

DISEÑO CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS  
RESIDUALES PARA LA PLANTA EXTRACTORA DE ACEITE DE PALMA DE LA  
EMPRESA CI SIGRA S.A.

ANDRES FELIPE PEREZ PLATA  
MARIA CAMILA RIOS ARREDONDO

FUNDACION UNIVERSIDAD DE AMERICA  
FACULTAD DE INGENIERIAS  
PROGRAMA DE INGENIERIA QUIMICA  
BOGOTA D.C.  
2018

DISEÑO CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS  
RESIDUALES PARA LA PLANTA EXTRACTORA DE ACEITE DE PALMA DE LA  
EMPRESA CI SIGRA S.A.

ANDRES FELIPE PEREZ PLATA  
MARIA CAMILA RIOS ARREDONDO

Proyecto integral de grado para optar al título de:  
INGENIERO QUIMICO

FUNDACION UNIVERSIDAD DE AMERICA  
FACULTAD DE INGENIERIAS  
PROGRAMA DE INGENIERIA QUIMICA  
BOGOTA D.C.  
2018

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Jurado

Bogotá D.C., Febrero de 2018

## **DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

**Dr. JAIME POSADA DÍAZ**

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

**Dr. LUÍS JAIME GARCÍA-PEÑA**

Vicerrectora Académica y de Posgrados

**Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS**

Secretario General

**Dr. JUAN CARLOS POSADA GARCÍA PEÑA**

Director Facultad de Ingenierías

**Dr. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI**

Director Programa de Ingeniería

**Ing. LEONARDO DE JESÚS HERRERA GUTIÉRREZ**

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

## **DEDICATORIA**

A Dios por ser nuestra guía en cada paso y poner en nuestro camino a personas que nos ayudaron durante este proceso.

A nuestros padres por ser nuestro apoyo incondicional, quienes siempre creyeron en nuestras capacidades, nos acompañaron y nos enseñaron que siempre debemos luchar por lo que queremos y así lo conseguiremos.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por darnos la sabiduría y llenarnos de capacidades para culminar esta etapa de nuestras vidas con victoria.

A la empresa CI SIGRA S.A. por permitirnos desarrollar nuestro trabajo de grado en su empresa y haber puesto los recursos necesarios para su realización.

A Jesús García por haber dedicado su tiempo y aportado su conocimiento en la realización de este trabajo.

A la Ingeniera Jenny Hernández por habernos facilitado y habernos apoyado con los laboratorios para la etapa experimental del trabajo de grado.

A nuestros familiares y amigos por apoyarnos y haber hecho parte de este proceso, porque sin sus palabras de aliento no lo hubiéramos podido lograr.

Al Ingeniero Oscar Lombana quien fue nuestro asesor y nos dedicó su tiempo para poder realizar el trabajo de la mejor manera.

## CONTENIDO

	pág.
<b>INTRODUCCION</b>	20
<b>OBJETIVOS</b>	21
<b>1. MARCO TEORICO</b>	22
1.1 GENERALIDADES DE LA EMPRESA CI SIGRA S.A	22
1.2 GENERALIDADES PALMA AFRICANA DE ACEITE	22
1.2.1 Palma africana en colombia	22
1.3 PROCESOS DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA	23
1.3.1 Esterilización	24
1.3.2 Desfrutado	24
1.3.3 Prensado	25
1.3.3.1 Prensado en frio	25
1.3.3.2 Prensado en caliente	26
1.3.4 Extracción	26
1.3.5 Clarificación	27
1.3.5.1 Equipos usados durante la clarificación:	28
1.3.6 Desfibración	29
1.4 TRATAMIENTO DE EFLUENTES	30
1.4.1 Tratamiento preliminar	30
1.4.2 Tratamiento primario	33
1.4.3 Tratamiento secundario	34
1.4.4 Tratamiento terciario	37
1.5 ALTERNATIVAS DE APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS	44
1.6 MARCO LEGAL	51
<b>2. CARACTERIZACION Y DIAGNOSTICO</b>	53
2.1 ANÁLISIS DE LAS CORRIENTES HÍDRICAS QUE INTERFIEREN EL PROCESO	53
2.2 CALCULO DEL CAUDAL DE DISEÑO	58
2.3 CARACTERIZACION DEL EFLUENTE	59
<b>3. PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS VIABLES PARA LA SELECCIÓN DE TRATAMIENTOS DE AGUA RESIDUAL</b>	61
3.1 ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO	61
3.1.1 Alternativa 1	61
3.1.2 Alternativa 2	63
3.1.3 Alternativa 3	65
3.2 SELECCIÓN DEL TRATAMIENTO	67
3.2.1 Criterios de selección	67
3.2.2 Matriz de selección	67
<b>4. DISEÑO DE EXPERIMENTOS</b>	72
4.1 ELABORACION DE LAS SOLUCIONES	73



4.1.1 Preparación solución nitrato de plata	73
4.1.2 Preparación solución indicadora de cromato de potasio	75
4.1.3 Elaboración solución estándar de cloruros	77
<b>4.2 ETAPAS DEL DESARROLLO EXPERIMENTAL</b>	<b>80</b>
4.2.1 Tiempo mínimo de adsorción	81
4.2.1.1 Biocarbón 1	85
4.2.1.2 Biocarbón 2	87
4.2.1.3 Cuesco	90
4.2.2 Isotermas de adsorción de cloruro	92
4.2.2.1 Capacidad de adsorción biocarbones	95
4.2.2.2 Isotherma de Langmuir	101
4.2.2.3 Isotherma de Freundlich	105
4.2.2.4 Interpretación de resultados	109
<b>5. DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS</b>	<b>112</b>
5.1 DIAGRAMA DE EQUIPOS	112
5.2 REJILLA	113
5.3 TRAMPA DE GRASA	113
5.4 LAGUNA DE ENFRIAMIENTO	114
5.5 LAGUNAS ANAEROBIAS	115
5.6 LAGUNA FACULTATIVA	120
<b>6. ANÁLISIS FINANCIERO PROYECTO</b>	<b>126</b>
6.1 COSTOS DIRECTOS	126
6.2 COSTOS INDIRECTOS	127
6.2.1 Costos de mano de obra	127
6.2.2 Costos operacionales	128
6.2.3 Costos energéticos	129
6.3 DETERMINACIÓN DEL VALOR PRESENTE NETO (VPN)	129
6.3.1 VPN con proyecto	130
6.3.2 VPN sin proyecto	132
6.3.3 Toma de decisión	133
<b>7. CONCLUSIONES</b>	<b>135</b>
<b>8. RECOMENDACIONES</b>	<b>137</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>138</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>146</b>

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Proceso de desfrutado con entradas y salidas	24
Figura 2. Pasta de palmiste	26
Figura 3. Silo de secado de almendras	27
Figura 4. Separación del agua y el aceite debido a la densidad	28
Figura 5. Tridecanter	29
Figura 6. Proceso durante el desbaste	31
Figura 7. Tipos de tamizadores para tratamiento de aguas	31
Figura 8. Sistema de desengrasado y desarenado.	32
Figura 9. Planta de lodos activados	35
Figura 10. Configuración del sistema con estabilización por contacto	36
Figura 11. Laguna de estabilización	37
Figura 12. Resinas naturales y resinas sintéticas	38
Figura 13. (a) Osmosis directa, (b) condición de equilibrio, (c) presión aplicada mayor a la presión osmótica	39
Figura 14. Esquema isoterma de adsorción	44
Figura 15. Esquema básico de biorefinería	45
Figura 16. Representación esquemática del concepto de biorefinería para la producción de biogás y cogeneración	46
Figura 17. Representación esquemática del concepto de biorefinería para la producción de biogás	49
Figura 18. Representación esquemática del concepto de biorefinería para la producción de biogás y pellets	51
Figura 19. Diagrama de bloques del proceso de extracción de aceite	54
Figura 20. Resultados de balances de masa del agua para la esterilización, clarificación y separación de mezcla triturada	57
Figura 21. Balance de principales residuos sólidos del proceso de extracción.	58
Figura 22. Alternativa de tratamiento de aguas residuales 1	62
Figura 23. Alternativa 2 de tratamiento de aguas residuales	64
Figura 24. Alternativa 3 de tratamiento de aguas residuales	66
Figura 25. Protocolo para la preparación solución de nitrato de plata	74
Figura 26. Solución de nitrato de plata	75
Figura 27. Protocolo para la preparación solución indicadora de cromato de potasio	76
Figura 28. Etapas de la preparación de solución de nitrato de plata.	77
Figura 29. pH de la solución de cloruros	78
Figura 30. Protocolo para la preparación solución estándar de cloruros	79
Figura 31. Protocolo proceso de adsorción de cloruros para determinación tiempo mínimo	82
Figura 32. Proceso de agitación	85
Figura 33. Protocolo proceso de isotermas de adsorción	93
Figura 34. Diagrama de flujo tratamiento de agua residual	112
Figura 35. Trampa de grasa	114

Figura 36. Medidas finales de la laguna de enfriamiento	115
Figura 37. Dimensiones finales de la laguna anaerobia	118
Figura 38. Dimensiones finales de la laguna facultativa	122
Figura 39. Esquema del proceso de compostaje	124

## LISTA DE GRAFICAS

	pág.
Grafica 1. Cantidad de cloruros en mg/l removidos en el tiempo para el ensayo del biocarbón 1	86
Grafica 2. Cantidad de cloruros en mg/l removidos en el tiempo para la repetición del biocarbón 1	87
Grafica 3. Cantidad de cloruros en mg/l removidos en el tiempo para el ensayo del biocarbón 2	88
Grafica 4. Cantidad de cloruros en mg/l removidos en el tiempo para la repetición del biocarbón 2	89
Grafica 5. Cantidad de cloruros en mg/l removidos en el tiempo para el ensayo cuesco	91
Grafica 6. Cantidad de cloruros en mg/l removidos en el tiempo para la repetición cuesco	92
Grafica 7. Capacidad de adsorción biocarbón 1 por cada cantidad de biocarbón.	97
Grafica 8. Capacidad de adsorción (porcentaje) biocarbón 1 por cada cantidad de biocarbón	98
Grafica 9. Capacidad de adsorción biocarbón 1 por cada cantidad de biocarbón.	99
Grafica 10. Capacidad de adsorción (porcentaje) biocarbón 2 por cada cantidad de biocarbón.	100
Grafica 11. Resultados constantes de Langmuir biocarbón 1, prueba 1.	102
Grafica 12. Isotherma de Langmuir para el biocarbón 1, prueba 2.	103
Grafica 13. Isotherma de Langmuir para el biocarbón 2, prueba 1	104
Grafica 14. Isotherma de Langmuir para el biocarbón 2, prueba 2	105
Grafica 15. Isotherma de Freundlich para el biocarbón 1, prueba 1	106
Grafica 16. Isotherma de Freundlich para el biocarbón 1, prueba 2	107
Grafica 17. Isotherma de Freundlich para el biocarbón 2, prueba 1	108
Grafica 18. Isotherma de Freundlich para el biocarbón 2, prueba 2	109

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Mayores productores de aceite de palma en el mundo. (Aceite de palma producción mundial)	23
Tabla 2. Contaminantes adsorbidos efectivamente por los carbones activados	42
Tabla 3. Productos según la ruta en el proceso de transformación de subproductos.	47
Tabla 4. Valores porcentuales aproximados de la obtención de efluentes por etapa	53
Tabla 5. Características de las corrientes individuales del proceso	55
Tabla 6. Parámetros del efluente utilizando clarificación dinámica	57
Tabla 7. Valores porcentuales con base al 100% de RFF	58
Tabla 8. Efluente estimado	59
Tabla 9. Parámetros promedio y máximos permisibles de la resolución.	60
Tabla 10. Ventajas y desventajas de la alternativa 1	63
Tabla 11. Ventajas y desventajas para la alternativa 2	65
Tabla 12. Ventajas y desventajas de la alternativa 3.	66
Tabla 13. Porcentaje asignado para cada criterio de selección	68
Tabla 14. Valor para cada criterio según el nivel de importancia	68
Tabla 15. Matriz de selección	68
Tabla 16. Parámetros del POME luego del tratamiento.	72
Tabla 17. Características de obtención de las muestras de estudio.	80
Tabla 18. Condiciones de análisis proceso de adsorción	81
Tabla 19. Consideraciones para el cálculo de la concentración de cloruros	84
Tabla 20. Resultados cinética preliminar ensayo biocarbón 1	85
Tabla 21. Resultados cinética preliminar repetición biocarbón 1	86
Tabla 22. Resultados cinética preliminar ensayo biocarbón 2	88
Tabla 23. Resultados cinética preliminar repetición biocarbón 2	89
Tabla 24. Resultados cinética preliminar ensayo del cuesco	90
Tabla 25. Resultados cinética preliminar repetición cuesco	91
Tabla 26. Condiciones de análisis ensayos batch	92
Tabla 27. Reducción de cloruros por cantidad Biocarbón 1 en las dos pruebas	96
Tabla 28. Porcentaje de reducción de cloruros por cantidad de Biocarbón 1 en las dos pruebas	97
Tabla 29. Porcentaje de reducción de cloruros por cantidad de Biocarbón 2 en las dos pruebas	99
Tabla 30. Porcentaje de reducción de cloruros por cantidad de Biocarbón 2 en las dos pruebas	100
Tabla 31. Parámetros isoterma de Langmuir para el biocarbón 1, prueba 1	101
Tabla 32. Parámetros isoterma de Langmuir para el biocarbón 1, prueba 2	102
Tabla 33. Parámetros isoterma de Langmuir para el biocarbón 2, prueba 1	103
Tabla 34. Parámetros isoterma de Langmuir para el biocarbón 2, prueba 2	104
Tabla 35. Parámetros isoterma de Freundlich para el biocarbón 1, prueba 1	105
Tabla 36. Parámetros isoterma de Freundlich para el biocarbón 1, prueba 2	106

Tabla 37. Parámetros isoterma de Freundlich para el biocarbón 2, prueba 1	107
Tabla 38. Parámetros isoterma de Freundlich para el biocarbón 2, prueba 2	108
Tabla 39. Promedio de la caracterización después del tratamiento de aguas.	123
Tabla 40. Costos directos equipos	126
Tabla 41. Costos materia prima	127
Tabla 42. Costos mano de obra biogás	127
Tabla 43. Costos mano de obra compost	128
Tabla 44. Costos totales mano de obra	128
Tabla 45. Parámetros de cálculo de costos operacionales.	128
Tabla 46. Costos operacionales totales anuales	129
Tabla 47. Costos energéticos biogás por cada escenario	129
Tabla 48. Variables económicas del proyecto	129
Tabla 49. Parámetros obtención de energía con biogás	130
Tabla 50. Depreciaciones activos	131
Tabla 51. Flujo de caja primeros cuatro años	131
Tabla 52. Resultados indicadores financieros con proyecto	132
Tabla 53. Costos directos sistema sin proyecto	132
Tabla 54. Depreciación de activos sin proyecto.	132
Tabla 55. Flujo de caja primeros cuatro años sin proyecto	133
Tabla 56. Resultados indicadores financieros sin proyecto	133

## LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Calculo del caudal de diseño	58
Ecuación 2. Cantidad de cloruros removida	96
Ecuación 3. Ecuación linealizada de la isoterma de Langmuir	101
Ecuación 4. Ecuación linealizada de Freundlich.	105
Ecuación 5. Calculo del número de barras	113
Ecuación 6. Volumen de la trampa de grasa	113
Ecuación 7. Área de la laguna	114
Ecuación 8. Cálculo de la carga orgánica	116
Ecuación 9. Calculo del volumen necesario para laguna anaeróbica.	116
Ecuación 10. Tiempo de retención hidráulica para lagunas anaerobias.	117
Ecuación 11. Área de cada laguna	117
Ecuación 12. Volumen final de cada laguna.	117
Ecuación 13. Calculo de la carga orgánica del efluente	118
Ecuación 14. Calculo de la DQO de salida.	118
Ecuación 15. Calculo del volumen de laguna facultativa.	121
Ecuación 16. Calculo del tiempo de retención hidráulico.	121
Ecuación 17. Calculo de la carga del efluente	122
Ecuación 18. Calculo del DQO de salida.	122

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Balances de masa del agua para la esterilización, clarificación y separación de mezcla triturada.	146
Anexo B. Cálculo de las soluciones	148
Anexo C. Norma nmx-aa-073-scfi-2001 para determinación de cloruros totales en agua y cálculo de la concentración del adsorbato en el biocarbón en estado de equilibrio (qe)	150
Anexo D. Capacidad de adsorción detallada de los biocarbónes.	152
Anexo E. Resultado de las constantes de las isothermas	155
Anexo F. Cálculo costo energético del diésel	158
Anexo G. Cotización lagunas	160
Anexo H. Cotización compost y depurador	164
Anexo I. Cálculo obtención de biogas e ingreso por venta.	166
Anexo J. Precios de venta energía EPSA.	168
Anexo K. Requisitos específicos para fertilizantes o abonos orgánicos	170



## LISTA DE ABREVIATURAS

**Ce:** concentración en el equilibrio  
**CO:** carga orgánica  
**COV:** carga orgánica volumétrica  
**CPO:** crude palm oil  
**DBO:** demanda biológica de oxígeno  
**DQO:** demanda química de oxígeno  
**POME:** palm oil mill effluent  
**PTAR:** planta de tratamiento de aguas residuales  
**Q:** caudal  
**q<sub>e</sub>:** capacidad de adsorción  
**RFF:** racimo de fruta fresca  
**RPM:** revolución por minuto  
**TRH:** tiempo de retención hidráulica  
**TRM:** tasa representativa del mercado  
**ST:** sólidos totales

## GLOSARIO

**ADSORCIÓN:** es el proceso en el cual las moléculas de gas o líquido se unen a una o se retienen en una superficie de otra sustancia, que se encuentra en otra fase.

