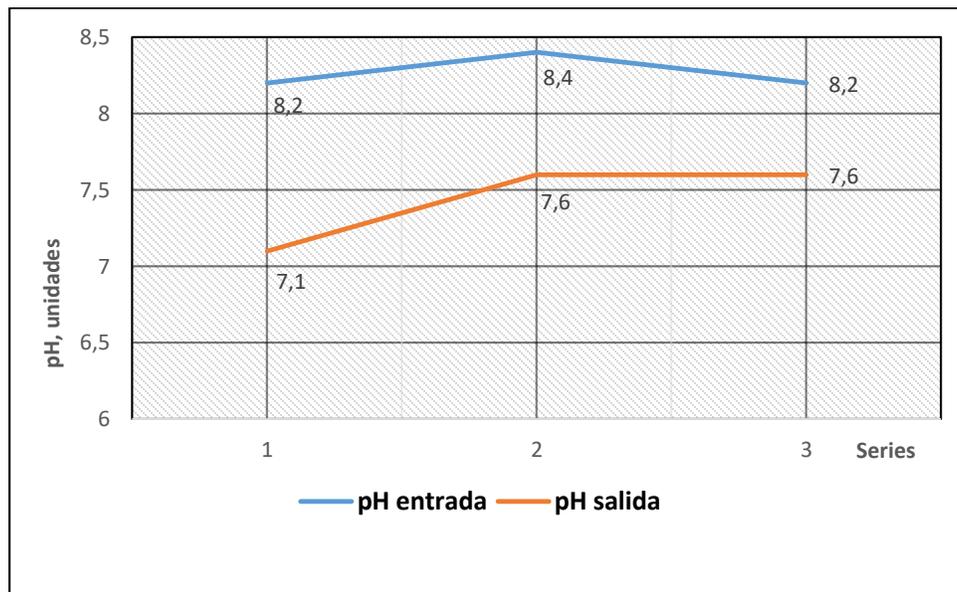
Fecha	Humedales		Parámetros			
			pH	SST mg/l	Cloruros mg/l	DQO mg/l
06/07/2018	Humedal 1	Entrada	8,2	910	950	488
		salida	7,1	620	780	290
	Humedal Testigo	Entrada	6,7	10	64	6
		salida	6,6	370	140	80
016/07/2018	Humedal 1	Entrada	8,4	890	1000	445
		salida	7,6	830	890	390
	Humedal Testigo	Entrada	7,8	10	79	9
		salida	6,7	90	77	42
26/07/2018	Humedal 1	Entrada	8,2	1090	840	579
		salida	7,6	950	830	451
	Humedal Testigo	Entrada	7,9	350	138	190
		salida	6,7	110	106	50

Tabla 3.3 Procesamiento de datos y cálculo del nivel de retención para los parámetros estudiados en el humedal subsuperficial de 0,5 m² de área.

1.		PARAMETRO: pH, unidades									
Series		serie 1	serie 2	serie 3					RETENCION, R %		
Humedal	Fecha	06.07.2018	16.07.2018	26.07.2018							
Principal		Valores obtenidos			Promedio, \bar{X}	Desvest, σ	EE	MV	Minimo	Promedio	Máximo
	Entrada	8,2	8,4	8,4	8,3	0,1	0,2	8,3 ± 0,2	8,0	10,8	13,5
	Salida	7,1	7,6	7,6	7,4	0,3	0,4	7,4 ± 0,4			
Testigo	Entrada	6,7	7,8	7,9	7,5	0,7	0,9	7,5 ± 0,9			
	Salida	6,6	6,7	6,7	6,7	0,1	0,1	6,7 ± 0,1			
2.		PARAMETRO: Sólidos Suspendidos Totales, SST, mg/l									
Series		serie 1	serie 2	serie 3					RETENCION, R %		
Humedal	Fecha	06.07.2018	16.07.2018	26.07.2018							
Principal		Valores obtenidos			Promedio, \bar{X}	Desvest, σ	EE	MV	Minimo	Promedio	Máximo
	Entrada	910	890	1090	963	110	150	963 ± 150	6,9	16,6	29,9
	Salida	620	830	960	803	172	233	803 ± 233			
Testigo	Entrada	10	10	350	123	196	267	123 ± 267			
	Salida	370	370	110	283	150	204	263 ± 204			
3.		PARAMETRO: Cloruros, mg/l									
Series		serie 1	serie 2	serie 3					RETENCION, R %		
Humedal	Fecha	06.07.2018	16.07.2018	26.07.2018							
Principal		Valores obtenidos			Promedio, \bar{X}	Desvest, σ	EE	MV	Minimo	Promedio	Máximo
	Entrada	950	1000	840	930	82	111	963 ± 150	1,3	10,4	23,0
	Salida	780	890	830	833	55	75	803 ± 233			
Testigo	Entrada	64	89	138	97	38	51	123 ± 267			
	Salida	140	77	106	108	32	43	263 ± 204			
4		PARAMETRO: Demanda Química de Oxígeno, DQO, mg/l									
Series		serie 1	serie 2	serie 3					RENDIMIENTO, R %		
Humedal	Fecha	06.07.2018	16.07.2018	26.07.2018							
Principal		Valores obtenidos			Promedio, \bar{X}	Desvest, σ	EE	MV	Minimo	Promedio	Máximo
	Entrada	488	445	579	504	68	93	504 ± 93	15,6	27,8	45,6
	Salida	250	390	451	364	103	140	364 ± 140			
Testigo	Entrada	6	9	190	68	105	143	68 ± 143			
	Salida	80	42	50	57	20	27	57 ± 27			