**AFLUENTE:** flujo o corriente de agua residual que entra a un proceso de tratamiento.

**BIOCARBÓN:** es un tipo de carbón producido por el proceso de pirolisis de material vegetal o biomasa, proveniente de desechos agrícolas o urbanos.

**CARGA ORGÁNICA (CO):** concentración del contaminante (Expresado en DQO o DBO) multiplicado por el caudal, se usa para definir la concentración de compuestos orgánicos en un volumen de la laguna por día.

**CLARIFICACIÓN:** es la técnica para la remoción de turbiedad y color en el agua por medio de coagulantes o polietrectrolitos, estos contaminantes se concentran y se generan lodos.

**CLARIFICACIÓN DINÁMICA:** es una centrifuga dispuesta de manera horizontal, para separar aceite del agua y por otro lado una sección para secar los sólidos recuperados.

**CUESCO:** es el endocarpio del fruto de aceite de palma, siendo la capa interna lo que lo hace un cuerpo duro y oscuro (cascara de la almendra).

**DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO (DBO):** es la medida de la cantidad de oxígeno que necesitan los microorganismos para oxidar la materia orgánica biodegradable.

**DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO (DQO):** es la medida del oxígeno requerido y equivalente de la materia orgánica que puede oxidarse en presencia de un agente químico.

**EFICIENCIA DE REMOCIÓN:** capacidad de un sistema de tratamiento para remover una carga contaminante contenida en el agua.

**EFLUENTE:** flujo o corriente de agua residual que sale después del tratamiento.

**MÉTODO ARGENTOMETRICO:** es un método volumétrico para la determinación de cloruros en aguas potables o superficiales.

**PLANTA DE BENEFICIO:** instalación física donde se realiza el proceso de extracción de aceite de palma.

**PROCESO AEROBIO:** método de tratamiento que consigue la eliminación de la materia orgánica por medio de la actividad biológica en presencia de oxígeno.

**PROCESO ANAEROBIOS:** es el tratamiento que permite la remoción de materia orgánica por actividad biológica en ausencia de oxígeno.

**PROCESOS FACULTATIVOS:** este tratamiento permite la eliminación de materia orgánica por actividad biológica indiferente de la presencia o ausencia de oxígenos.

## RESUMEN

Para el siguiente trabajo de grado se tuvo como objetivo principal desarrollar un sistema de tratamiento de las aguas residuales generadas durante el proceso productivo de la extracción de aceite de palma en la planta extractora CI SIGRA S.A. a nivel conceptual, para dar cumplimiento a la normativa actual para los valores límites máximo permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales presentados en la resolución 631 de 2015.

Para poder escoger la mejor propuesta de sistema de tratamiento de aguas residuales primero se procedió a conocer las características del agua a tratar, ya que la planta extractora se encuentra en construcción, no se contaba con una muestra de agua real, por lo tanto la caracterización del agua se tomó de referencia el promedio de 65 plantas extractoras en Colombia ubicadas en diferentes zonas del país; donde los principales problemas se encuentran en la concentración de DQO, DBO, grasas y aceites y los cloruros.

Después de conocer el estado del agua a tratar, los parámetros que necesitaban ser tratados y hacer una revisión bibliográfica, se procedió a plantear tres alternativas para el tratamiento. Posteriormente a esto se seleccionó el tratamiento por medio de una matriz de selección teniendo en cuenta los aspectos más importantes para la empresa y para una mejor eficiencia del tratamiento.

El tratamiento seleccionado involucraba un tratamiento biológico y debido a la dificultad para realizar una experimentación de un tratamiento biológico a nivel laboratorio, se recolectó información sobre la caracterización del efluente final del promedio de más de 30 plantas extractoras de aceite de palma que usan este tratamiento, pero se encontró que la concentración de cloruros aun no cumplía con la normativa, por lo que se planteó una alternativa para poder tratarlos la cual se evaluó a nivel laboratorio, el cual finalmente no cumple con el porcentaje de remoción necesario para cumplir la norma. Finalmente como el agua no cumple totalmente con los requerimientos para ser vertida a un cuerpo de agua, se opta por usar el efluente para el proceso de compostaje el cual beneficiaría a la empresa.

Tras conocer el tratamiento que se iba a realizar y los equipos necesarios para su funcionamiento se procedió a realizar el dimensionamiento de los mismos y se hace una estimación de los costos de la aplicación de este tratamiento elegido.

**Palabras clave:** aguas residuales, POME, tratamiento de aguas, biocarbón, tratamiento biológico, biogás, compostaje.

## INTRODUCCION

El cuidado del medio ambiente es un tema en el que todos están involucrados sobre todo la industria, quienes deben velar por generar la menor cantidad de contaminación al medio ambiente, por lo cual se establecen ciertas normativas que regulan los valores máximos permisibles de vertimientos tanto de sólidos, líquidos o gases que pueden ser liberados al ambiente.

Actualmente en las diferentes industrias se han visto en la obligación de realizar una gestión para la implementación de tratamientos que permitan disminuir la concentración de los contaminantes provenientes de los diferentes procesos que se desarrollen, para dar cumplimiento con la resolución 631 de 2015, la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales, y a los sistemas de alcantarillado público para Colombia y con esto poder evitar sanciones debido al incumplimiento de estos parámetros.

Por su parte CI SIGRA S.A es una empresa que se encuentra comprometida con el medio ambiente y su compromiso crece día a día. Ahora se encuentran en la construcción de su propia planta extractora de aceite de palma en el municipio de Maní y procurando no generar contaminación al medio ambiente, y evitando ser sancionados por el incumplimiento de la normativa, nace la necesidad de implementar un sistema de aguas residuales para el afluente generado en la extracción de aceite de palma provenientes principalmente del proceso de clarificación, separación y esterilización.

En la actualidad los residuos generados en la extracción de aceite de palma se han visto como una oportunidad de aprovechamiento, lo que los convierten en subproductos que pueden ser usados para procesos como biogás, pellets, compostaje, cogeneración, fertirriego, entre otras aplicaciones; pero para poder llegar a esto la biomasa generada o los residuos generados deben tener un tratamiento para que puedan ser usados en las aplicaciones mencionadas anteriormente.

En el presente trabajo se selecciona la alternativa más efectiva para el tratamiento del afluente generado en el proceso de extracción de aceite de palma, con el fin de evitar la contaminación a cuerpos de agua.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar un sistema de tratamiento de las aguas residuales generadas durante el proceso productivo de la extracción de aceite de palma en la planta extractora CI SIGRA S.A. a nivel conceptual.

### **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

1. Diagnosticar el estado actual de las aguas provenientes del proceso de extracción.
2. Seleccionar el tratamiento de aguas residuales de acuerdo al diagnóstico realizado.
3. Evaluar los tratamientos seleccionados para la remoción de cloruros por medio de un desarrollo experimental
4. Establecer especificaciones técnicas de todo el sistema de tratamiento.
5. Determinar el análisis financiero del proyecto

## 1. MARCO TEORICO

### 1.1 GENERALIDADES DE LA EMPRESA CI SIGRA S.A

CI SIGRA S.A. es una empresa ubicada en la ciudad de Bogotá en la carrera 46 No 13-95 en el sector de puente aranda, dedicada al desarrollo, producción y comercialización de productos grasos para la industria panificadora y de alimentos. Sus procesos se basan en la refinación y transformación del aceite crudo de palma en productos elaborados como lo son margarinas (pastelería, hojaldre, panadería, multipropósito y de cocina) y aceites (pastelería, hogar o uso institucional). Actualmente CI SIGRA S.A cuenta con un cultivo de 2000 hectáreas de palma de aceite ubicadas en la zona rural de maní Casanare en la vereda Bebea, donde se realiza la recolección del fruto para posteriormente ser llevados al proceso de extracción que es realizado por compañías externas.

### 1.2 GENERALIDADES PALMA AFRICANA DE ACEITE

La palma aceitera o palma de aceite pertenece a la familia de las palmáceas y es proveniente, como su nombre lo indica, de África. Es una planta típicamente ecuatorial (cultivable en países sobre el ecuador) cuya área de dispersión se extiende entre los 16 grados de latitud norte y 15 grados de latitud sur. Existen gran variedad de palmas que suelen diferenciarse por el color, forma y el aspecto de su fruto<sup>1</sup>. Estas plantas al desarrollarse sobre la zona ecuatorial requieren ciertas condiciones climáticas específicas para ser cultivadas. Dentro de estas condiciones de cultivo se sugiere su plantación en zonas de bosques húmedos tropicales con climas sobre todo cálidos húmedos que presenten temperaturas entre los 24 y 28°C. Son plantas con necesidades de agua muy altas para las cuales se necesitan zonas con precipitaciones entre 1800-2500 m.m y altitudes entre los 0 y 500 msnm. Requieren suelos limosos o arcillosos con pH entre 6 y 6,5. Su cultivo dura 4 años en desarrollo, 3 años en producción (cosecha) y en total 25 años aproximadamente de vida económica útil. Estas plantas presentan un rendimiento aproximado de 600 a 800 kg de almendras por año donde su cosecha se realiza de forma manual y esta se realiza cuando del racimo se desprendan de 8 a 10 frutos por si solos<sup>2</sup>.

**1.2.1 Palma africana en Colombia.** Actualmente la industria del aceite de palma se encuentra establecida como líder, a nivel mundial, en cuanto a la provisión de aceites y grasas gracias a la amplia gama de usos y aplicaciones que estos productos brindan, dentro de los cuales cabe resaltar su importancia dentro de

---

<sup>1</sup> MARADIAGA, J. A. y ROSALES, E. ciclo de capacitación sobre preparación y evaluación de proyectos de desarrollo agrícola. En: Ejercicio Práctico: Fomento Del Cultivo De La Palma Africana En El Valle Del Aguan.

<sup>2</sup> Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias, Quevedo (Ecuador) Estación Experimental Tropical Pichilingue Unidad de Documentación. Bibliografía sobre palma africana (*Elaeis guineensis*).

ramas industriales como la producción de cosméticos, industrias panificadoras, industrias jaboneras, producción de biocombustibles (Biodiesel), producción de helados entre otras cientos de aplicaciones. En este punto, Colombia, gracias a la extensión de los terrenos, climas tropicales, favorabilidad de suelos y demás condiciones se posiciona como el principal productor de aceite de palma en el continente y así mismo se posiciona como el cuarto productor a nivel mundial únicamente superado por Indonesia, Malasia y Tailandia<sup>3</sup>.

**Tabla 1.** Mayores productores de aceite de palma en el mundo. (Aceite de palma producción mundial)

País	Toneladas métricas (2016/2017)
Indonesia	34,000,000
Malasia	19,500,000
Tailandia	2,000,000
Colombia	1,143,000

**Fuente:** [Portafolio] Colombia, cuarto productor de aceite de palma en el mundo. Septiembre 18. [Consultado el Junio 15,2017]. Disponible en: <http://www.portafolio.co/economia/finanzas/colombia-cuarto-productor-aceite-palma-mundo-59140>.

Actualmente Colombia cuenta con aproximadamente 500,000 hectáreas de palma de aceite sembradas a lo largo del país en las zonas norte (cesar), central (Santander y norte de Santander), oriental (Meta y Casanare) y suroccidental (Tumaco y Caquetá) lo que permite la vasta producción de dicho aceite en millones de toneladas anuales<sup>3</sup>.

### 1.3 PROCESOS DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA

Los procesos de extracción de dicho aceite conllevan una secuencia de etapas que van descritas desde la obtención de los racimos de fruta fresca (RFF) de la cima de los árboles hasta la obtención del aceite crudo de palma que posteriormente es llevado al proceso de refinación para obtener finalmente el producto de mayor interés del proceso que es el aceite RBD. Estos procesos se pueden realizar con tecnologías diferentes con base a las necesidades de espacio en la planta o económicas que se tengan para el montaje y puesta en marcha de la misma. Sin tener en cuenta las etapas pre tratamiento del racimo (pesado de la fruta, control de calidad y llenado de las góndolas) se obtienen las fases con mayor relevancia dentro del proceso de extracción de aceite<sup>4</sup>.

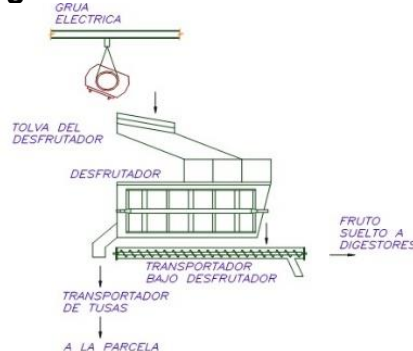
<sup>3</sup> [Portafolio] Colombia, cuarto productor de aceite de palma en el mundo. septiembre 18,. [Consultado el Junio 15,2017]. Disponible en: <http://www.portafolio.co/economia/finanzas/colombia-cuarto-productor-aceite-palma-mundo-59140>

<sup>4</sup> ALFARO, Marcos y ORTIZ, Elvin. Proceso De Producción De Aceite De Palma. 2006.

**1.3.1 Esterilización.** El proceso de esterilización es la primera etapa del proceso de extracción y se considera como una de las más importantes gracias a los cuatro objetivos principales que cumple. El primer objetivo es Inactivar las enzimas que causan el desdoblamiento del aceite y en consecuencia el incremento del porcentaje de ácidos grasos libres, el segundo objetivo es acelerar el proceso de ablandamiento de la unión de los frutos con su soporte natural (raquis o tusa), el tercer objetivo es disminuir la resistencia de los tejidos de la pulpa para lograr el fácil rompimiento de las células de aceite durante los procesos de digestión y prensado, y por ultimo tiene como objetivo deshidratar parcialmente las almendras contenida en la nuez, para facilitar su recuperación posterior y así ser aprovechadas en la biorefineria para la obtención de productos con valor agregado<sup>4</sup>.

**1.3.2 Desfrutado.** Se denomina con ese término al proceso mecánico mediante el cual se separan los frutos de las espigas del racimo. Para llevar a cabo el desfrute se utiliza un cilindro de 2 m de diámetro por 5 m de largo, que gira a una velocidad de 25 revoluciones por minuto (RPM) y es conocido como tambor rotatorio. Está equipado con paletas que golpean los racimos para desprender los frutos que pasan por unas ranuras longitudinales, y son recolectados y depositados directamente a una banda transportadora que los llevara a los digestores. Los racimos vacíos salen directamente a otra banda transportadora que los lleva bien sea al incinerador o al depósito, de donde saldrán para las aplicaciones en el campo. Existen perdidas de aceite en esta etapa del proceso causada por la impregnación de aceite a la tusa saliente del tambor, generando así perdidas entre 0,5% y 0,7% del peso de los racimos de fruta fresca (RFF); causantes de estas pérdidas son considerados los procesos de esterilización y el tipo de desfrutador empleado en el proceso, al igual que las alimentaciones irregulares al mismo (desfrutador)<sup>5</sup>. La figura 1 muestra el proceso de desfrutado con sus correspondientes entradas y salidas.

**Figura 1.** Proceso de desfrutado con entradas y salidas



**Fuente:** Cultivopalma. [En línea] Disponible en: <http://cultivopalma.webcindario.com/desfruta.html>. [Consultado el Junio 25,2017].

<sup>5</sup> [Cultivopalma] Desfrutado. [Consultado el Junio 25,2017]. Disponible en: <http://cultivopalma.webcindario.com/desfruta.htm>



**1.3.3 Prensado.** Es el método más comúnmente utilizado para la extracción y obtención del aceite, por medio de presionar los frutos contra las paredes o el fondo rompiendo así las células que contienen el aceite. De este proceso se obtiene la fracción líquida de la masa que se compone por aceite de pulpa de palma, agua y cierta cantidad de sólidos que se quedan en suspensión en el agua. La masa desaceitada (torta) la cual está compuesta por fibra y nueces, pasa al proceso de desfibración. Este proceso se efectúa en prensas de tornillos sinfín continuas, las cuales están compuestas por una canasta perforada horizontal de forma cilíndrica doble y por dos tornillos del tipo de sinfín<sup>6</sup>. Cada ciclo de trabajo de la prensa dura aproximadamente dos minutos y la capacidad del proceso es alrededor de cinco toneladas métricas por hora<sup>7</sup>. La eficiencia del prensado depende de dos factores; la presión adecuada aplicada a los conos de los tornillos y el estado de desgaste de canastas tornillos y conos, además de la buena digestión que se hizo. Para el caso del aceite de palma se suele utilizar el tipo de prensado en caliente, agregando agua a temperatura entre 90 y 95 °C en cantidades estrictamente controladas con el fin de debilitar más las células y facilitar o generar mayor eficiencia de obtención de aceite. El efluente sólido obtenido de este proceso está compuesto por la semilla del fruto y las fibras producidas en el proceso de prensado<sup>8</sup>. Existen dos tipos de prensado principalmente, el prensado en frío y el prensado en caliente.

**1.3.3.1 Prensado en frío.** Con el prensado en frío se obtiene menos aceite que con otros métodos, por eso es un proceso que solo usan pequeñas empresas especializadas. Los grandes fabricantes de aceite vegetal suelen usar disolventes y prensas de gran presión y velocidad, por lo que producen mucho más pero también generan más calor, oscureciendo el aceite y disminuyendo su aroma y su valor nutritivo. Las semillas, con cáscara incluida, pasan por una prensa de baja presión cuya temperatura interior se mantiene por debajo de los 40 °C<sup>9</sup>. Estos procesos se aplican para obtener aceites extra vírgenes sobre todo con altas propiedades y valor nutritivo, lo que incrementa el precio de venta de estos productos.

---

<sup>6</sup> [Cultivopalma] Prensado. [Consultado el Julio 1,2017]. Disponible en: <http://cultivopalma.webcindario.com/prensa.htm>

<sup>7</sup> ORTIZ, Ruben y FERNANDEZ, Olan. El Cultivo De La Palma Aceitera. Primera ed. San José, Costa Rica: Universidad estatal a distancia, 1994. p. 165-166

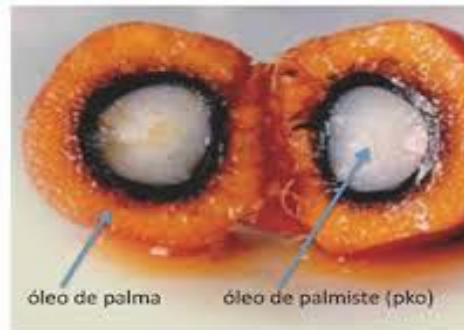
<sup>8</sup> ALFARO, Marcos y ORTIZ, Elvin. Proceso De Producción De Aceite De Palma. 2006.

<sup>9</sup> [Cultivopalma] Prensado en frío para la extracción de aceite. [Consultado el Julio 2,2017]. Disponible en: [http://www.plantasaceiteras.com/prensado\\_en\\_frio\\_extraccion\\_aceite.html](http://www.plantasaceiteras.com/prensado_en_frio_extraccion_aceite.html)

**1.3.3.2 Prensado en caliente.** La pasta se calienta antes de ser exprimida. De esta forma se debilitan las células del aceite y por ende se obtiene más aceite, pero se destruye una parte más o menos importante de las vitaminas y fitosteroles que forman la parte del aceite<sup>10</sup>.

**1.3.4 Extracción.** El palmiste constituye un producto importante en el proceso de extracción del aceite de palma ya que representa entre el 4% y el 7% del racimo como se puede observar en la figura 2, este se puede extraer por extracción mecánica o por solventes especiales<sup>11</sup>. Antes de que se extraiga el palmiste se debe llevar a una preparación la cual consiste en hacer un acondicionamiento de la humedad (4 y 5%) y la temperatura (60 y 70 °C), esto se realiza en un secador vertical; este silo tiene un ventilador centrifugo, tres entradas de aire caliente y tres intercambiadores de calor.

**Figura 2.** Pasta de palmiste



**Fuente:** infoagro. [En línea] Disponible en: [http://www.infoagro.com/herbaceos/oleaginosas/palma\\_aceite2.html](http://www.infoagro.com/herbaceos/oleaginosas/palma_aceite2.html). [Consultado en Junio 20,2017].

---

<sup>10</sup> [Plantas aceiteras] Prensado en caliente. [Consultado el Julio 2,2017]. Disponible en: <http://www.plantasaceiteras.com/plata-de-molienda-de-aceite/prensado-en-caliente.html>

<sup>11</sup> RUBIANO, German. Mejoramiento en la extracción de aceite de palmiste. En: Revista Palmas [en línea]. Vol. 19 (1998) <<https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/675/675>> [citado en 01 de agosto de 2017].

**Figura 3.**Silo de secado de almendras



**Fuente:** Cultivopalma. [En línea] Disponible en:  
<http://cultivopalma.webcindario.com/palmiste.html>. [Consultado el Junio 12,2017].

Después de haber realizado el acondicionamiento anterior se procede a llevar el palmiste a la prensa.<sup>12</sup>

**1.3.5 Clarificación.** Después de prensar los frutos de aceite de palma el aceite es bombeado a un clarificador. Por lo tanto la clarificación es la parte del proceso en la que se separa el aceite del resto de componentes o impurezas que pueda contener el aceite que corresponden a pedazos de nuez, arena, fibras, lodos livianos y pesados, entre otros. Aquí se hacen dos tipos de separación para separar los líquidos, se hace decantación y para separar sólidos y líquidos se usa la centrifugación.<sup>13</sup>

La clarificación se compone básicamente de.

- a) Desarenamiento estático y tamizado del aceite bruto.
- b) Recalentamiento previo y separación por decantación estática de los dos componentes principales del bruto: aceite puro y aguas lodosas.
- c) Sedimentación estática del aceite clarificado.
- d) Purificación del aceite por centrifugación.
- e) Deshidratación y enfriamiento del aceite y luego bombeo a los tanques de almacenamiento.
- f) Tratamiento centrífugo de las aguas lodosas para separación del aceite residual, mejorando el rendimiento de la instalación, por una parte y, además para separación de los sólidos en suspensión, reduciendo al máximo el impacto sobre la contaminación ambiental de la planta.

---

<sup>12</sup> PALMA DE ACEITE PALMA DE ACEITE. La extracción del aceite de palmiste [en línea]. <<http://cultivopalma.webcindario.com/palmiste.htm>> [citado en 17 de agosto de 2017].

<sup>13</sup> ALNICOLSA. Aceite de palma: usos, orígenes e impactos [en línea] <<http://taninos.tripod.com/aceitepalma.htm>> [citado en 12 de junio de 2017]

En la decantación se debe usar una temperatura no menor a 90 °C y tampoco mayor a 95°C y si llegase a superar la temperatura mencionada anteriormente se empieza a ebullición del líquido generando turbulencia e impidiendo la separación de las fases<sup>14</sup>, es importante mantener una temperatura elevada ya que eso disminuye la viscosidad de la mezcla lo que facilita la separación entre las fases. Se hace una separación por densidades, mencionando que la densidad del aceite es menor que la del agua, además recordando la inmiscibilidad entre el agua y el aceite, por lo tanto el aceite o las gotas de aceite suben y quedan en la parte superior como se puede observar en la figura 4 y este es retirado para eliminar la mayor cantidad de humedad. Este aceite que es almacenado en tanques ya se puede despachar para el consumo humano. En la decantación se logra separar aproximadamente el 90% del aceite.

**Figura 4.** Separación del agua y el aceite debido a la densidad



**Fuente:** PALMA DE ACEITE. Clarificación [en línea] <<http://cultivopalma.webcindario.com/clarifica.htm>> [citado en 05 de julio de 2017].

#### 1.3.5.1 Equipos usados durante la clarificación.

- Decantador estático de aceite:
- Tamices vibratorios
- Bombas de aceite bruto
- Recalentadores de Aceite
- Separador estático de aceite
- Equipo desarenador centrífugo
- Centrifugas purificadoras de aceite
- Secadores de aceite
- Tridecanter o decanter

El tridecanter es una centrífuga dispuesta de manera horizontal, con un funcionamiento continuo que aprovecha el principio de la fuerza centrífuga (que

<sup>14</sup> PALMA DE ACEITE. Clarificación [en línea] <<http://cultivopalma.webcindario.com/clarifica.htm>> [citado en 05 de julio de 2017].

puede llegar a ser hasta 10.000 veces más fuerte que la ejercida por la gravedad), para lograr una separación más rápida y eficiente que al usar el principio estático. Estos equipos cuentan con una sección cilíndrica para la separación del aceite inmisible en el agua, una sección cónica para secar los sólidos recuperados y un transportador tipo tornillo sin fin (llamado "espiral"), para el transporte de estos sólidos fuera del equipo. En la figura 5 se puede observar un tridecanter.

**Figura 5.**Tridecanter



**Fuente:** CENIPALMA. Clarificación dinámica: un nuevo panorama tecnológico para el proceso de extracción de aceite de palma en Colombia [en línea]. <<http://www.cenipalma.org/clarificacion-dinamica>> [citado en 15 de julio de 2017].

La implementación del sistema de clarificación dinámica en las plantas de beneficio permite rediseñar los procesos e incrementar la eficiencia, obteniendo así una serie de mejoras entre las cuales podemos incluir:

- Reducción del consumo de Agua.
- Reducción de los sólidos en los efluentes (<DQO)
- Reducción de emisiones de gases efecto invernadero en lagunas debido a la reducción de la carga orgánica.
- Extensión de la vida útil de las lagunas.
- Torta del Tridecanter como Subproducto adicional para la alimentación de ganado.<sup>15</sup>

**1.3.6 Desfibración.** La torta que quedó del proceso de extracción pasa al proceso de Desfibración, posteriormente a eso se hace un secado de esta masa, que se hace por medio de evaporación espontánea de la humedad con el fin de poder someterla a una corriente de aire que consiste en una columna vertical en la que el aire pasa a una velocidad entre 8 y 12 m/s que va dirigida hacia un ciclón, éste se

---

<sup>15</sup> CENIPALMA. Clarificación dinámica: un nuevo panorama tecnológico para el proceso de extracción de aceite de palma en Colombia [en línea]. <<http://www.cenipalma.org/clarificacion-dinamica>> [citado en 15 de julio de 2017].

encarga de separar el aire y las fibras; por otro lado se separan las fibras de las nueces, para de allí poder recuperar la almendra o palmiste, para lograr esta recuperación se hace la ruptura de la cascara de las nueces.

Por donde se transporta la torta tiene una serie de paletas que permiten el transporte y además hace que se desintegre la torta, la velocidad a la que trabajan las paletas esta entre 80 y 85 rpm, también se puede conseguir la reducción de la humedad de la fibra. Las paletas transportan las nueces hasta el extremo final estas se secan, se pulen y se almacenan en silos, para ser llevados a trituración esta se debe de hacer de manera cuidadosa para no romper las almendras que se encuentran en ellas. <sup>16</sup>

## 1.4 TRATAMIENTO DE EFLUENTES

**1.4.1 Tratamiento preliminar.** Algunos de los tratamientos preliminares se nombran a continuación.

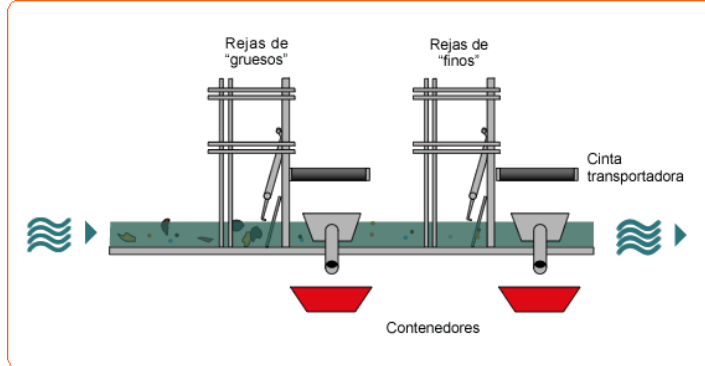
- **Rejillas:** La operación de desbaste consiste en la eliminación de sólidos gruesos y sedimentables por retención en las superficies. Los elementos utilizados para el desbaste son las rejillas y los tamices. Las rejillas presentan aberturas mayores de 35 mm mientras que en los tamices no serán superiores a 6 mm. Las rejillas se utilizan para separar los sólidos grandes, que puedan producir daños y obturaciones en bombas, válvulas, conducciones y otros elementos. El tamiz se usa tanto para el tratamiento primario como para la eliminación de sólidos en suspensión en el tratamiento secundario. La limpieza de las rejillas y tamices se puede realizar mecánica o manualmente.<sup>17</sup>

---

<sup>16</sup> PALMA DE ACEITE. Desfibración [en línea]. <<http://cultivopalma.webcindario.com/desfibra.htm>> [citado en 17 de julio de 2017].

<sup>17</sup> SANS, Ramón. Ingeniería ambiental: contaminación y tratamientos. Barcelona. Marcombo, 1989. 11 p. ISBN 84-267-0742-4

**Figura 6.** Proceso durante el desbaste



**Fuente:** GOMEZ. D. (2016). Slideshare: trabajo del agua. Recuperado de: <https://www.slideshare.net/desigomez/trabajo-del-agua-59268621>.

Esta operación consiste en hacer pasar el agua residual a través de una reja. De esta forma, el desbaste se clasifica según la separación entre los barrotes de la reja en:

- Desbaste fino: con separación libre entre barrotes de 10-25 mm.
  - Desbaste grueso: con separación libre entre barrotes de 50-100 mm.
- **Tamizado:** Consiste en una filtración sobre soporte delgado, y sus objetivos son los mismos que se pretenden con el desbaste, es decir, la eliminación de materia que por su tamaño pueda interferir en los tratamientos posteriores. Existen distintos tipos de tamizadores como se muestra en la figura 7.

**Figura 7.** Tipos de tamizadores para tratamiento de aguas



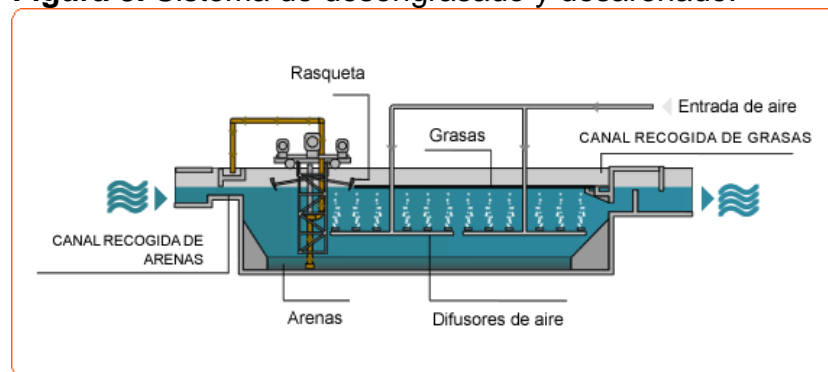
**Fuente:** AGUILA. D. (2014). Aguaymas: depuración de aguas residuales. Rescatado de: <http://aguaymascosas.blogspot.com.co/2012/02/3-depuracion-de-aguas-residuales.html>.

Según las dimensiones de los orificios de paso del tamiz, se distingue entre:

- **Macrotamizado:** Se hace sobre chapa perforada o enrejado metálico con paso superior a 0,2 mm. Se utilizan para retener materias en suspensión, flotantes o semiflotantes, residuos vegetales o animales, ramas, etc, de tamaño entre 0,2 y varios milímetros.
- **Microtamizado:** Hecho sobre tela metálica o plástica de malla inferior a 100 micras. Se usa para eliminar materias en suspensión muy pequeñas contenidas en el agua de abastecimiento (Plancton) o en aguas residuales pretratadas.<sup>18</sup>
- **Desarenado.** El objetivo de esta operación es eliminar todas aquellas partículas de granulometría superior a 200 micras, con el fin de evitar que se produzcan sedimentos en los canales y conducciones, para proteger las bombas y otros aparatos contra la abrasión, y para evitar sobrecargas en las fases de tratamiento siguiente.

En caso de que sea necesario un bombeo, desbaste y desarenado deben ir antes de éste. Pero hay veces que es conveniente situar el bombeo previo al desarenado aun a costa de un mayor mantenimiento de las bombas. Esto ocurre cuando los colectores de llegada están situados a mucha profundidad, cuando el nivel freático está alto, etc. En la figura 8 se puede observar como este procedimiento se complementa con el desengrasado, si se es necesario<sup>19</sup>.

**Figura 8.** Sistema de desengrasado y desarenado.



**Fuente:** AGUILA. D. (2014). Aguaymas: depuración de aguas residuales. Rescatado de: <http://aguaymascosas.blogspot.com.co/2012/02/3-depuracion-de-aguas-residuales.html>.

<sup>18</sup> Metcalf & Eddy. Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización. Tercera edición. Pag 40.

<sup>19</sup> TRATAMIENTOS DEL AGUA Y DEPURACION. Pretratamientos de aguas residuales. [ en línea] <<http://www.tratamientosdelaguaydepuracion.es/pretratamientos-aguas-residuales.html>> [citado en 20 de julio de 2017]



## 1.4.2 Tratamiento primario

- **Desaceitado-desengrasado.** El objetivo en este paso es eliminar grasas, aceites, espumas y demás materiales flotantes más ligeros que el agua, que podrían distorsionar los procesos de tratamiento posteriores. Además también sirve para enfriar las aguas de tratamiento ya que es importante que la temperatura baje para que en el caso de que continúe con otros procesos, este sea más fácil.