En la Tabla: a) **Desvest** - Desviación estándar, σ . b) **EE** - Error estándar; se calcula por la ecuación $EE = \sigma \cdot T / \sqrt{n}$. Donde, T - Parámetro estadístico del 95% de confianza, igual a 2,353.; n - número de series, igual a 3. c) **MV** - Media Verdadera; se calcula por la ecuación $MV = \bar{X} \pm EE$, donde \bar{X} es el promedio. d) **R** - Porcentaje de Retención promedio, se calcula por la ecuación $R = ((X_{entr} - X_{sal}) / (X_{entr})) \cdot 100$.; donde X_{entr} y X_{sal} valor promedio del parámetro a la entrada y salida del humedal. Los valores mínimo y máximo del nivel de retención R se calculan, por analogía, sumando o restando del promedio \bar{X} , el error estándar EE

3.2.1.1. Para el pH, aunque, los niveles máximo, promedio y mínimo, de retención para este parámetro podrían considerarse bajos (promedio 10%, **Tabla 3.3**), el valor promedio a la salida (pH=7,4) del humedal es un valor relevante, máxime, si se observa que el valor del pH de las aguas a la Entrada es de 8,3. La reducción, que puede explicarse en el contacto de las aguas residuales con el lecho filtrante del humedal, presenta una tendencia a estabilizar (pH=7.6 para las series 2 y 3) los valores a la salida del humedal al corte de cada una de las series, como se observa en la **Grafica 3.3**. Además, muestra que las acelgas pueden desarrollarse a pH, levemente superiores, a los valores neutros.

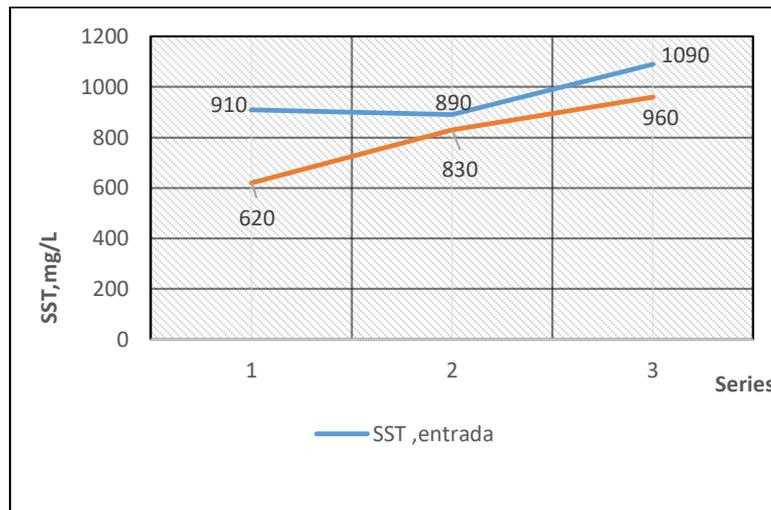


Grafica 3.3 Valores del pH de las aguas residuales a la Entrada y salida del lecho del humedal subsuperficial experimental de 0,5 m² de área.

De otra parte, la exigencia de la norma para el pH está entre 6 y 9 unidades, de manera, que incluso el valor promedio - 8,3 - para las aguas residuales crudas (sin tratar), se encuentra dentro del intervalo establecido. Por esta razón, el pH es un parámetro importante, pero no definitivo a la hora de evaluar la calidad de las aguas de la Empresa Unipalma S.A. Pero los resultados obtenidos en los ensayos con relación a los valores del pH pueden considerarse positivos.

3.2.1.2. Los **Sólidos Suspendidos Totales** (SST) presentan niveles máximos de retención cercanos al 30%, cifra que, comparada con la equivalente del pH, es más alta ($R_{pH}^{max} = 13,5\%$; (**Tabla 3.3**). Sin embargo, el nivel mínimo de retención de los SST es inferior al del pH. Además, el valor promedio histórico (**Tabla 0.2**) a la salida del humedal es de 803 mg/L, el doble del valor exigido por la norma (400 mg/L). De manera que los niveles de retención para este parámetro son considerablemente bajos.

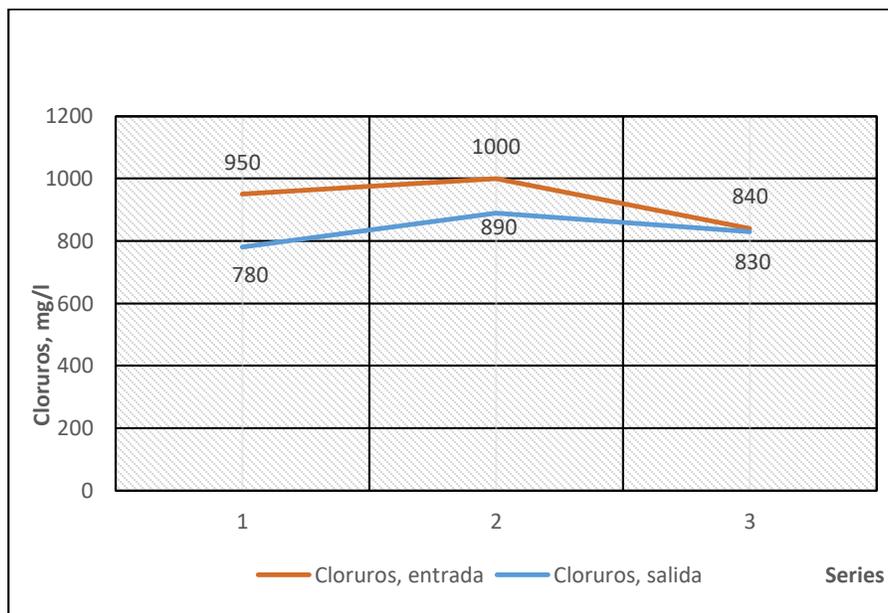
Al observar el comportamiento de los datos obtenidos de los SST a la Entrada y salida del humedal, se denota una tendencia a la reducción de la diferencia entre estos valores en las series (**Grafica 3.4**), lo que a su vez muestra la reducción en los niveles de retención. Esta tendencia puede indicar que las aceugas adsorbieron con mayor aceptación determinada cantidad de SST al iniciar el proceso, pero que con el paso del tiempo los requerimientos fueron disminuyendo, en razón de no encontrar mayores necesidades de consumo.