El desaceitado consiste en una separación líquido-líquido, mientras que el desengrase es una separación sólido-líquido. En ambos casos se eliminan (grasas, aceites, espumas) mediante insuflación de aire, para desemulsionar las grasas y mejorar la flotabilidad; como se puede observar en la figura 8. Se podría hacer esta separación en los decantadores primarios al ir provistos éstos de unas rasquetas superficiales de barrido, pero cuando el volumen de grasa es importante, estas rasquetas son insuficientes y la recogida es deficitaria.

- **Preaireación:** sus objetivos son varios.
- Mejorar la tratabilidad del agua, en cuanto que está llega séptica, contaminada, a la depuración.
- Control de olores.
- Mejorar la separación de las grasas.
- Favorecer la floculación de sólidos.
- Mantener el oxígeno en la decantación aun a bajos caudales.
- Incrementar la eliminación de DBO5.
- Evitar los depósitos en las cámaras húmedas.

### Métodos de Preaireación

Son dos principalmente: difusores y aireadores mecánicos: Los difusores se clasifican en.

- Porosos: Con forma de disco o de tubos. Construidos de  $\text{SiO}_2$  (óxido de silicio) o de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (óxido de aluminio), pueden ser de tipo cerámico o estar construidos sobre una masa porosa con ligazón cerámica.
- No porosos: de tipo boquilla, orificios, válvulas... Los de tipo boquilla y orificios están construidos de metal o plástico, tienen aberturas anchas y sueltan unas burbujas más grandes que los difusores de tipo poroso. La cantidad de difusores requeridos se calcula determinando la cantidad total de aire necesario y dividiéndolo por el caudal medio recomendado para cada difusor. Normalmente este caudal es de 1,9-7 l/s difusor. La distancia entre difusores es generalmente de 250-600 mm.

Según los factores mencionados anteriormente se debe estructurar que secuencia debe tener el tratamiento de aguas, primero se realiza un pretratamiento que

consiste en retirar o reducir los sólidos suspendidos del agua ya que estos pueden ser una interferencia para los siguientes tratamientos.

Una vez se haya realizado un acondicionamiento al agua a tratar se puede pasar a un tratamiento primario, su objetivo consiste en retirar los sólidos que no lograron ser removidos en el pretratamiento<sup>20</sup>, por medios físicos o mecánicos de una parte sustancial del material sedimentable o flotante. Es decir, el tratamiento primario es capaz de remover no solamente la materia que incomoda, sino también una fracción importante de la carga orgánica y que puede representar entre el 25% y el 40% de la DBO y entre el 50% y el 65% de los sólidos suspendidos<sup>21</sup>.

- **Trampa de grasa:** El agua se retiene por 24 horas para que las grasas permanezcan en la superficie del tanque, el fin de este tratamiento es recuperar parte del aceite que queda en las aguas para ser retomado al proceso. La decantación primaria consiste en la reducción de los sólidos y materias flotantes suspendidas de las aguas residuales por efecto de la gravedad.

En la sedimentación de partículas discretas éstas decantan de forma independiente y con una velocidad de sedimentación constante, que bajo ciertas hipótesis viene dada por la Ley de Stokes. Así, en el movimiento horizontal del fluido, la trayectoria de sedimentación de la partícula es una línea recta.

En la decantación primaria, las partículas tienen ciertas características que producen su floculación durante la sedimentación. Así, al chocar una partícula que está sedimentando con otra partícula, ambas se agregan formando una nueva partícula de mayor tamaño y aumentando, por tanto, su velocidad de sedimentación. En este caso, la trayectoria de la partícula en un depósito de sedimentación será una línea curva de pendiente creciente.

**1.4.3 Tratamiento secundario.** El tratamiento secundario comprende tratamientos biológicos convencionales<sup>22</sup>.

- **Lodos activados:** Están dirigidos a transformar sustrato orgánico soluble o insoluble, en forma coloidal o suspendida, en sólidos biológicos floculentos, que pueden ser asentados y de este modo separados del agua que contaminan por medio de los procesos convencionales de sedimentación. En otras palabras se pretende transformar la “contaminación” de las aguas, presente en forma de

---

<sup>20</sup> MASSIEU, Bernardo. Tratamiento de aguas residuales [en línea] <http://files.bernardo-servin-massieu.com/200000057-b3f9cb4e88/residuales.pdf> [citado en 20 de julio de 2017].

<sup>21</sup> CENTRO PANAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y CIENCIAS DEL AMBIENTE. (2002). Conferencia sistema de tratamiento de aguas residuales.

<sup>22</sup> RAMALHO, Rubens. Tratamiento de aguas residuales. Quebec Editorial Reverte, 2003. 10 p. ISBN 84-291-7975-5.

DBO soluble e insoluble en biomasa, que contendrá gran parte de la DBO original del sustrato orgánico, pero que puede ser separada del tanque de aireación por sedimentación y filtración<sup>23</sup>. Básicamente está compuesto por un tanque de aireación y un sedimentador secundario.

El residuo orgánico que se produce es introducido a un reactor, en el que se encuentra un cultivo bacteriano aerobio en suspensión. Las bacterias son las causantes de la descomposición del residuo orgánico. Para controlar esos lodos activados es necesario tener en cuenta los niveles de oxígeno disuelto en el tanque de aireación la cantidad de fango recirculado y el control de purga de fango activado<sup>24</sup>. En la figura 9 se puede observar una planta de lodos activados.

**Figura 9.** Planta de lodos activados



**Fuente:** TORIÑO, M. (2008, agosto, 14) PLANTA DE LODOS ACTIVADOS (archivo de video). Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=2rmcR4WDnGw>.

- **Aireación prolongada.** Este proceso consiste en la adición de oxígeno al sistema para generar que se produzcan microorganismos aerobios, con el fin de que las células lleven a cabo su propia autooxidación, provocando una reducción en el material celular<sup>25</sup>.

La estabilización por contacto es un método capaz de reducir los contaminantes contenidos en el agua en un corto tiempo, está compuesto por dos tanques de aireación uno es un reactor de contacto, este ayuda a favorecer la rápida adsorción de los residuos orgánicos en el floc biológico y de ahí es enviada a un reactor de estabilización separados por un sedimentador secundario; allí se da

---

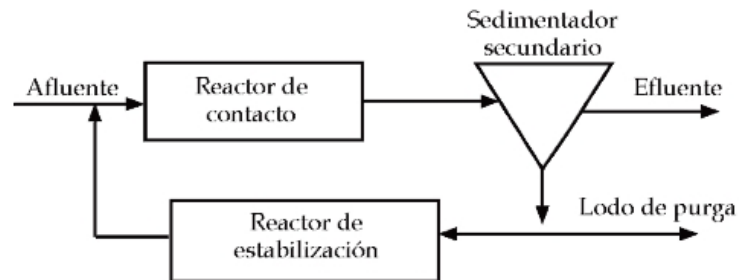
<sup>23</sup> OROZCO, Álvaro. Bioingeniería de aguas residuales: teoría y diseño. Editor: acodal, 2005. 455 p. ISBN 9689645453

<sup>24</sup> NODAL BECERRA, Elida. Procesos biológicos aplicados al tratamiento de agua residual. En: Revista ingeniería hidráulica y ambiental. Vol. 12. No. 4, 2001. 54 p.

<sup>25</sup> OROPEZA, Norma. Lodos residuales: estabilización y manejo. En: Revista caos conciencia. Vol 1, 2006. 64 p.

la degradación producida por los microorganismos presentes en el floc biológico. En la figura 10 se ve el arreglo de este sistema<sup>26</sup>.

**Figura 10.** Configuración del sistema con estabilización por contacto



**Fuente:** UNINORTE. (2017). Revista científica ingeniería y desarrollo. Rescatado de:  
<http://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/article/viewArticle/386/4005>.

**Lagunas de estabilización.** Se combinan, principalmente, procesos anaeróbicos con procesos facultativos y aeróbicos<sup>27</sup>. Se consideran cuatro tipos de lagunas: las anaerobias acidogénicas, las anaerobias metanogénicas, las facultativas y las aerobias. En las dos primeras predominan los procesos de fermentación anaerobia (en ausencia de oxígeno), obteniéndose como resultado de esto, ácidos grasos de cadena corta y productos intermedios en las acidogénicas, y dióxido de carbono y metano en las lagunas metanogénicas. En las lagunas facultativas ocurren, a variadas intensidades y predominio, los procesos de fermentación anaerobia, oxidación aerobia y reducción fotosintética. En las aerobias, básicamente ocurre la transformación de la materia orgánica en presencia de oxígeno, produciéndose agua, dióxido de carbono y oxígeno.

<sup>26</sup> MAÑUNGA, Tatiana. Tratamiento de agua residual domestica sin clarificación primaria en un sistema de lodos activados en la modalidad de estabilización por contacto. *En: Revista científica ingeniería y desarrollo*. Vol 30. No.2, 2012. ISSN 0122-3461

<sup>27</sup> GARCIA NUÑES, Jesús. Manejo de efluentes de plantas extractoras: Diseño de lagunas de estabilización. Colombia. Cenipalma, 1997. 35p. (Boletín técnico: No. 11).

**Figura 11.** Laguna de estabilización



**Fuente:** ALUCARD. (2010). Bioquímica: Filtración.

Recuperado de:

<http://josedanielvgrtg8.blogspot.com.co/2010/06/filtracion.html>.

Las lagunas anaerobias metanogénicas remueven entre un 80 y 90% de la DBO, DQO y ST. La primera laguna facultativa tiene una remoción entre el 70 y el 80% de la materia orgánica, y la segunda laguna facultativa remueve entre el 50 y el 65%. En las lagunas de desaceitado y enfriamiento regularmente no se considera ninguna remoción; sin embargo, debido a procesos físicos de separación se alcanza a remover hasta un 30% de ST, DBO y DQO. No obstante, en algunas oportunidades se presenta un incremento en los aceites y grasas y esto se debe, principalmente, al aceite que se escapa de los sólidos que lo tenían atrapado<sup>28</sup>.

**1.4.4 Tratamiento terciario.** El tratamiento terciario tiene como finalidad principalmente lograr la eliminación de todo tipo de contaminantes que no fueron retirados en los dos primeros tratamientos, además de eliminar también la carga orgánica residual que pudiese haber quedado en el efluente<sup>29</sup>. Este tipo de tratamientos también son conocidos como tratamientos avanzados debido a que el nivel de limpieza que se logran en las aguas es de un alto grado<sup>30</sup>. A su vez el tratamiento terciario es el más costoso de todos, por este motivo muchas plantas de tratamiento de aguas residuales no lo incluyen en sus procesos<sup>31</sup>. Dentro de los principales tipos de tratamiento terciario se encuentran el intercambio iónico, osmosis inversa, electrodiálisis, oxidación química, procesos “sonozone” y adsorción en carbón activado.

---

<sup>28</sup> GARCIA NUÑES, Jesús. Manejo de efluentes de plantas extractoras: Diseño de lagunas de estabilización. Colombia. Cenipalma, 1997. 35p. (Boletín técnico: No. 11).

<sup>29</sup> [Cyclucid] Tratamiento terciario. [Consultado el Julio 15,2017]. Disponible en: <http://www.cyclucid.com/tecnologias-aguas-residuales/tratamiento-aguas/tratamiento-terciario/>

<sup>30</sup> RAMALHO, Rubens Sette. Tratamiento De Aguas Residuales. Revert, 1990. p. 585-685

<sup>31</sup> JACOBSON, Willard. Programa De Formación Continua En Educación Ambiental Para Profesores Y Asesores De Ciencias De Enseñanza Secundaria. Bilbao, España: Los libros de la catarata, 1996. p. 84-85

- **Intercambio iónico.** El intercambio iónico es un proceso en donde básicamente los iones se mantienen unidos a los grupos funcionales sobre la superficie de un sólido<sup>32</sup>. Esto se logra por medio de la utilización de resinas, precisamente de intercambio iónico, las cuales cuentan con la capacidad de eliminar iones selectivamente, por medio del fenómeno explicado anteriormente, y posteriormente cederlos a una solución fuerte de regenerante<sup>33</sup>. Estos aniones indeseables presentes en las aguas normalmente son intercambiados por sodio, hidrogeno y otro tipo de iones que se encuentran presentes en estas resinas<sup>34</sup>. Debido a la eficiencia en la fijación de cierto tipo de iones contaminantes, este procedimiento se ha implementado en los últimos años como una alternativa importante en el campo del tratamiento de aguas residuales. Inicialmente en los procesos de intercambio iónico, las únicas resinas que solían ser utilizadas eran las zeolitas naturales, las cuales contaban con una capacidad de intercambio baja, lo cual ponía límites en cuanto a las aplicaciones que se pudieran dar a este tipo de procesos.

Estas dificultades motivaron a la creación e implementación de nuevas resinas de intercambio iónico, con fin de sustituir a las originales (zeolitas), surgiendo así resinas sintéticas como el estireno y divinil-benceno (DVB). Estas nuevas resinas son básicamente polímeros insolubles a los cuales “se añaden grupos básicos o ácidos mediante reacciones químicas”<sup>35</sup>. La adición de estos grupos permite al polímero o le da la característica de poder realizar un intercambio reversible con los iones que se encuentren presentes en una disolución. La figura 12 muestra los dos tipos de resinas utilizadas, sintéticas (polímeros) y naturales (zeolita). Estas resinas son reutilizables, lavándolas con una solución de sal común para eliminar calcio y magnesio, restaurando la condición original de la resina<sup>37</sup>.

**Figura 12.** Resinas naturales y resinas sintéticas



**Fuente:** RAMALHO, Rubens Sette. Tratamiento De Aguas Residuales. Revert, 1990. p. 585-685.

---

<sup>32</sup> RAMALHO, Rubens Sette. Tratamiento De Aguas Residuales. Revert, 1990. p. 585-685

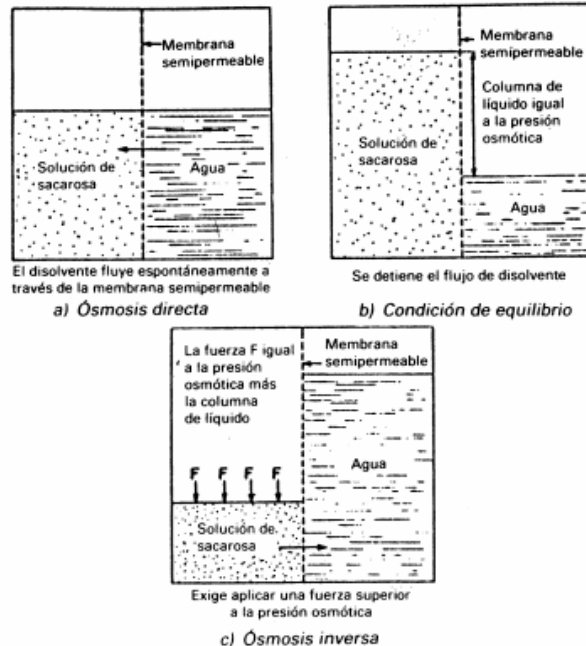
<sup>33</sup> LAPEÑA, Miguel. Tratamiento De Aguas Industriales: Aguas De Proceso Y Residuales. Marcombo, 1989. p. 73-74

<sup>34</sup>NEMEROW, Nelson Leonard y DASGUPTA, Avijit. Tratamiento De Vertidos Industriales Y Peligrosos. Ediciones Díaz de Santos, 1998. p. 156-157.

- **Ósmosis inversa.** La ósmosis es un proceso en el cual se genera un equilibrio entre las moléculas presentes en un solvente, las cuales son capaces de atravesar por medio de una membrana permeable para poder diluir una solución más concentrada. “En el tratamiento de aguas residuales, el afluente contaminado se pone en contacto con una membrana a una presión superior a la de la presión osmótica de la solución. Bajo estas condiciones, el agua con una cantidad muy pequeña de contaminantes pasa a través de una membrana. Los contaminantes disueltos se concentran en el compartimiento de agua residual. Este concentrado, que posiblemente sea una pequeña fracción del volumen total de agua residual a tratar, se descarga. Se obtiene agua purificada en el otro compartimiento”<sup>35</sup>.

En la figura 13 se representan tres tipos de sistema de ósmosis, el primero hace referencia a ósmosis directa, en el segundo se representa la condición de equilibrio y en el tercero se representa cuando se aplica una presión superior a la presión osmótica.

**Figura 13.** (a) Ósmosis directa, (b) condición de equilibrio, (c) presión aplicada mayor a la presión osmótica



**Fuente:** RAMALHO, Rubens Sette. Tratamiento De Aguas Residuales. Revert, 1990. p. 617.

En la práctica el agua residual fluye a una presión elevada por medio de tubos internos, que pertenecen a los sistemas de configuración tubular utilizados en este proceso, formados por materiales semipermeables y que soportan altas

<sup>35</sup> RAMALHO, Rubens Sette. Tratamiento De Aguas Residuales. Revert, 1990. p. 585-685

presiones; El agua purificada es separada en el tubo exterior el cual está construido con materiales comunes y se encuentra a presión atmosférica<sup>36</sup>.

- **Oxidación Química:** La oxidación química es un proceso en el cual el estado de oxidación de un átomo es aumentado. El átomo que se está oxidando puede estar en la forma elemental o en una sustancia como molécula o como ion<sup>37</sup>. Dentro de los procesos de oxidación química se encuentran la cloración y la ozonación los cuales son los más conocidos por su eficiencia en este campo del tratamiento de aguas.

El proceso de cloración es ampliamente utilizado en tratamiento de efluentes tanto industriales como de origen urbano. Dentro de las aplicaciones a nivel industrial se encuentran el tratamiento de vertimientos de industrias petroquímicas, farmacéuticas textiles, plantas de azúcar de caña entre otras. Dentro de los objetivos del proceso de cloración se encuentran la oxidación de ciertos iones metálicos (por ejemplo de ferroso a férrico), la oxidación de cianuros a productos inocuos, eliminación de colores y olores, reducir la demanda biológica de oxígeno (DBO) y el último y más importante debido a sus propiedades (hablando del cloro) es la desinfección causada gracias a la fuerte capacidad de oxidación que inhibe crecimiento de algas y bacterias en las aguas<sup>41</sup>. Como se ha visto el cloro es o era el reactivo más ampliamente utilizado con fines de oxidación, pero debido a inconvenientes organolépticos y a la creciente complejidad de su forma de empleo debido a interferencias causadas por otras sustancias en el agua, el proceso de ozonización ha tomado más fuerza. El ozono, a diferencia de otro tipo de reactivos oxidantes, tiene como ventaja la destrucción de micropolucionantes, mejora de sabores y olores y eliminación del color<sup>38</sup>.

Dentro de los factores que han hecho que el ozono tenga gran acogida como compuesto oxidante es que este facilita fácilmente con los productos orgánicos no saturados que se encuentren en las aguas, tiende a eliminar la formación de espuma en aguas residuales, rompe y oxida los anillos aromáticos y por último y más importante es que luego de sus reacciones de oxidación, el ozono se convierte en oxígeno en las aguas, a diferencia de otros oxidantes como el cloro que únicamente quedan como contaminante en las mismas<sup>39</sup>.

- **Adsorción en carbón activado:** El carbón activo es un término que abarca una gama muy amplia de materiales amorfos carbonaceos los cuales presentan altos

---

<sup>36</sup> RAMALHO, Rubens Sette. Tratamiento De Aguas Residuales. Revert, 1990. p. 585-685

<sup>37</sup> Tunay, et al. Chemical Oxidation Applications for Industrial Wastewaters. 1 ed. GB: Iwa Publishing, 2010. p. 1-29.

<sup>38</sup> GOMELLA,C. y GUERREE,H. Tratamiento De Aguas Para Un Abastecimiento Publico. Barcelona: Editores técnicos asociados S.A, 1977. p. 151-152

<sup>39</sup> RAMALHO, Rubens Sette. Tratamiento De Aguas Residuales. Revert, 1990. p. 585-685



niveles de porosidad y una superficie superficial extendida. Estos carbones activos pueden ser obtenidos por pirolisis ya sea rápida o parcial de una gran cantidad de materiales o sustancias carbonosas<sup>40</sup>. Dentro de los materiales de preparación para los carbones se encuentran, como se mencionó anteriormente, materias primas carbonosas como madera, lignino, carbón y cascaras de nuez<sup>45</sup>.

El carbón activado además, gracias a las propiedades anteriormente mencionadas, es un material único en cuanto a adsorción de líquidos y gases, lo que le da un lugar privilegiado en términos de producir ambientes limpios que implica procesos de purificación de aguas y separación y purificación en las industrias químicas<sup>41</sup>. En cuanto al tratamiento de las aguas residuales, la adsorción por carbón Activado se utiliza cuando el efluente contiene compuestos orgánicos tóxicos que puedan impedir la depuración biológica (biodegradación), además el carbón activado, como se menciona anteriormente, presenta una alta superficie interna (entre 500 y 1500 m<sup>2</sup>/ g) y presenta una gran variedad de grupos funcionales en su organización que ayudan y lo hacen ideal para el proceso de adsorción. El carbón activado además gracias a su estructura de grafito, puede almacenar elementos como lo son el oxígeno, nitrógeno e hidrogeno en sus vértices y bordes. Dentro de la gama de adsorbentes que existen (sílice gel, alúmina, carbón activado, etc.) el carbón activado suele ser el más utilizado gracias a la alta capacidad de adsorción de compuestos orgánicos contaminantes de bajo peso molecular como el fenol<sup>42</sup>. Algunos de los compuestos contaminantes de aguas eliminados efectivamente por parte de los carbones activados se presentan en la tabla 2 descritos por el autor Oscar Martínez.

---

<sup>40</sup> BANSAL, Roop Chand y GOYAL, Meenakshi. Activated Carbon Adsorption. CRC press, 2005.

<sup>41</sup> MARSH, Harry y RODRÍGUEZ-REINOSO, Francisco. Activated Carbon. 1. ed. ed. Amsterdam [u.a.]: Elsevier, 2006. p. 15.

<sup>42</sup> MURANAKA, Cnthia Tiemi. Combinao De Adsoro Por Carvo Ativado Com Processo Oxidativo Avocado (POA) Para Tratamento De Efluentes Contendo Fenol. Universidade de São Paulo, 2010. p. 28-29

**Tabla 2.**Contaminantes adsorbidos efectivamente por los carbones activados

Algunos contaminantes adsorbidos por Carbón activado			
Pesticidas	Halogenados	Aromáticos	Otros
2,4-D	Cloro	Fenol	Hexano
DDT	Diclorobencenos	Naftaleno	Metil Naftaleno
Linuron	Diclorocresol	Hidroquinona	Xilenos
Alacloro	Dicloroetileno	Benceno	MEK
Desetilatraccina	Dicloro Fenol	Tolueno	Atraccina
Malation	Cloro tolueno	Cresol	Etileno
Aldrín	Dióxido de cloro	Antraceno	Tetracloruro de carbono
Diuron	Cloro fenol	Fenilalanina	Acetato de vinilo
Carbofurano	Bromo	Nitrofenol	Dietil ftalato

**Fuente:** MARTÍNEZ ÁVILA, Oscar Mauricio. Evaluación De Un Proceso Integrado De Adsorción Y Oxidación Avanzada Para El Tratamiento De Aguas Residuales Industriales Reales. Universidad Nacional de Colombia, 2012. p. 22-23.

Recientemente los carbones activos que se han empleado más profundamente en la industria de tratamiento de agua han sido los granulares y en polvo, esto con el fin de eliminar olores y sabores que pueden producir ciertos contaminantes<sup>43</sup>.

Una de las ventajas de los carbones activados sobre otros métodos de tratamiento es el poder que presentan para su reutilización, esto, como lo menciona John Happel, se logra mediante un fuerte calentamiento del carbón en presencia de vapor en hornos destinados a este fin. Posterior a esto el carbón puede ser devuelto a sus labores ya sea en columnas de adsorción u otros medios<sup>44</sup>. Entrando en detalle del proceso de reactivación de los carbones, se logra por medio de temperaturas de hasta 930°C en hornos de hogar múltiple o en hornos rotatorios, permitiendo la reactivación del carbón hasta 30 veces<sup>49</sup>.

El fenómeno que explica la capacidad de “limpieza”, desorción o reactivación de los carbones es explicado por Walter J. Weber donde en el tipo de adsorción física, la molécula adsorbida no está fija en un lugar específico de la superficie, lo que le permite estar libre y trasladarse dentro de la interfase, siendo así que la adsorción de la mayoría de sustancias orgánicas en el agua con carbón activado se considera de naturaleza física. Cuando el adsorbato sufre una interacción química con el adsorbente, el fenómeno es conocido con una adsorción química, adsorción activa o simplemente quimisorción. En el caso de

<sup>43</sup> RAMALHO, Rubens Sette. Tratamiento De Aguas Residuales. Reverté, 1990. p. 585-685

<sup>44</sup> HAPPEL, John y JORDAN, Donald G. Economía De Los Procesos Químicos. Reverté, 1981. p. 322

la quimisorción, las energías de adsorción son elevadas, del orden de las de un enlace químico, debido a que el adsorbato da al rompimiento y formación de unos enlaces fuertes localizados en los centros activos del adsorbente. En la mayoría de los fenómenos de adsorción se suelen presentar estos dos fenómenos, donde de hecho se presenta un nivel de dificultad para distinguir o diferenciar entre la adsorción química y física<sup>45</sup>.

Para el caso del carbono la fuerza utilizada por los átomos de la superficie del mismo para capturar otros átomos es conocida como fuerza de London y es uno de los tipos de fuerzas de van der Waals capaz de retener un átomo mas no tan fuerte como para formar uniones irreversibles<sup>46</sup>.

En el proceso de adsorción, los porcentajes de eliminación dependen fundamentalmente del tiempo de contacto entre el agua residual y el carbón activo<sup>49</sup>.

En los estudios de adsorción física la información experimental más relevante se presenta en forma de isoterma de adsorción, la cual es un gráfico de las cantidades de equilibrio adsorbido contra la presión relativa o más precisamente las relación de equilibrio entre adsorbente y adsorbato<sup>47</sup>. Es preciso no fijarse en los resultados de adsorción arrojados por los equipos informáticos, en su lugar es preferible utilizar los puntos manuales y los conocimientos de los procesos de adsorción para la realización de la isoterma<sup>48</sup>. La figura 14 muestra el esquema de la isoterma de adsorción.

---

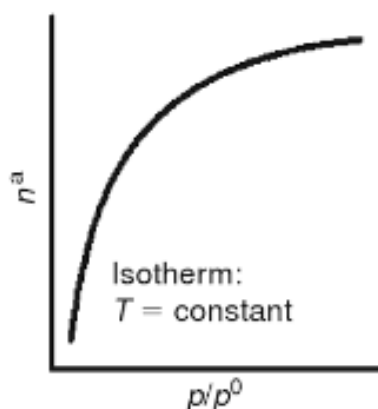
<sup>45</sup> WEBER, Walter J. Control De La Calidad Del Agua: Procesos Físicoquímicos. Revert, 1979. p. 215-220

<sup>46</sup> [Carbotecnia] ¿Qué Es El Carbón Activado? Carbotecnia. a.

<sup>47</sup> RAMALHO, Rubens Sette. Tratamiento De Aguas Residuales. Revert, 1990. p. 585-685

<sup>48</sup> MARSH, Harry y RODRÍGUEZ-REINOSO, Francisco. Activated Carbon. 1. ed. ed. Amsterdam [u.a.]: Elsevier, 2006. p. 150

**Figura 14.** Esquema isoterma de adsorción



**Fuente:** MARSH, Harry y RODRÍGUEZ-REINOSO, Francisco. Activated Carbon. 1. ed. ed. Amsterdam [u.a.]: Elsevier, 2006. p. 15

Existen diferentes tipos de isotermas dentro de las cuales las más empleadas en estos procesos de adsorción son la isoterma de Langmuir, Freundlich, BET (Brunauer, Emmet y Teller) y Temkin. Para el caso de la isoterma de Langmuir se da la suposición de que el soluto se adsorbe en forma de una película monomolecular en la superficie del adsorbente. En la isoterma tipo BET la suposición se centra en que las capas de las moléculas se adsorben en la parte superior de moléculas que han sido adsorbidas previamente y cada una de las capas se adsorbe por el modelo de Langmuir<sup>53</sup>.

## **1.5 ALTERNATIVAS DE APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS (BIOREFINERIAS)**

El concepto de biorefinería integrada como lo explica K.C. Das es un término prestado de la evolucionada refinería petrolera donde es válido afirmar que no se desperdicia nada en proceso hablando en términos de que a partir de crudo fósil se logra producir energía (combustibles como gasolina y diésel), químicos (amoniaco y azufre por ejemplo) y otros productos como plásticos y lubricantes. En términos de una biorefinería, los subproductos obtenidos en alguna etapa del proceso son utilizados como materia prima de uno nuevo de tal manera que a partir de estos se puedan obtener nuevos productos con un valor agregado y básicamente cero residuos. Dentro de las biorefinerías se implementan procesos de hidrólisis ácida, fermentación, gasificación, pirólisis, combustión, separación, etc. Y dentro de los productos que se obtienen gracias a la biorefinería se encuentran tinturas, detergentes, azúcares, solventes, plásticos, combustibles líquidos (biodiésel), calor y energía, etc<sup>49</sup>. Por esto mismo y como lo explica Jesús García (s.f.):

---

<sup>49</sup> DAS, K. C.; GARCÍA-NUÑEZ, J. A. y GARCÍA-PÉREZ, M. Overview of a biorefinery and opportunities in the Palm Oil Sector. En: Revista Palmas. vol. 28, p. 91-100

“la evolución gradual de las plantas de beneficio en Colombia en biorefinerías se presenta como una oportunidad, no sólo para cumplir con las normas ambientales, sino también para permitir la comercialización de nuevos bio-productos y por tanto mejorar la viabilidad económica de la agroindustria, la generación de nuevos empleos, y la contribución al desarrollo rural”<sup>50</sup>.

El esquema básico para facilitar el entendimiento del concepto de biorefinería se presenta en la figura 15.

**Figura 15.**Esquema básico de biorefinería



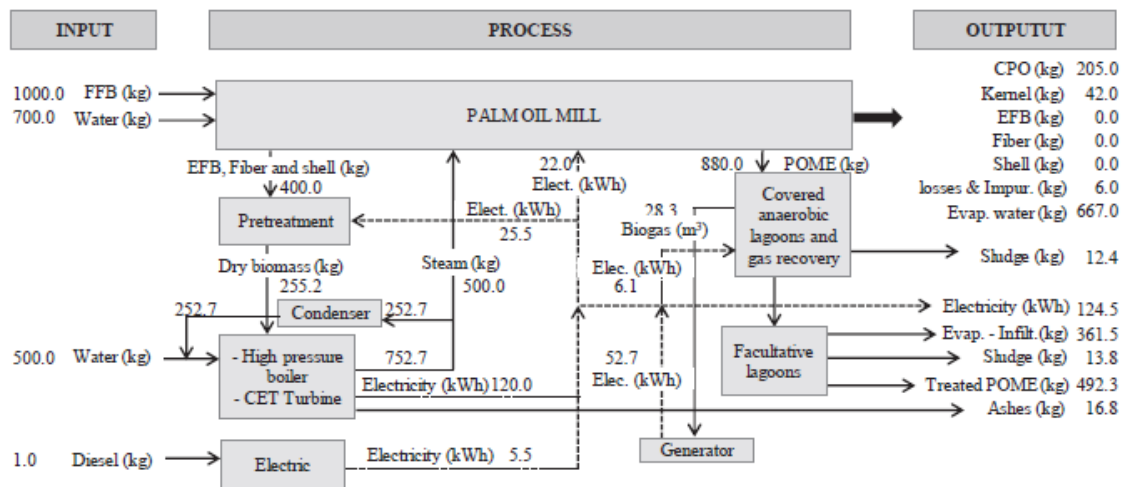
**Fuente:** GARCIA NUÑES, Jesús Alberto. Evolución De Las Plantas De Beneficio Del Fruto De La Palma De Aceite En Biorefinerías: Evaluación Técnica, Ambiental Y Socio-Económica De Seis Conceptos De Biorefinera

Para el caso particular de este trabajo es importante tener en cuenta que la planta de aprovechamiento de residuos o biorefinería está centrada en el sector palmero de Colombia donde según García Núñez a modo de ejemplo se pueden plantear varias alternativas de obtención de nuevos productos con base a los residuos de esta industria en particular (tusa, fibra, cuesco y POME o efluentes), siendo así que la figura 16 hace énfasis en un ejemplo de obtención de biogás más un proceso de cogeneración dentro de la planta para un sistema de 30 toneladas/ hora de racimos de fruta fresca.

---

<sup>50</sup> GARCIA NUÑES, Jesus Alberto. Evolución De Las Plantas De Beneficio Del Fruto De La Palma De Aceite En Biorrefinerías: Evaluación Técnica, Ambiental Y Socio-Económica De Seis Conceptos De Biorrefinería.

**Figura 16.** Representación esquemática del concepto de biorefinería para la producción de biogás y cogeneración



**Fuente:** GARCIA-NUNEZ, Jesús Alberto, et al. Evaluation of alternatives for the evolution of palm oil mills into biorefineries. En: Biomass and Bioenergy. vol. 95, p. 310-329.

Existen varias alternativas para la obtención de nuevos subproductos en una planta de beneficio dentro de los cuales según el proceso físico, químico, térmico o biológico que se aplique se encuentran los presentados en la tabla 3 y cada uno presenta un producto de interés distinto. Así mismo las materias primas utilizadas en la obtención es estos nuevos agregados se pueden clasificar en tres categorías principalmente: primera, segunda y tercera generación, siendo las primeras dos de ellas materias primas de uso alimenticio y materias primas de uso no alimenticio respectivamente<sup>51</sup>.

<sup>51</sup> CARVAJAL OCAMPO, Juan Camilo; DUARTE, Luis y CARDONA, Carlos. INFLUENCIA DE LA ESCALA SOBRE EL DESEMPEÑO DE BIOREFINERIAS A PARTIR DE BAGAZO DE CAÑA Y MANDARINA. En: Evaluación Técnica, Económica Y Ambiental De Una Biorefinera a Partir De Materias Primas Con Alto Contenido En Lignina En El Contexto Colombiano.