Grafica 3.4 Valores de los sólidos suspendidos totales de las aguas residuales a la Entrada y salida del humedal subsuperficial experimental de 0,5 m² de área.

3.2.1.3. Para los cloruros, de igual manera la tendencia es a la disminución del porcentaje de retención al pasar de una serie de muestreo a otra, inicia en valores bajos (17,9 %) para la primera serie y termina en valores cercanos a la unidad (1,2%) en la tercera serie de muestreo. (**Tabla 3.3** y **Grafica 3.5**).

Este hecho es altamente desfavorable para los objetivos del proyecto, lo que hace suponer que la retención en todo el experimento, aunque no alta, se dio de manera muy restringida porque el contacto, entre las raíces de las acelgas y las aguas residuales, no se dio, en razón de que las plántulas desarrollaron un sistema de raíz adventicia que no penetró el lecho de suelo y no hizo contacto con el lecho de grava del humedal (**Figura 3.2**).



Grafica 3.5 Valores de los cloruros de las aguas residuales a la Entrada y salida del lecho del humedal subsuperficial experimental de 0,5 m² de área.

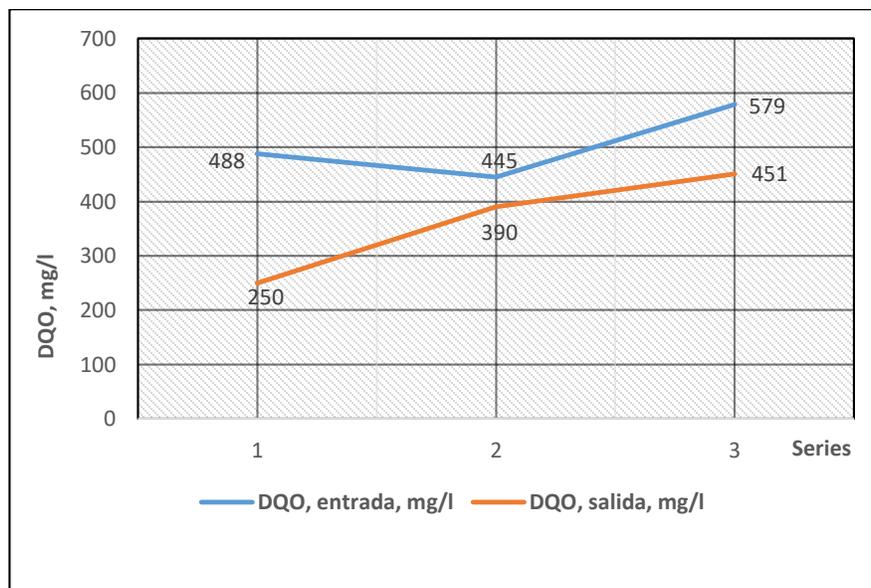
Además, el valor promedio de los cloruros a la salida del humedal es más de 1,5 veces mayor (833 mg/L. **Tabla 3.3**) que el valor admisible exigido por la norma (500 mg/L. Resolución 631 /2015), lo que muestra la retención de esta especie fue baja y el remanente, en las aguas residuales, muy alto.

El hecho que la retención de los cloruros haya sido insuficiente con tendencia a la baja, es una situación nociva para los objetivos del proyecto, en razón que el propósito central era evaluar una especie con alta afinidad a los cloruros y las acelgas, de conformidad con las fuentes estudiadas, es una de ellas (Hi-Cal, 2016); (Permakulturnik, 2015).



Figura 3.2 Sistema de raíces adventicias desarrollado por las plántulas de Acelga (*Beta vulgaris*) en lecho de suelo del humedal de 0,5 m² de área

3.2.1.4. La Demanda Química de oxígeno (DQO) es el parámetro, dentro de los estudiados, que presenta los mayores niveles de retención (**Tabla 3.3**), sin embargo, como lo muestra la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** la tendencia es descendiente, al pasar de cerca del 49 %, en la primera, al 22% en la tercera serie.



Grafica 3.6 Valores de la demanda química de oxígeno DQO de las aguas residuales a la Entrada y salida del lecho del humedal subsuperficial experimental de 0,5 m² de área.

La explicación puede ser similar al caso del SST, las acelgas adsorbieron con mayor aceptación, al iniciar el proceso, determinada cantidad de Materia Orgánica, pero con el paso del tiempo los requerimientos fueron disminuyendo, en razón de no encontrar mayores necesidades de consumo.

A diferencia de los Cloruros y los SST, la DQO presenta valores promedios a la Entrada y salida del humedal que están suficientemente por debajo de la exigencia normativa (1500 mg/L. Resolución 631 /2015), lo que la convierte en un parámetro importante pero no fundamental de la vigilancia y control por parte de la Empresa **UNIPALMA S. A.**

3.2.1.5. Se realizaron ensayos en el humedal de 0,5 m² de área a caudales inferiores (115 l/día), suponiendo que a menor caudal en contacto entre la raíz de la acelga y las aguas residuales podría mejorar, sin embargo, los resultados de la retención de los parámetros estudiados no mostraron mejoría de consideración, por lo tanto, no se considera pertinente su presentación y análisis.