**Tabla 3.** Productos según la ruta en el proceso de transformación de subproductos.

RUTA		
Biológica	Física y Química	Térmica
Etanol	Celulosa	Energía
Hidrógeno	Pellets	Biocarbón
Azúcares	Aditivos plásticos	Carbón activado
Compostaje	Materiales aislantes	Hidrógeno
Productos químicos	Leña – briqueta	Combustible
Captura de CO2	Aglomerados	Productos químicos
	Papel	

**Fuente:** GARCIA NUÑEZ, Jesús Alberto. Tertulia Palmera. Concepto De Bio-Refinería Para Plantas De Beneficio. 2012. p. 38-39.

Realizando la revisión bibliográfica se puede evidenciar que existen gran cantidad de alternativas conocidas para la implementación de biorefinerías. Al momento de dar a la selección de las mejores alternativas de biorefinerías conocidas es de vital importancia, como lo manifiesta Jesús García, tener en cuenta el nivel de desarrollo tecnológico que se tiene sobre el proceso que se busca implementar, es así que el autor basándose en este y otro tipo de parámetros de selección sugiere o se proponen principalmente seis tipos de concepto de biorefinerías las cuales son biogás, compost, CHP, pellets, biocarbón y bioaceite<sup>52</sup>. Algunas de estas metodologías o conceptos de biorefinerías serán explicados a continuación.

- **Biogás:** Un importante reto para las biorefinerías hoy en día es poder manejar las grandes cantidades de corrientes de aguas residuales y/o efluentes generados por el proceso industrial que se maneja. Una solución sostenible para la eliminación de la materia orgánica residual en los efluentes de dichos procesos es convertirlos en biogás y utilizar los efluentes residuales como fertilizantes en suelo agrícola<sup>53</sup>. Siendo así el biogás es producido a partir de biomasa proveniente de diferentes procesos industriales, por medio de una degradación bacteriana bajo condiciones anaerobias. Estas bacterias actuadoras en el proceso son similares a las que se pueden encontrar en los estómagos de los rumiantes<sup>54</sup>. Cada etapa del proceso es cuidadosamente

<sup>52</sup> GARCIA-NUNEZ, Jesús Alberto, et al. Evaluation of alternatives for the evolution of palm oil mills into biorefineries. En: Biomass and Bioenergy. vol. 95, p. 310-329

<sup>53</sup> KAPARAJU, Prasad, et al. Bioethanol, biohydrogen and biogas production from wheat straw in a biorefinery concept. En: Bioresource Technology. vol. 100, no. 9, p. 2562-2568

<sup>54</sup> WELLINGER, Arthur; MURPHY, Jerry D. y BAXTER, David. The Biogas Handbook: Science, Production and Applications. Elsevier, 2013. p. 1-2

realizada por diferentes grupos de bacterias que cumplen una labor específica en los pasos o etapas de la degradación<sup>55</sup>.

Todo el proceso es llevado en diferentes etapas conducidas por la bacteria hidrolítica: inicialmente el proceso comienza con la hidrolisis de los compuestos orgánicos de orden polimérico como por ejemplo los lípidos, carbohidratos y proteínas, seguido de una etapa de acidogenesis durante la cual aparecen o se forman compuestos orgánicos como ácidos, alcoholes y otros compuestos neutros.

En tercera instancia, los productos obtenidos de la hidrolisis y la acidogenesis son convertidos en acetato, hidrogeno y dióxido de carbono gracias a las bacterias OHPA (organismos acetógenos productores obligados de hidrógeno). Finalmente el acetato, hidrogeno y dióxido de carbono son utilizados como sustrato por la bacteria metanógena para producir, como su nombre lo indica, metano, que será el producto principal del proceso, y dióxido de carbono<sup>61</sup>. En cuanto a los tiempos de producción del biogás se considera que aproximadamente entre 15 a 18 días se logra la producción de 80 a 85% del metano total hablando de un periodo de digestión de 30 días<sup>56</sup>.

Analizar la composición del biogás es fundamental ya que como se menciona en la literatura este es una mezcla de otros varios gases donde el producto de interés es el metano. El contenido de metano en el biogás normalmente varía entre un 50% y 75%. El biogás como materia prima es vital en la generación energética donde toma fuerza como una alternativa viable a los combustibles fósiles (gas natural) y además de esto entra a jugar importantes papeles en procesos de calentamiento, transporte y energía<sup>60</sup>.

En la industria palmera de Colombia estudios previos han encontrado que la tecnología sugerida al momento de implementar esta alternativa de biorefinería en la industria de la palma es implementar lagunas cubiertas para la recuperación del biogás a partir de los efluentes líquidos del proceso de extracción del aceite de palma. Esta tecnología presenta menores costos de instalación en comparación con otro tipo de reactores de digestión anaerobia aunque se reduce su eficiencia de producción<sup>57</sup>.

En estudios realizados se ha encontrado que la producción de metano es de aproximadamente 46 metros cúbicos del gas por cada tonelada de aceite crudo

---

<sup>55</sup> ARESTA, Michele; DIBENEDETTO, Angela y DUMEIGNIL, Franck. Biorefinery: From Biomass to Chemicals and Fuels. Walter de Gruyter, 2012. p. 406, 385

<sup>56</sup> DEMIRBAS, Ayhan. Biorefineries: For Biomass Upgrading Facilities. Springer Science & Business Media, 2009. p. 123

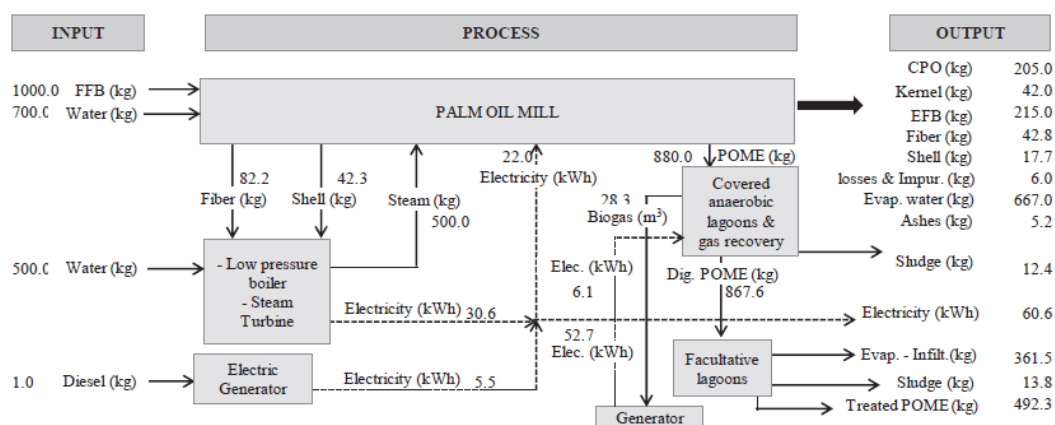
<sup>57</sup> GARCIA-NUNEZ, Jesus Alberto, et al. Evaluation of alternatives for the evolution of palm oil mills into biorefineries. En: Biomass and Bioenergy. vol. 95, p. 310-329



de palma obtenido, así mismo, se estima que aproximadamente por cada tonelada de racimos de fruta fresca (RFF) procesado se pueden obtener 15 metros cúbicos de metano. El metano como fuente de energía ha tomado gran importancia a nivel mundial, como se mencionó anteriormente, sobre todo por su poder de sustituir el diésel como principal precursor energético en las plantas de beneficio y así igualmente reducir la cantidad de gases de efecto invernadero que este produce; siendo así que industrias aceiteras como por ejemplo el caso de palmas del espino en Perú, lograron una reducción de aproximadamente 26,729 toneladas de CO<sub>2</sub> por año con la implementación del sistema de biodigestores para la producción de metano y su utilización como fuente de energía, además presentando la ventaja de tratar los efluentes al mismo tiempo que genera un producto<sup>58</sup>.

La representación esquemática del concepto de biorefinería para la obtención de biogás en la industria palmera se muestra en la figura 17.

**Figura 17.** Representación esquemática del concepto de biorefinería para la producción de biogás



**Fuente:** GARCIA-NUNEZ, Jesús Alberto, et al. Evaluation of alternatives for the evolution of palm oil mills into biorefineries. En: Biomass and Bioenergy. vol. 95, p. 310-329.

- **Pellets y biogás:** Uno de los conceptos más utilizados en cuanto a las biorefinerías es la obtención de pellets y biogás en simultáneo. El concepto del biogás en este caso maneja básicamente los mismos principios que el explicado anteriormente. La utilización o producción de pellets como alternativa de aprovechamiento. El proceso de producción de pellets puede considerarse como uno de los más simples ya que únicamente cuenta con dos etapas principalmente: pretratamiento (secado) y pelletización (planta de pellets). En la

<sup>58</sup> GARCIA-NUNEZ, Jesus Alberto, et al. Evolution of palm oil mills into bio-refineries: literature review on current and potential uses of residual biomass and effluents. En: Resources, Conservation and Recycling. vol. 110, p. 99-114

primera etapa se busca reducir, por medio del uso de una prensa, la humedad proveniente de los racimos de fruta vacíos, la fibra y el cuesco, desde un porcentaje (en fracción másica) de 60%-65% a un aproximado de 30% de humedad. Posterior a esto se realiza una etapa de corte y secado de la materia prima que resulta en un porcentaje de humedad del 10%. La segunda etapa del proceso es la pelletización y consta principalmente de un molino de pellets que los produce. Estos pellets pueden ser utilizados como productores de energía o para calefacción, de este modo gana fuerza en la industria como una energía renovable<sup>59</sup>. Luego del proceso de pelletización el producto debe contar con dimensiones aproximadas de 6 a 8 mm de diámetro, 15 a 30 mm de longitud y una densidad en el rango de 950 a 1300 kg/m<sup>3</sup>. Así mismo densificar el pellet le brinda a este mayor poder calorífico pudiendo competir así con el carbón, siendo más eficiente en la combustión<sup>60</sup>. Bajo estas características los pellets disminuyen los problemas convencionales de los biocombustibles, pudiendo hacer frente a fuentes de energía como carbón, petróleo o gas. Los pellets en la industria presentan la gran ventaja de que se pueden acoplar a aquellas plantas que originalmente quemaban combustibles pulverizados, ya que estos se pueden moler e inyectar a los hornos como polvo sin llegar a perder su capacidad calorífica<sup>61</sup>.

Para el caso de instaurar un proceso de pelletización en una planta de beneficio de aceite de palma, se estima que la presión del proceso debe estar aproximadamente en 64,38 MPa a una temperatura entre 80-100 °C. Como resultado del proceso se obtienen pellets con un rango de densidad entre 1184 a 1226 kg/m<sup>3</sup> y comúnmente se utiliza soda caústica en el proceso como aglutinante<sup>62</sup>. La representación esquemática del concepto de biorefinería para la obtención de biogás y pellets en la industria palmera se muestra en la figura 18.

---

<sup>59</sup> GARCIA-NUNEZ, Jesus Alberto, et al. Evaluation of alternatives for the evolution of palm oil mills into biorefineries. En: Biomass and Bioenergy. vol. 95, p. 310-329

<sup>60</sup> DEMIRBAS, Ayhan. Biorefineries: For Biomass Upgrading Facilities. Springer Science & Business Media, 2009. p. 123

<sup>61</sup> THEK, Gerold y OBERNBERGER, Ingwald. The Pellet Handbook: The Production and Thermal Utilization of Biomass Pellets. Routledge, 2012. p. 1

<sup>62</sup> GARCIA-NUNEZ, Jesus Alberto, et al. Evolution of palm oil mills into bio-refineries: literature review on current and potential uses of residual biomass and effluents. En: Resources, Conservation and Recycling. vol. 110, p. 99-114



Decreto 3930 de 2010 el cual rige los parámetros y características necesarias para vertimiento de aguas industriales y domésticas.

Ley 1715 del 2014 por la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional.

## 2. CARACTERIZACION Y DIAGNOSTICO

### 2.1 ANÁLISIS DE LAS CORRIENTES HÍDRICAS QUE INTERFIEREN EL PROCESO

Para la realización del análisis de las corrientes hídricas que interfieren el proceso es necesario conocer el diagrama del proceso con los valores estimados de masa que se van a trabajar además de considerar que el único insumo es el agua, la cual es usada como medio de dilución, producción de vapor y lavado<sup>63</sup>.

En primera instancia se determinaron las cantidades estimadas de agua que se utilizan en el proceso de extracción en las etapas de esterilización, descarga de centrifugas, y tridecanter. Siendo así en el caso de la extractora de aceite de CI SIGRA S.A. se estima que el agua total de entrada al proceso será de una tonelada por cada tonelada de racimo de fruta fresca (1ton H<sub>2</sub>O/ton RFF), donde aproximadamente el 85% de esta sale como efluentes a tratar (0,85 ton H<sub>2</sub>O) y el otro porcentaje se pierde por el tubo de escape del esterilizador, derrame y agua para lavar<sup>64</sup>.

En la tabla 4 se presentan los valores porcentuales aproximados de los efluentes que se obtienen en las etapas de esterilización, clarificación de aceite crudo y separación de la mezcla triturada.

**Tabla 4.** Valores porcentuales aproximados de la obtención de efluentes por etapa

ETAPA DEL PROCESO	PORCENTAJE DE DESCARGA
Esterilización	36%
Clarificación de aceite crudo	60%
Separación de la mezcla triturada	4%

**Fuente:** MA, Ah Ngan. Innovaciones en el manejo del efluente de las Plantas de beneficio de aceite de palma. En: Revista Palmas. vol. 21, no. 2, p. 41-49

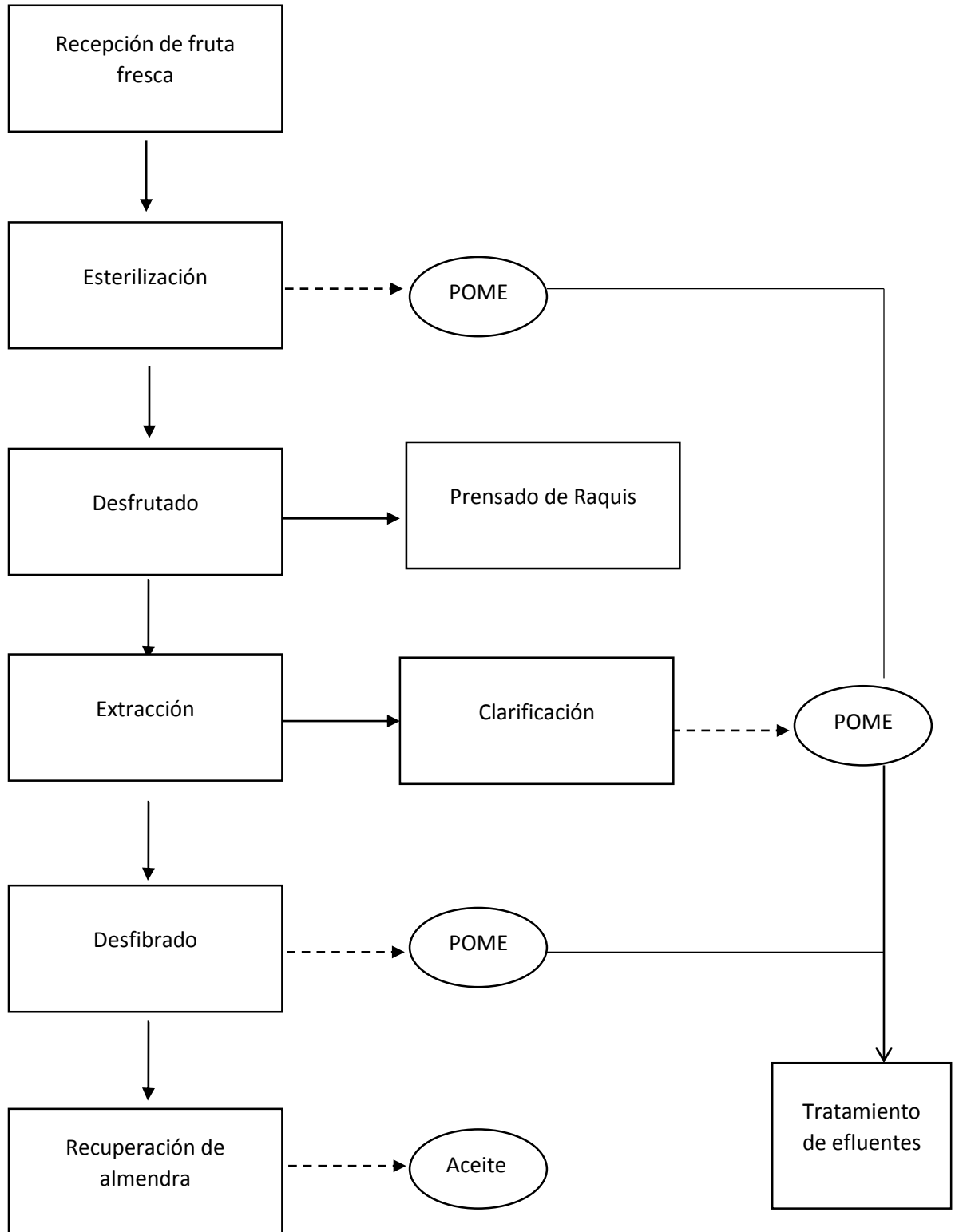
A continuación en la figura 19 se presenta la descripción del proceso mediante un diagrama de bloques.