3.2.2. Balance del desarrollo de los ensayos en el humedal de 0,5 m² de área. En el humedal de 0,5 m² de área se dio cumplimiento al primer objetivo específico del presente trabajo, puesto que éste fue implementado. Además, en este caso, fue posible “Determinar periódicamente los niveles de las características fisicoquímicas de las aguas residuales afluentes y efluentes” aunque “el estado de desarrollo de la especie establecida en el humedal” no se realizó. En consecuencia, aparecen elementos para “Definir el alcance de la propuesta tecnológica implementada y las posibilidades de aplicación dentro del sistema actual de tratamiento de aguas residuales”.

La aplicación de humedales superficiales de flujo horizontal como complemento del sistema de tratamiento de aguas residuales del presente trabajo, a partir de los resultados obtenidos en el humedal de 0,5 m² de área, no se considera posible por las siguientes razones:

3.2.2.1. En el humedal sólo el pH y la DQO efluentes presentaron valores que se encuentran dentro de los parámetros exigidos por la norma, los valores de los SST y los Cloruros superan en cerca de dos veces las exigencias de ley.

3.2.2.2. Para todos los parámetros los niveles de retención son significativamente bajos, a pesar de que el caudal utilizado es considerablemente reducido, en promedio de 230/L. día. La situación es más significativa para los cloruros, especie química, cuya presencia es nociva para un elevado número de especies vegetales.

3.2.2.3. En la propagación de la acelga se presentaron dificultades, en especial por la fragilidad de las plántulas y la generación de un sistema radicular adventicio que no hizo contacto con las aguas residuales que atraviesan la capa de grava en el humedal de 0,5 m² de área.

3.3. Alternativa de posible reducción de la contaminación de aguas residuales, por medio de humedales subsuperficiales de flujo horizontal.

De conformidad con el trabajo general realizado con la finalidad de encontrar alternativas que permitan la reducción de la carga contaminante de las aguas residuales de la Empresa UNIPALMA S. A. se puede concluir:

3.3.1. En el humedal de 5 m² de área la propagación de la acelga (*Beta vulgaris*) no fue posible por las condiciones climáticas adversas que se presentaron en la época del desarrollo del proyecto,

a pesar de conocerse experiencias de desarrollo de cultivos de esta especie vegetal en la región del piedemonte metense.

3.3.2. En el humedal de 0,5 m² de área sólo el pH y la DQO efluentes presentaron valores adecuados a la norma, los valores de los SST y los Cloruros superan en cerca de dos veces las exigencias de ley. Para todos los parámetros los niveles de retención son significativamente bajos, a pesar de que utilizó un caudal reducido (230L/día). La situación es más significativa para los cloruros. La propagación de la acelga presentó por la fragilidad de las plántulas y la generación de raíces adventicias que no hicieron contacto con las aguas residuales que atraviesan la capa de grava en el humedal.

Los resultados del trabajo no pueden declararse positivos, puesto que no favorecen la reducción de la contaminación de las aguas residuales de la Empresa Unipalma, en particular, los cloruros, presentes en concentraciones considerables en la industria extractora de aceite de palma.

4. Capítulo. Conclusiones y Recomendaciones.

4.1. Conclusiones.

En el presente trabajo no fue posible evaluar el funcionamiento del humedal experimental subsuperficial de flujo horizontal de 5 m² de área como instrumento complementario, al sistema actual, de retención de contaminantes de las aguas residuales industriales de la empresa plantaciones Unipalma de los Llanos S.A. por las dificultades en la propagación de la acelga (*Beta vulgaris*), generadas por las condiciones climáticas adversas (elevadas precipitaciones y bajos niveles de brillo solar) que se presentaron en la época del desarrollo del proyecto.

Los resultados obtenidos en la evaluación de las características fisicoquímicas de las aguas residuales afluentes y efluentes y del desarrollo de la especie establecida en un humedad subsuperficial experimental de flujo horizontal de 0,5 m² de área, de relativo fácil manejo, en el que se propagó, de igual manera, el cultivo de acelga (*Beta vulgaris*), mostraron que el pH y la DQO presentan valores que se encuentran dentro de los parámetros exigidos por la norma, los valores de los SST y los Cloruros superan en cerca de dos veces las exigencias de ley. Para todos los parámetros evaluados los niveles de retención son significativamente bajos, a pesar de que el caudal utilizado fue considerablemente bajo, en promedio de 230/L día.

A pesar de que los resultados obtenidos, en primera aproximación, no permiten catalogar a los humedales subsuperficiales de flujo horizontal como herramientas de complemento del sistema actual de tratamiento de aguas residuales de la Empresa Unipalma S.A, en razón de las dificultades

de la propagación de la acelga (humedal de 5m^2 de área) por las condiciones climáticas adversas, típicas del piedemonte llanero y de otras regiones tropicales, y, por los bajos niveles de retención de contaminantes (humedal de $0,5\text{m}^2$ de área), se debe considerar, en trabajos futuros, que en la zona se han adelantado experiencias del cultivo de acelgas y que, en teoría, hay más especies vegetales que podrían capturar cloruros como especie nociva y que el humedal, en su conjunto, puede retener un amplio espectro de contaminantes.

4.2. Recomendaciones

Se considera de alta relevancia continuar el trabajo relacionado con la reducción de los niveles de contaminación de la industria extractora de aceite por medio de métodos que permitan la captura de especies que, como los cloruros, son nocivas para un elevado número de especies vivas.

En razón que los humedales subsuperficiales de flujo horizontal – HSSFH –utilizan especies vegetales que apropian como nutrientes los contaminantes contenidos en las aguas residuales de la extracción de aceite de palma es recomendable tener en cuenta estos métodos entre los que se pueda utilizar.

Previo al posible uso de los humedales subsuperficiales de flujo horizontal en el tratamiento de las aguas residuales de la extracción de aceite de palma es recomendable realizar trabajos de propagación de las especies a utilizar.

5. Capítulo. Anexos

Anexo 5.1 Resultados de Análisis del Suelo del Humedal



CERTIFICADO DE ANALISIS FERTILIDAD DEL SUELO



Propietario: Sr(a) UNIPALMA DE LOS LLANOS

Remitente:		UNIPALMA S.A.		
Número de Certificado:	ASU 171210	Fecha Ingreso		
Cultivo / Variedad	NO_ESPECIFICADO / NO ESPECIFICADO	22/09/2017		
Municipio /Departamento / Finca	META / CUMARAL / UNIPALMA DE LOS LLANOS	Fecha Emisión		
Identificación	NO. 1	03/10/2017		
Parámetro	Valor	Calificación	Extracción / Método analítico / Referencia	
pH	6,67		Pasta Saturación/Potenciométrica/Método Interno	
C.E (dS/m)	0,19		Extracto Saturación/Conductimetroee/Método Interno	
Densidad aparente (g/cc)	1,54		Cálculo	
%Carbono Orgánico	0,73		Walkley-Black / Colorimétrico / Método Interno	
%Materia Orgánica	1,26		Cálculo	
FRANCO-ARCILLO-ARENOSO				
Textura	% Arena	% Limo	% Arcilla	
	70	6	24	
Resultados Obtenidos				
Parámetro	meq/100g	mg/Kg (p.p.m)	Calificación	Extracción / Método analítico / Referencia
Potasio intercambiable	0,62	242		Ac. NH ₄ / Absorción Atómica / Método Interno
Calcio intercambiable	4,80	960		Ac. NH / Absorción Atómica / Método Interno
Magnesio intercambiable	1,90	228		Ac. NH / Absorción Atómica / Método Interno
Sodio intercambiable	0,10	23		Ac. NH / Absorción Atómica / Método Interno
Acidez intercambiable	N.A	N.A	N.A	KCl / Volumetría / Método Interno
Hierro		447,0		Mezcla ácida / Absorción Atómica / Melhich i
Manganeso		65		Mezcla ácida / Absorción Atómica / Melhich i
Cobre		2,9		Mezcla ácida / Absorción Atómica / Melhich i
Zinc		2,9		Mezcla ácida / Absorción Atómica / Melhich i
Boro		0,28		Ca(OH)PO ₄ / Colorimétrico / Método Interno
Fósforo		503		Sin. Bray II / Colorimétrico / Método Interno
Azufre		18		Ca(OH)PO ₄ / Turbidimétrico / Método Interno

Este documento registra fielmente el resultado de las mediciones realizadas. Los resultados contenidos en el presente, hacen referencia a la(s) muestra(s) analizadas en las fechas indicadas. El laboratorio no presta el servicio de muestreo en campo, en consecuencia no se responsabiliza de los perjuicios derivados de dicho proceso, así como de errores en la interpretación de los resultados. La fecha de ejecución de los ensayos, corresponde al periodo comprendido entre la fecha de ingreso y la fecha de emisión.

Los valores de referencia están tomados de bases de datos internas de Agrilab S.A.S. y de las referencias: "Fertilización de cultivos en clima frío (1998), Fertilización de cultivos en clima medio (1995) y Fertilización de cultivos en clima cálido, editados por Guerrero R. y publicados por Monómeros Colombo Venezolanos S.A."

Cálculos			Todos los valores con calificación
Muestra con	Magnesio	25,6	Claves Calificación según cultivo: D: Deficiente B: Bajo M: Medio A: Alto E: Excesivo Referente al servicio solicitado: M.I.: Muestra Insuficiente N.A.: No Analizado Referente al informe: Fecha de ingreso se refiere a la fecha en que el laboratorio codifica la muestra. Todos los valores con calificación E han sido verificados
	Sodio	1,35	
	Aluminio	N.A	
	Potasio	8,36	
	Calcio	64,7	
	C.I.C.E. (meq/100g)	7,42	
	Ca/Mg	2,53	
	Ca/K	7,74	
	Mg/K	3,06	
	(Ca+Mg)/K	10,8	

El presente certificado no puede ser reproducido parcial o totalmente, salvo autorización expresa por parte del laboratorio AGRILAB S.A.S.

Myriam Bendeck Lugo
MYRIAM BENDECK LUGO
 Química Director Técnico PQ-1168

Página 1 de 1 - Fin del informe

Adriana Navarro Urdaneta
ADRIANA NAVARRO URDANETA
 Lic. Química Coordinadora de Área

CIENCIA Y TECNOLOGÍA AL SERVICIO DEL SECTOR AGRÍCOLA

Calle 79 B No. 70 - 16 Bogotá, D.C. PBX: 223 1999 - Fax: 223 4087
 Para quejas y reclamos comuníquese al E-mail: servicioalcliente@agrilab.com.co
www.agrilab.com.co

Anexo 5.2 Resultados del Análisis de Suelo del Testigo



CERTIFICADO DE ANALISIS FERTILIDAD DEL SUELO



Propietario: Sr(a) UNIPALMA DE LOS LLANOS

Remitente: UNIPALMA S.A.