---

<sup>63</sup> ALAM, Shah. Manejo de efluentes de las plantas extractoras de aceite de palma. En: Palmas. vol. 16, p. 171-177

<sup>64</sup> MA, Ah Ngan. Innovaciones en el manejo del efluente de las Plantas de beneficio de aceite de palma. En: Revista Palmas. vol. 21, no. 2, p. 41-49

**Figura 19.**Diagrama de bloques del proceso de extracción de aceite



Para el análisis de las corrientes presentadas anteriormente se debe aclarar cómo afecta cada una de éstas en el efluente o POME (palm oil mill effluent); principalmente en las etapas de clarificación y esterilización. Dentro del proceso de clarificación los lodos generados presentarán una mayor cantidad de residuos sólidos en comparación con los efluentes que se obtienen en el condensado del esterilizador. Así mismo ambos efluentes (de la esterilización y clarificación) llevan trazas de aceites y grasas que no se logran recuperar<sup>65</sup>.

El POME debido al proceso por el cual se obtiene comúnmente suele contar en su composición con aproximadamente 95-96% de agua, 0,6-0,7% de aceite y 4-5% de sólidos totales dentro de los cuales se puede encontrar de 2% a 4% de sólidos suspendidos provenientes de residuos del mesocarpio. Las propiedades del POME suelen variar significativamente con los procesos y las tecnologías aplicadas en cada una de las plantas<sup>71</sup>. Comúnmente el POME suele salir de la planta ligeramente ácido con un pH entre 4 y 5 debido a los ácidos orgánicos que se forman por procesos de fermentación<sup>66</sup>, además, suele salir a una temperatura relativamente alta debido a que una gran parte de este proviene de vapores condensados utilizados en el proceso de clarificación.

La temperatura del POME normalmente va entre 70°C y 90°C. Aun así bajo estas características el POME no es considerado como un residuo peligroso<sup>67</sup>. Para analizar más a fondo las corrientes, la tabla 5 presenta las características (parámetros) de las corrientes individualmente del POME en las tres etapas principales.

**Tabla 5.** Características de las corrientes individuales del proceso

Parámetro	Unidad	Condensados de esterilización	Agua de desperdicio de clarificación	Agua de desperdicio de separación de la mezcla triturada
pH		5,0	4,5	-
Aceites y grasas	mg/l	4.000	7.000	300
DBO	mg/l	23.000	29.000	5.000
DQO	mg/l	47.000	64.000	15.000
Sólidos suspendidos	mg/l	5.000	23.000	7.000

<sup>65</sup> HASSAN, Mohd Ali, et al. Treatment of palm oil wastewaters. En: Waste Treatment in the Food Processing Industry. p. 101-118

<sup>66</sup> RUPANI, Parveen Fatemeh, et al. Review of current palm oil mill effluent (POME) treatment methods: vermicomposting as a sustainable practice. En: World Applied Sciences Journal. vol. 11, no. 1, p. 70-81

<sup>67</sup> SETHUPATHI, Sumathi. Removal Of Residue Oil From Palm Oil Mill Effluent (Pome) Using Chitosan..

**Tabla 5.** (Continuación)

Parámetro	Unidad	Condensados de esterilización	Agua de desperdicio de clarificación	Agua de desperdicio de separación de la mezcla triturada
Sólidos disueltos	mg/l	34.000	22.000	100
Nitrógeno amoniacal		20	40	-
Nitrógeno total		500	1.200	100
DQO	mg/l	47.000	64.000	15.000

**Fuente:** SETHUPATHI, Sumathi. Removal Of Residue Oil From Palm Oil Mill Effluent (Pome) Using Chitosan.

En la tabla 5 se puede observar que principalmente el proceso de clarificación es el que da la mayor carga orgánica al POME medible en DQO, tomando un valor de 64,000 mg/l y debido a, como se explicó anteriormente, el efluente suele llevar trazas de compuestos orgánicos sobrantes del proceso de extracción del aceite.

Para el caso de CI SIGRA S.A. y basándose en el hecho de que los valores de los parámetros suelen cambiar, dependiendo de cómo se lleve a cabo el proceso y de las tecnologías utilizadas, es importante resaltar que se tiene pensado implementar en la planta un sistema de clarificación dinámica compuesto principalmente por un tridecanter, el cual tiene influencia directa en la reducción tanto de los volúmenes de aguas lodosas (efluentes salientes de la clarificación) en un 45% aproximadamente como en la reducción de la carga orgánica (DQO) del efluente, pasando de un aproximado de 70,000 mg/l a valores cercanos a 40,000 mg/l debido a mayor eficiencia en la remoción de sólidos<sup>68</sup>.

Dado esto es importante aclarar que para efectos de este trabajo se manejaron los valores de los parámetros de la clarificación común aplicada en las plantas extractoras de Colombia. Aun así se revisaron los valores de los parámetros obtenidos en los efluentes luego de la implementación de la clarificación dinámica, valores se pueden observar en la tabla 6.

---

<sup>68</sup> FERNANDEZ PADILLA, Carlos Andrés. CLARIFICACIÓN DINÁMICA: UN NUEVO PANORAMA TECNOLÓGICO PARA EL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE PALMA EN COLOMBIA. [Consultado el 12 Julio 2017]. Disponible en: <http://www.cenipalma.org/clarificacion-dinamica>



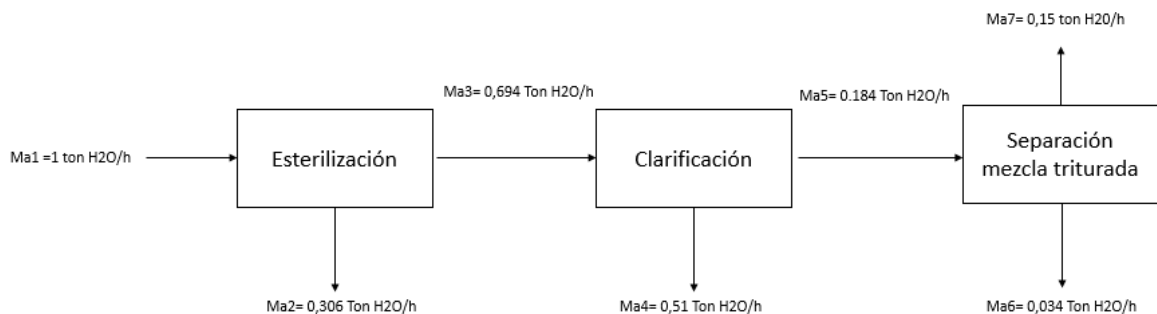
**Tabla 6.** Parámetros del efluente utilizando clarificación dinámica

Parámetro	Unidad	Clarificación Dinámica
pH		4,6
Temperatura	°C	4,5
DBO	mg/l	N.R
DQO	mg/l	41,000
Solidos totales	mg/l	10,000
Solidos suspendidos	mg/l	6,500
Grasas y aceites	mg/l	7,500

**Fuente:** FERNANDEZ, Carlos, et al. Impacto de la clarificación dinámica sobre el proceso de extracción y recuperación de aceite de palma crudo (estudio de caso). En: Revista Palmas. vol. 37, no. 3, p. 47-64

Ahora tomando como punto de partida las bases de cálculo suministradas por la empresa de SIGRA S.A. como posibles valores de operación se procede a realizar los balances de masa para el proceso tomando una base de cálculo inicial de 1 ton RFF/h y de 1 ton H<sub>2</sub>O/ton RFF. Los balances se realizan por cada hora de operación, además hay que tener en cuenta que el 85% aproximadamente del agua que entra al proceso sale como efluente, debido a que, como se explicó anteriormente, el resto del agua se pierde en el tubo de escape del esterilizador, derrames y agua para lavar. Los resultados del balance de masa se presentan en la figura 20, los cálculos detallados se muestran el anexo A.

**Figura 20.** Resultados de balances de masa del agua para la esterilización, clarificación y separación de mezcla triturada



La sumatoria de flujos de Ma2, Ma4 y Ma6 corresponde a la cantidad de efluentes estimada para el proceso de extracción de aceite de palma. El valor de Ma7 corresponde a las pérdidas de agua en el proceso. En cuanto a los residuos sólidos y como lo manifiesta Jesús García (s.f.), se obtienen ciertas cantidades entre tusa, fibra y cuesco cuantificables en porcentajes con base a los RFF que entran en el

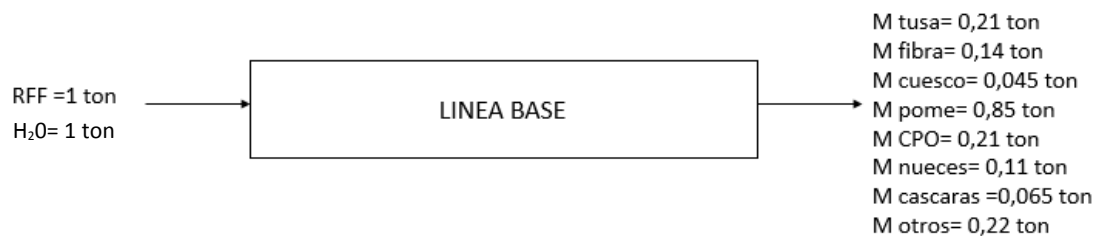
proceso<sup>69</sup>. Los valores porcentuales se presentan en la tabla 7 y con base en ellos se realizaron los balances de masa estimados de la planta extractora teniendo en cuenta que salen tanto residuos como productos.

**Tabla 7.**Valores porcentuales con base al 100% de RFF

Residuo	Porcentaje con base a 100% de RFF
Tusa	21%
Fibra	14%
Cuesco	4,5%
Aceite (CPO)	21%
Nueces	11%
Cascaras	6,5%
Otros	22%

Los balances de masa estimados para este proceso de extracción se presentan en la figura 21 teniendo en cuenta que como se mencionó antes en el capítulo el POME obtenido corresponde al 85% de total del agua que entra. La masa de *otros* corresponde a las perdidas por evaporación y cenizas principalmente.

**Figura 21.**Balance de principales residuos sólidos del proceso de extracción.



## 2.2 CALCULO DEL CAUDAL DE DISEÑO

Para el diseño del tratamiento de aguas residuales es necesario conocer que cantidad de agua residual se genera en la planta extractora, este diseño se hace teniendo en cuenta que en los próximos años no va haber una expansión de la planta.

El caudal de diseño (Q) es calculado de acuerdo a la ecuación 1

**Ecuación 1.**Calculo del caudal de diseño.

$$Q = CP * HP * R$$

<sup>69</sup> NUÑEZ, Jesús Alberto García. Alternativas para convertir una planta de beneficio en una biorrefinera. En: Revista Palmas. vol. 37, p. 95-106

Donde:

Q= caudal de diseño

CP= capacidad máxima de procesamiento de la planta extractos en ton RFF/h proyectada a cinco años

HP= horas de procesamiento en máxima producción de la extractora en h/d

R= relación de agua producida por fruto procesado en m<sup>3</sup>/ton RFF<sup>70</sup>

CI SIGRA S.A entregó los datos de la planta extractora de aceite de palma en la que se tiene una capacidad de 30 ton RFF/h , trabaja las 24 horas y el efluente estimado es de 0.85 m<sup>3</sup>/ton RFF; este efluente estimado viene dado por la información de la tabla 8.

**Tabla 8.**Efluente estimado

PROCESO	EFLUENTE
Esterilización	0.306 m <sup>3</sup> /ton RFF
Clarificación	0.51 m <sup>3</sup> /ton RFF
Separación (hidrociclón)	0.034 m <sup>3</sup> /ton RFF
Agua residual total	0.85 m <sup>3</sup> /ton RFF

Por lo tanto el caudal de diseño viene dado por:

$$Q = 30 \frac{\text{ton RFF}}{h} * 24 \frac{h}{\text{dia}} * 0.85 \frac{\text{m}^3}{\text{ton RFF}} = 612 \frac{\text{m}^3 \text{ Agua residual}}{\text{dia}}$$

HC ingenieros SAS quien es un posible ofertante para realizar el proyecto asegura que es mejor tener un porcentaje de seguridad del 17.7% por lo tanto el caudal real con el que se va a trabajar es de 720 m<sup>3</sup> por cuestiones de seguridad, debido a que se puede presentar época de lluvia, lo que provocaría el aumento del volumen del agua.

### 2.3 CARACTERIZACION DEL EFLUENTE

Después de obtener los balances de masa, se procede a caracterizar el efluente, estos datos se tomaron de acuerdo al promedio de los efluentes generados por diferentes plantas extractoras de aceite de palma en Colombia, estos datos fueron suministrados por CENIPALMA con fines de apoyo a esta investigación. Al tener en cuenta que la planta extractora a la cual se le está desarrollando el diseño conceptual se encuentra en construcción, se toman los datos de la literatura como punto de partida de la caracterización. La tabla 9 presenta los valores para cada parámetro teniendo en cuenta la información de caracterización de vertimientos de 65 plantas de beneficio a nivel nacional, ubicadas en diferentes zonas del país (zona

<sup>70</sup> GARCIA NUÑES, Jesús. Manejo de efluentes de plantas extractoras: Diseño de lagunas de estabilización. Colombia. Cenipalma, 1997. 25 p. (Boletín técnico: No. 11).

central, norte, oriental, suroccidental), en paralelo con los valores máximos permitidos en la resolución 631 del 2015 para la extracción de aceites de origen vegetal.<sup>71</sup>

**Tabla 9.** Parámetros promedio y máximos permisibles de la resolución.

PARAMETRO	UNIDAD	PROMEDIO	RESOLUCION
DQO5	(mg/l)	55000	1500
DBO	(mg/l)	25000	600
Solidos suspendidos totales	(mg/l)	20000	NR
Temperatura	°C	80	+/- 3°C
pH		4-5	6-9
Solidos totales (ST)	(mg/l)	45670	400
Solidos disueltos	(mg/l)	9112	NR
Solidos sedimentables (S. Sed)	(ml/h)	564,2	2
Solidos totales volátiles (STV)	(mg/l)	48988	NR
Fosforo total (P total)	(mg/l)	66,1	Análisis y reporte
Nitrógeno total (N total)	(mg/l)	284,1	Análisis y reporte
Nitrógeno amoniacal	(mg/l)	18,3	Análisis y reporte
Grasas y aceites	(mg/l)	9611	20
Acidez total	(mg/l)	1611	Análisis y reporte
Alcalinidad total	(mg/l)	161,5	Análisis y reporte
Cloruros	(mg/l)	919	500

Según la tabla 9 los principales problemas de estos efluentes son la alta demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, pH, grasas y aceites y por último los cloruros, donde la alta cantidad de aceite es considerado un problema debido a la dificultad que este compuesto presenta para su degradación; una ventaja de estos efluentes es que tienen una alta fracción biodegradable<sup>72</sup>.

<sup>71</sup> FEDEPALMA. Recomendaciones para la gestión integral de aguas residuales en plantas de beneficio y el cumplimiento de la resolución 0631 de 2015 sobre vertimientos. En: cidpalmero [en línea](2016)<<http://cidpalmero.fedepalma.org/node/124>> [citado en 10 de agosto de 2017].

<sup>72</sup> ALAM, Shah. Manejo de efluentes de las plantas extractoras de aceite de palma. En: Palmas. vol. 16, p. 171-177

### 3. PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS VIABLES PARA LA SELECCIÓN DE TRATAMIENTOS DE AGUA RESIDUAL

De acuerdo a la caracterización del afluente estimado para la extractora de aceite de palma de C.I SIGRA S.A. presentado en la tabla 9 (Parámetros promedio y máximos permisibles de la resolución), los parámetros que no cumplen con los límites de rango establecidos por el decreto 631 de 2015 son la alta demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, pH, grasas y aceites y por último los cloruros. Debido a esto se considera que se debe implementar un pretratamiento, después un sistema de tratamiento biológico, seguido del tratamiento de los cloruros.

Basándose en la revisión bibliográfica, en este capítulo se plantean tres alternativas diferentes de tratamiento biológico usadas para tratar este tipo de afluente, incluyendo la remoción de cloruros. Se hará la descripción del proceso para cada una de las alternativas y se dará en detalle los aspectos que se tuvieron en cuenta para la selección de una de estas alternativas.

#### 3.1 ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO

Se hará una breve descripción del proceso de cada una de las tres alternativas planteadas para el tratamiento de los afluentes, de estas tres la alternativa 1 y 2 tanto el tratamiento preliminar como el primario son los mismos, se diferencian del tratamiento secundario o tratamiento biológico que se debe aplicar, además el tratamiento terciario que se usará para la reducción de la concentración de cloruros es el mismo en las tres alternativas, este dependerá de la experimentación que se realizará posteriormente.

**3.1.1 Alternativa 1.** En la figura 22 se ilustra en un diagrama de bloques una alternativa para el tratamiento de los afluentes, en el cual se usa inicialmente un sistema de rejillas; este proceso tiene como fin retirar el material grueso o sólidos grandes que más adelante pueden obstruir los equipos mecánicos por los que transcurre el afluente, posteriormente el afluente pasa a un tanque florentino o trampa de grasa para remover sólidos sedimentables como arenillas, piedras o pedazos de frutos, o partículas con gravedad específica cercanas a 2,65 y de diámetro superior a 0,1 mm además este brinda la oportunidad de recuperar el aceite que puede ser retornado al proceso<sup>73</sup>.