Número de Certificado:	ASU 171211	Fecha Ingreso
Cultivo / Variedad	NO_ESPECIFICADO / NO ESPECIFICADO	22/09/2017
Municipio /Departamento / Finca	META / CUMARAL / UNIPALMA DE LOS LLANOS	Fecha Emisión
Identificación	NO. 2	03/10/2017

Parámetro	Valor	Calificación	Extracción / Método analítico / Referencia
pH	7		Pasta Saturación/Potenciométrico/Método Interno
C.E (dS/m)	0,44		Extracto Saturación/Conductímetro/Método Interno
Densidad aparente (g/cc)	1,57		Cálculo
%Carbono Orgánico	0,70		Walkley-Black / Colorimétrico / Método Interno
%Materia Orgánica	1,21		Cálculo
FRANCO-ARCILLO-ARENOSO			
Textura	% Arena	% Limo	% Arcilla
	74	4	22

Resultados Obtenidos				
Parámetro	meq/100g	mg/Kg (p.p.m)	Calificación	Extracción / Método analítico / Referencia
Potasio intercambiable	0,47	183		Ac. NH ₄ / Absorción Atómica / Método Interno
Calcio intercambiable	3,55	710		Ac. NH ₄ / Absorción Atómica / Método Interno
Magnesio intercambiable	9,90	1188		Ac. NH ₄ / Absorción Atómica / Método Interno
Sodio intercambiable	1,39	320		Ac. NH ₄ / Absorción Atómica / Método Interno
Acidez intercambiable	N.A	N.A	N.A	KCl / Volumetría / Método Interno
Hierro		832,0		Mezcla ácida / Absorción Atómica / Melhich I
Manganeso		122		Mezcla ácida / Absorción Atómica / Melhich I
Cobre		3,5		Mezcla ácida / Absorción Atómica / Melhich I
Zinc		8,1		Mezcla ácida / Absorción Atómica / Melhich I
Boro		0,34		Ca(OH)PO ₄ / Colorimétrico / Método Interno
Fósforo		5001		Slit. Bray II / Colorimétrico / Método Interno
Azufre		23		Ca(OH)PO ₄ / Turbidimétrico / Método Interno

Este documento registra fielmente el resultado de las mediciones realizadas. Los resultados contenidos en el presente, hacen referencia a la(s) muestra(s) analizadas en las fechas indicadas. El laboratorio no presta el servicio de muestreo en campo, en consecuencia no se responsabiliza de los perjuicios derivados de dicho proceso, así como de errores en la interpretación de los resultados. La fecha de ejecución de los ensayos, corresponde al periodo comprendido entre la fecha de ingreso y la fecha de emisión. Los valores de referencia están tomados de bases de datos internas de Agrilab S.A.S. y de las referencias: "Fertilización de cultivos en clima frío (1998), Fertilización de cultivos en clima medio (1995) y Fertilización de cultivos en clima cálido, editados por Guerrero R. y publicados por Monómeros Colombo Venezolanos S.A."

Cálculos		Todos los valores con calificación Claves
Magnesio	64,7	Claves Calificación según cultivo: D: Deficiente B: Bajo M: Medio A: Alto E: Excesivo Referente al servicio solicitado: M.I.: Muestra Insuficiente N.A.: No Analizado Referente al Informe: Fecha de ingreso se refiere a la fecha en que el laboratorio codifica la muestra. Todos los valores con calificación E han sido verificados
Sodio	9,08	
Aluminio	N.A	
Potasio	3,07	
Calcio	23,2	
C.I.C.E. (meq/100g)	15,3	
Ca/Mg	0,36	
Ca/K	7,55	
Mg/K	21,1	
(Ca+Mg)/K	28,6	

El presente certificado no puede ser reproducido parcial o totalmente, salvo autorización expresa por parte del laboratorio AGRILAB S.A.S.

Myriam Benéck Lugó
MYRIAM BENÉCK LUGO
 Química Director Técnico PQ-1168

Página 1 de 1 - Fin del informe

Adriana Navarro Urdaneta
ADRIANA NAVARRO URDANETA
 Lic. Química Coordinadora de Área

CIENCIA Y TECNOLOGÍA AL SERVICIO DEL SECTOR AGRÍCOLA

Calle 79 B No. 70 - 16 Bogotá, D.C. PBX: 223 1999 - Fax: 223 4087
 Para quejas y reclamos comuníquese al E-mail: servicioalcliente@agrilab.com.co
www.agrilab.com.co

Bibliografía

Buitrago Barbosa, J. (2018). Extracción de cloruros de un sistema de tratamiento de aguas residuales industriales a través de procesos mecánicos. *Revista Palmas*, 108-113. Obtenido de <http://repositorio.fedepalma.org/handle/123456789/90779>.

Jarava Galván, R., & Planeta Barros, I. P. (2017). Análisis de Alternativas para la Remoción de Cloruros presentes en las Aguas residuales Industriales de Producción del Campo Cicuco Ecopetrol S.A. Ingeniería Ambiental. Valledupar, Cesar: Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD. Obtenido de <https://stadium.unad.edu.co/preview/UNAD.php?url=/bitstream/10596/13789/1/1052040776.pdf>

Rivera Vergara, D. (2015). Humedales de flujo subsuperficial como biofiltros de aguas residuales en Colombia. Cuaderno Activa, 99-107. Obtenido de ojs.tdea.edu.co/index.php/cuadernoactiva/article/download/251/243/.

Althausen, M. (2016). Tratamiento de Efluentes de la Planta de Beneficio-Convertir un residuo en un recurso. *Revista Palmas* 37 (Especial Tomo II), 31-37. Obtenido de <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/11918/11911>.

Bello, M. M., & Abdul Aziz Abdul Raman. (2017). Trend and current practices of palm oil mill effluent polishing: Application of advanced oxidation processes and their future perspectives.

Journal of Environmental Management; Volume 198, Part 1, 170-182. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479717303985> .

Boluda Botella, N., & Martinez Moya, S. (2017). Estudio de la minimización de la presencia de cloruros y sulfatos en el agua tratada de la EDAR del Valle del Vinalopó (Alicante). Valle del Vinalopó (Alicante) : Memoria del Proyecto, Universidad de Alicante. Instituto de Proceso Químicos. Obtenido de <http://www.agroambient.gva.es/documents/163005665/163975683/UA-Estudio+minizacion+presencia+cloruros+y+sulfatos+agua+tratada+edar+Valle+Vinalopó%20Boluda+Martinez+2017.pdf/a5243ca8-7d64-4e00-a1e5-0f6316b40bfe>.

Cisneros , M. (2010). Guía para la selección de tecnologías de depuración de aguas residuales por métodos naturales. San Cayetano Alto Loja, Ecuador: Universidad Técnica Particular de Loja. Obtenido de <http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/bitstream/28000/139/1/Gu%C3%ADa%20para%20la%20selecci%C3%B3n%20de%20tecnolog%C3%ADas.pdf>.

Dangond Lacouture, L. (2014). Palma de Aceite; Compromiso con el progreso y la convivencia. Cali: Presentación en el XLII Congreso Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite. Obtenido de http://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/Fedepalma/Discurso_PresidenteJunta.pdf.

Fedepalma. (2011). Guía ambiental de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia, Bogotá. Obtenido de <http://web.fedepalma.org/ambientales>.

Fedepalma. (25 de enero de 2016). Colombia logró cosecha récord de aceite de palma en 2015. Obtenido de <http://web.fedepalma.org/colombia-alcanza-cifra-record>.

García Serrano, J., & Corzo Hernández , A. (2008). Depuración con Humedales Construidos; Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad Politécnica de Catalunya. Obtenido de http://upcommons.upc.edu/eprints/bitstream/2117/2474/1/JGarcia_and_ACorzo.pdf.

Garcia, J., & Junqueras, X. (1997). Depuración de aguas residuales mediante humedales construidos. Tecnología del Agua, 58-65.

Geoportal, C. (2018). Balance hídrico. Piedemonte del departamento del Meta. Obtenido de <http://geoportal.cenipalma.org/XMACReporter?EstacionId=115&FechaReporte=11/10/2018&NumDias=60&LARA=50>.

Gomez, O. (2017). Experiencia de propagación del cultivo de acelga en la zona del piedemonte llanero, municipio de Acacías, Meta. Instructor del Sena. Entrevista personal. (N. Molina Bocanegra, Entrevistador).

Gonzalez, J. (2014). Panorama de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia y en la Zona Norte del País: Situación actual, Retos y Perspectivas. Ponencia, Montería. Obtenido de

<http://web.fedepalma.org/bigdata/zonaprivada/panoramadelaagroindustriadelapalmadeaceiteenco lombiayenzonanorte.pdf>.

Hassan, M. A., & Suraini Abd-Aziz. (2012). 23 - Waste and Environmental Management in the Malaysian Palm Oil Industry. Palm Oil; Production, Processing, Characterization, and Uses, 693-711. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780981893693500265>.

Hi-Cal. (2016). Hi-Cal Liquid Calcium. Obtenido de Agricultural Nutrients: <http://www.tetrachemicals.com/Products/Agriculture/Hi-Cal.aqf> .

Ideam. (2010). Capitulo 5. Estimación de la demanda de Agua. Obtenido de Estudio Nacional del Agua. Minambiente Bogotá: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021888/CAP5.pdf> .

Ideam. (2014). Estudio Nacional del Agua. Minambiente . Obtenido de http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA_2014.pdf.

Ideam. (2018). Boletín Agroclimático . Obtenido de http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/boletin-agroclimatico?p_p_id=110_INSTANCE_o7HBhnNMuqY0&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1.

Ideam. (2018). Reporte de Avance del Estudio Nacional del Agua. Minambiente . Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/documents/24277/76321271/Cartilla+ENA+2018+WEB+actualizada.pdf/ba353c39-b15d-4a76-8ed4-3814c4c35239>.

Jatta M., M., Aino-Maija, L., Perttu E.P., K., Jo-Shu, C., & Jaakko A., P. (2015). Lipid production by eukaryotic microorganisms isolated from palm oil mill effluent. *Biochemical Engineering Journal*; Volume 99, 48-54. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369703X15000947>.

Kemmer, F. (1983). Manual del agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones. Nalco Chemical Company. Bogotá: McGraw. HILL.

M. Amirul Islam, Abu Yousuf, Ahasanul Karim, Domenico Pirozzi, Maksudur Rahman Khan, & Zularisam Ab Wahid. (2018). Bioremediation of palm oil mill effluent and lipid production by *Lipomyces starkeyi*: A combined approach. *Journal of Cleaner Production* Volume 172, 1779-1787. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617329426#!>.

Martinez, R., & Martinez , N. (1997). Diseño de experimentos. Bogotá: Fondo Nacional Universitario.

Mata, F., Rodríguez, G., ML, López, B., & Vela, C. (2014). Dinámica de la salinidad en los suelos. Revista Digital del Departamento El Hombre y su Ambiente; Vol. 1 (5), 26-35. Obtenido de http://cbs1.xoc.uam.mx/e_bios/docs/2014/05_SALINIDAD_EN_SUELOS_ESPANOL.pdf.

Mendonca, S. (2000). Sistemas de Lagunas de Estabilización. Bogotá D.C.: Mc Graw.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Resolución 631 de 2015. Diario Oficial No. 49.486. Obtenido de https://docs.supersalud.gov.co/PortalWeb/Juridica/OtraNormativa/R_MADS_0631_2015.pdf.

Muhammad, J., Azizah, B., Farah Hannan, A., & Rizafizah, O. (2018). Palm oil industry in South East Asia and the effluent treatment technology—A review. Environmental Technology & Innovation; Volume 9, 169-185. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352186417301694>.

Nazatul, S., & Khairul Faezah Md, Y. (2014). Wastewater Treatment of Palm Oil Mill Effluent (POME) by Ultrafiltration Membrane Separation Technique Coupled with Adsorption Treatment as Pre-treatment. Agriculture and Agricultural Science Procedia; Volume 2, 257-264. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210784314000382#!>.

Palaniselvam, K., Soundharrajan, I., Srisesharam, S., Gaanty Pragas , M., Mashitah M, Y., Natanamurugaraj, G., & Ki Choon, C. (2017). Treating of palm oil mill effluent using *Commelina nudiflora* mediated copper nanoparticles as a novel bio-control agent. Journal of

Cleaner Production, Volume 141, 1023-1029. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616315177>.

Panchi, I. (2013). Pantanos de flujo subsuperficial para tratamiento de efluentes en plantas de proceso de palma de aceite. Revista Palmas, 120-124. Obtenido de <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/10707/10693>.

Peña , G. (2007). Comparación del tratamiento de lixiviados por medio de humedales artificiales con otros sistemas convencionales de tratamiento. Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental; (CIIA). Coloquios Ambientales. Universidad de los Andes. Obtenido de http://ciia.uniandes.edu.co/presentaciones%20anteriores_files/Comparacion%20de%20tratamientos%20para%20lixiviados.pdf.

Peña Varón, M., Ginneken, M., & Madera P , C. (2011). Humedales de Flujo Subsuperficial: Una Alternativa Natural para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Zonas Tropicales. Ingeniería y Competitividad. Obtenido de : http://revistas.univalle.edu.co/index.php/ingenieria_y_competitividad/article/view/2302.

Pérez Salazar, R., Alfaro Chinchilla, C., Sasa Marín, J., & Agüero Pérez, J. (2013). Evaluación del funcionamiento de un sistema alternativo de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. Uniciencia, 332-340.

Permakulturnik. (2015). Nie takie straszne metale ciężkie... gdy ma się dostatek minerałów w diecie i glebie. Pracownia Permakultury. Obtenido de <http://permakultura.net/author/permakulturnik/?lang=es>.

Portafolio. (18 de Septiembre de 2014). Colombia, cuarto productor de aceite de palma en el mundo. Portafolio. Obtenido de <https://www.portafolio.co/economia/finanzas/colombia-cuarto-productor-aceite-palma-mundo-59140>.

Santos, G. (2007). Diagnóstico y propuesta de gestión de los residuos sólidos generados por el proceso de extracción de aceite crudo de palma africana en palmas oleaginosas Bucarelia S.A. . UIS; Monografía.

Siti Nur Hatika Abu Bakar, Hassimi Abu Hasan, Abdul Wahab Mohammad, Siti Rozaimah Sheikh Abdullah, Teow Yeit Haan, Khairul Muis Mohamed Yusof, & Rahmat Ngteni. (2018). A review of moving-bed biofilm reactor technology for palm oil mill effluent treatment. *Journal of Cleaner Production*, Volume 171, 1532-1545. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617323934>.

Suárez, A., Agudelo, N., Rincón, J., & Millán, N. (2014). Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Revista Mutis* 4 (1), 8-14. Obtenido de <https://doi.org/10.21789/22561498.905>.

Tabaco, M. (2014). Estudio preliminar de un sistema natural como aporte tecnológico al sistema de tratamiento de lixiviados en el relleno sanitario de la Empresa Bioagrícola del Llano s.a. de Villavicencio. Informe Final de Maestría en *Gestión Ambiental. Unillanos.*

Tecnoambiental. (2017). Informe caracterización aguas residuales industriales y superficiales de Unipalma S.A. Villavicencio, Meta: Informe tecnico, Laboratorio Tecnoambiental.

Torres , E. (2012). Optimización del humedal artificial subsuperficial para tratamiento de aguas residuales. Revista Ingenio Libre. Obtenido de www.unlimber.edu.co/revistaingeniolibre/revista-11/art2.pdf.

Unipalma , S. (2016). Datos Historicos de Vertimientos. Cumaral, Meta, Colombia: Documento Facilitado al Autor del presente Proyecto en Forma Digital.

Unipalma , S. (2019). Datos de hectarias sembradas y consumos de agua. Cumaral, Meta: Documento facilitado al autor del presente proyecto en forma digital.

Villareal Maury , G. (2013). Parte I, Los Elementos Esenciales para las Plantas. Universidad Autonoma Agraria Antonio Narro, División de Ingeniería, Departamento de Ciencias Basicas. Obtenido de <http://es.slideshare.net/gustavovillarrealmaury/1-quimica-los-20-elementos-esenciales-paralas-plantas> .

Wai Yan Cheah, Pau Loke Show, Joon Ching Juan, Jo-Shu Chang, & Tau Chuan Ling. (2018). Microalgae cultivation in palm oil mill effluent (POME) for lipid production and pollutants removal. *Energy Conversion and Management*; Volume 174, 430-438. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890418309245>.

Weatherlink. (2018). Brillo Solar. Piedemonte del departamento del Meta a octubre del año 2018. Obtenido de <https://www.weatherlink.com/browse/381dfa43-7189-41d9-a1ea-73da55cfdca3>.

Zhan Sheng, L., Sim Yee, C., Jun Wei, L., Thongthai, W., & Chin Kui, C. (2019). Treatment technologies of palm oil mill effluent (POME) and olive mill wastewater (OMW): A brief review. *Environmental Technology & Innovation*; Volume 15, 100377. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352186419300690>.