Después de haber retirado el material fino y grueso, el siguiente procedimiento es llevarlo a una laguna de enfriamiento, el objetivo de éste es primero disminuir la temperatura de las aguas para facilitar las condiciones óptimas para los

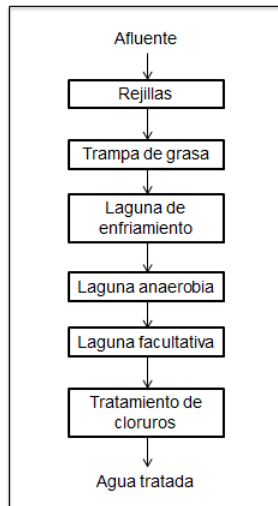
---

<sup>73</sup> GARCIA NUÑES, Jesús. Manejo de efluentes de plantas extractoras: Diseño de lagunas de estabilización. Colombia. Cenipalma, 1997. 18p. (Boletín técnico: No. 11).

microorganismos en las lagunas anaeróbicas, además en la superficie se forma un aceite ácido; esta laguna se encarga de retirarlo; ya que se forma una capa en la parte superior lo que permite retirar este aceite. Después de haber regulado la temperatura del proceso se pasa a la laguna anaerobia esta es usada debido al alto contenido de DQO, por lo tanto en este proceso sirve para reducir el material sólido y el contenido orgánico que está en el afluente; esta funciona en ausencia del oxígeno para de esta manera poder degradar la materia orgánica. Después de haber pasado por este proceso en el que se produce metano y dióxido de carbono es necesario una laguna facultativa que también remueve material orgánico, este en presencia de aire logra una mejor calidad del efluente del proceso<sup>74</sup>.

Finalmente se ha demostrado que estos procedimientos no reducen la cantidad de cloruro contenida en el agua por lo que es realmente importante regular esta concentración, por lo tanto se adiciona un tratamiento terciario para el control de los cloruros que puede ser por medio de la adsorción de un biocarbón que proviene del cuesco<sup>75</sup>, después de una pirolisis lenta a diferentes temperatura (650°C y 750°C), siendo este (cuesco) merma del proceso de extracción de aceite del fruto de palma, generando una alternativa de usar este residuo.

**Figura 22.** Alternativa de tratamiento de aguas residuales 1



En la tabla 10 se muestran las ventajas y desventajas de la alternativa 1.

<sup>74</sup> GARCIA NUÑES, Jesús. Manejo de efluentes de plantas extractoras: Diseño de lagunas de estabilización. Colombia. Cenipalma, 1997. 35p. (Boletín técnico: No. 11).

<sup>75</sup> FEDEPALMA. Rutas tecnológicas para el manejo integral de aguas residuales en las plantas de beneficio del sector palmero. 2015. P 48.

**Tabla 10.** Ventajas y desventajas de la alternativa 1

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p>Alta eficiencia en la remoción de materia orgánica (pueden ser superiores al 95%)<sup>76</sup>. Se combinan procesos aeróbicos y anaeróbicos, necesarios para este tipo de afluentes. Produce metano, el cual puede ser útil como energético. No requiere oxígeno así que usa poca energía eléctrica y se adapta a aguas residuales de alta concentración Sistema estable y de fácil manejo. Fácil operación<sup>77</sup>. Los tratamientos preliminares protegen los sistemas posteriores. Puede recuperarse aceite para ser devuelto al proceso. Remueve materia orgánica de la forma más económica debido a las lagunas anaerobias. Tiene requerimientos nutricionales bajos<sup>78</sup>.</p>	<p>En algunas ocasiones el tiempo de retención en las lagunas puede ser hasta 3 días, convirtiéndose en un proceso lento. Dependiendo del volumen del afluente las lagunas pueden llegar a ocupar grandes áreas. Si las bacterias anaerobias no están equilibradas puede generar caída del pH, produciendo malos olores. El medio es corrosivo.<sup>79</sup></p>

**3.1.2 Alternativa 2.** En la figura 23 se presenta la segunda alternativa de tratamiento de aguas para el proceso de extracción de aceite de palma, el cual para empezar se retienen los sólidos de mayor tamaño con el fin de que no se estropeen los equipos por los que más adelante pasará el afluente para esto se usará un sistema de rejillas, después, para retirar las partículas más pequeñas contenidas en el afluente se implementará un tanque florentino o trampa de grasa, que además funciona para recuperar el aceite y puede ser retornado al proceso lo que generaría menos pérdidas durante el proceso. La normatividad exige una temperatura de descargue del efluente (+o- 3°C del cuerpo del agua)<sup>80</sup> y para este proceso la temperatura es considerada alta por lo que se debe adicionar una laguna de enfriamiento en el que como su nombre lo dice se hará una reducción en la

<sup>76</sup> GARCIA NUÑES, Jesús. Manejo de efluentes de plantas extractoras: Diseño de lagunas de estabilización. Colombia. Cenipalma, 1997. 20p. (Boletín técnico: No. 11).

<sup>77</sup> ROMERO, Jairo. Tratamiento de aguas residuales teoría y principios de diseño. Bogotá: Escuela colombiana de ingeniería, 2004. 246p. ISBN 9588060133.

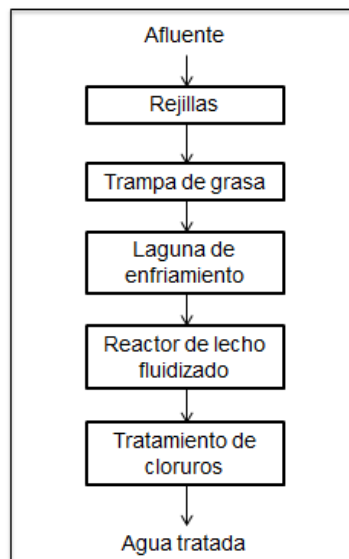
<sup>78</sup> ROMERO, Jairo. Tratamiento de aguas residuales teoría y principios de diseño. Bogotá: Escuela colombiana de ingeniería, 2004. 246p. ISBN 9588060133.

<sup>79</sup> *Ibíd.*, P 246.

<sup>80</sup> MINISTERIO DE DESARROLLO Y MEDIO AMBIENTE. Resolución 0631 de 2015

temperatura. Como tratamiento secundario se usará un reactor de lecho fluidizado el cual es un tratamiento anaerobio que tiene como objetivo la degradación de DBO y la estabilización, este consiste en que el fluido pasa a través de un lecho compuesto por partículas sólidas, los gradientes de concentración radial y axial permite un mejor contacto entre el líquido y el sólido aumentando la eficiencia<sup>81</sup>, por ultimo como se mencionó en la alternativa anterior es necesario un tratamiento terciario para los cloruros, este estaría determinado por la experimentación que se realizará más adelante.

**Figura 23.** Alternativa 2 de tratamiento de aguas residuales



Para poder comparar con las otras alternativas en la tabla 11 se presentan las ventajas y desventajas de usar la alternativa 2.

---

<sup>81</sup> PROMECAFE. El tratamiento anaeróbico de los residuos del café: una alternativa energética para la disminución del impacto ambiental en el sector. Nicaragua. P 45.



**Tabla 11.** Ventajas y desventajas para la alternativa 2

Ventajas	Desventajas
Los lechos fluidizados se pueden aplicar para altas concentraciones de materia orgánica, mayores a 5000 mg/l <sup>82</sup> . No existen gradientes de temperatura en el lecho. Bajos requerimientos de área. Alta concentración en el reactor. <sup>83</sup>	El alto contenido de grasas y material floculento pueden generar problemas para la operación de este tipo de desechos. La operación de los lechos fluidizados es compleja.  Se debe controlar la velocidad de flujo. Tiempo de arranque y estabilización prolongados (60 -90 días) <sup>84</sup> . Es altamente costosa. <sup>85</sup>

**3.1.3 Alternativa 3.** La alternativa 3 para el tratamiento de aguas se describe en la figura 24, el cual el afluente entra primero a un proceso de rejillas con el fin de filtrar la materia que posteriormente pueda afectar el proceso, precisamente para evitar que los equipos siguientes se vean perjudicados u obstruidos a causa de este material; posteriormente a eso el siguiente proceso es la pre aireación para poder facilitar la separación de las grasas, facilitar la floculación de sólidos, darle mayor estabilidad al agua ya que se retiran las grasas y además incrementar la eliminación de DQO.

Después de esto es necesario el tanque florentino para poder retirar el aceite contenido y eliminar las partículas de menor tamaño, el tratamiento secundario que se usara es el biofiltro de arena este consiste en lechos empacados con un medio poroso a través del cual pasa el agua a depurar, por medio de este se puede eliminar materia orgánica además de atrapar los sólidos suspendidos<sup>86</sup>, este proceso también sirve para la desnitrificación; por lo que hace falta el tratamiento de cloruros después de haber pasado por el biofiltro.

<sup>82</sup> PROMECAFE. El tratamiento anaeróbico de los residuos del café: una alternativa energética para la disminución del impacto ambiental en el sector. Nicaragua. P 45.

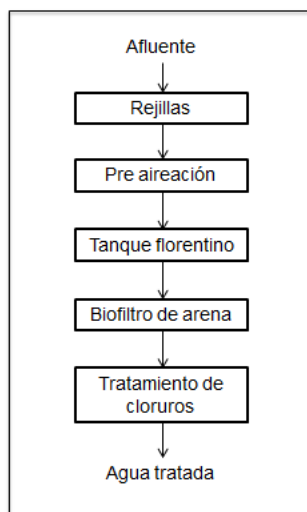
<sup>83</sup> PROMECAFE. El tratamiento anaeróbico de los residuos del café: una alternativa energética para la disminución del impacto ambiental en el sector. Nicaragua. P 45.

<sup>84</sup> SAINAZ, Juan Antonio. Tecnologías para la sostenibilidad: procesos y operaciones unitarias en depuración de aguas residuales. Madrid: edición fundación EOI, 2007. 303 p. ISBN 978-84-88723-58-1

<sup>85</sup> PROMECAFE. El tratamiento anaeróbico de los residuos del café: una alternativa energética para la disminución del impacto ambiental en el sector. Nicaragua. P 45.

<sup>86</sup> Bratieres K, Fletcher TD, Deletic A, Zinger Y. 2008. "Nutrient and sediment removal by stormwater biofilters: A large-scale design optimisation study".

**Figura 24.** Alternativa 3 de tratamiento de aguas residuales



En la tabla 12 se muestran las ventajas y desventajas que pueden presentar para la alternativa 3.

**Tabla 12** Ventajas y desventajas de la alternativa 3.

Ventajas	Desventajas
<p>Puede remover hasta un 92% de DQO<sup>87</sup>.</p> <p>Los materiales para la construcción son fáciles de conseguir.</p> <p>Logra remover la turbidez, DQO, amonio y nitrato.</p> <p>Es económico.</p>	<p>Se usa para tratamientos de 600 m<sup>3</sup> <sup>88</sup>.</p> <p>3 días de retención<sup>89</sup>.</p> <p>No retira todos los contaminantes que contiene el efluente (como los cloruros)<sup>90</sup>.</p> <p>Problemas con el cultivo ya que si no se tienen en las condiciones óptimas se estropea el tratamiento.</p>

<sup>87</sup> MORENO REINOSO, Claudia. Tratamiento de agua residual de la extracción del aceite crudo de palma para su reutilización como agua de proceso mediante un biofiltro de arena. Quito, 2015, 24 h. Proyecto de investigación (ingeniero ambiental). Universidad San Francisco De Quito. Colegio de ciencias e ingeniería

<sup>88</sup> GALEON. Filtro de arena, caudal [en línea] < <http://galeon.com/elregante/arena.html>> [citado en 20 de agosto]

<sup>89</sup> SAINAZ, Juan Antonio. Tecnologías para la sostenibilidad: procesos y operaciones unitarias en depuración de aguas residuales. Madrid: edición fundación EOI, 2007. 303 p. ISBN 978-84-88723-58-1

<sup>90</sup> MORENO REINOSO, Claudia. Tratamiento de agua residual de la extracción del aceite crudo de palma para su reutilización como agua de proceso mediante un biofiltro de arena. Quito, 2015, 24 h. Proyecto de investigación (ingeniero ambiental). Universidad San Francisco De Quito. Colegio de ciencias e ingeniería

## 3.2 SELECCIÓN DEL TRATAMIENTO

Se debe escoger un tratamiento que funcione para el afluente caracterizado en el capítulo 2, además que funcione para la remoción de los contaminantes lo suficiente para que cumpla con la resolución 631 de 2015. Además se escogieron criterios para la selección que se enunciarán a continuación.

**3.2.1 Criterios de selección.** Como se propusieron 3 alternativas de tratamiento de aguas, teniendo en cuenta que pueden haber más opciones, se debe escoger la que mejor se adapte a los siguientes requisitos.

- Caracterización del efluente: estas características determinan la necesidad de pretratamiento, tratamiento primario, secundario y terciario.
- Aplicabilidad del proceso: se determina a partir de los datos de otras plantas y de la efectividad de este tratamiento en ellas.
- Desempeño del tratamiento: se debe evaluar teniendo en cuenta variaciones en las variables de entrada.
- Eficiencia del tratamiento: se mide la calidad del efluente, evaluando los parámetros que exige la norma.
- Condiciones de operación y mantenimiento: se mide por el grado de complejidad del proceso, que capacitación deben de tener los operarios, y la cantidad de los mismos, entre menos complejo sea mejor será.
- Disponibilidad de terreno: se evalúa respecto al área que está destinada para la PTAR (3 hectáreas), entre menor área se ocupe mejor será.
- Costos: se cuenta con el dinero necesario para el comienzo de operación de la planta y el terreno existente, entre más económico sea será más beneficioso para la empresa.
- Seguridad industrial: el tratamiento debe velar por el bienestar de los operarios y trabajadores de la misma.

**3.2.2 Matriz de selección.** Después de haber escogido los criterios de selección a cada uno se le asignara un porcentaje teniendo en cuenta la importancia que tenga dentro de la elección, se asigna a partir de que el objetivo principal del tratamiento es poder cumplir con la normativa después se tiene en cuenta los requerimientos de la empresa CI SIGRA S.A que consiste en un balance entre lo económico, ambiental y social. En la tabla 13 se muestran los criterios con sus respectivos porcentajes. La empresa le da mucho más peso a la eficiencia y el desempeño del tratamiento, a la parte económica.

**Tabla 13.** Porcentaje asignado para cada criterio de selección

CRITERIO	PORCENTAJE (%)
Caracterización del efluente	15
Aplicabilidad del proceso	10
Desempeño del tratamiento	15
Eficiencia del tratamiento	20
Condiciones de operación y mantenimiento	10
Disponibilidad de terreno	5
Costos	15
Seguridad industrial	10

Para evaluar cada tratamiento se da una calificación para cada criterio en el que 10 es lo máximo y 2,5 el mínimo posible, como se puede observar en la tabla 14.

**Tabla 14.** Valor para cada criterio según el nivel de importancia

Nivel	Valor
Excelente	10
Eficiente	7.5
Regular	5
Deficiente	2.5

A partir de la revisión bibliográfica y la información suministrada por la empresa se hace una evaluación de las alternativas como se ilustra en tabla 15.

Para el cálculo de la calificación de cada parámetro de la matriz de selección se realizó los siguientes cálculos para cada criterio.

$$\text{Calificación de cada criterio} = \text{Porcentaje asignado} * \text{nivel de importancia}$$

**Tabla 15.** Matriz de selección

Criterios	Alternativas		
	1	2	3
Caracterización del efluente	1.5	1.5	0.75
Aplicabilidad del proceso	1	0.25	0.5
Desempeño del tratamiento	1.5	0.375	0.75
Eficiencia del tratamiento	2	1.5	1.5
Condiciones de operación y mantenimiento	0.75	0.5	0.75
Disponibilidad de terreno	0.375	0.5	0.125
Factibilidad	1.5	1.125	1.5
Seguridad industrial	1	1	1
Total	9.625	6.75	6.875

A continuación se explicará por qué se le otorgaron las anteriores calificaciones a cada tratamiento. Para el primer criterio que es la caracterización del efluente, es necesario un tratamiento preliminar y para la alternativa 1 y 2, este es igual y cumplen con la necesidad de retirar los materiales de mayor tamaño y además retornar aceite al proceso por eso se les otorga una calificación de 1,5. Para la alternativa 3 también logra separar los materiales gruesos de los finos y en la preaireación se logra disminuir la temperatura, pero el aceite no se puede recuperar al proceso esto generaría una pérdida, por lo tanto, se le asigna una puntuación de 0.75. El segundo criterio que se evaluó fue la aplicabilidad del proceso y según la bibliografía en la alternativa 2 se pretende usar un reactor de lecho fluidizado estos reactores no se ha aplicado en ninguna planta de extracción de aceite de palma por lo que no se sabe cómo funcionaría en este tratamiento, por el contrario para la alternativa 1 este tratamiento es utilizado en la mayoría de las plantas extractoras de aceite de palma en Colombia y está comprobada su eficiencia por eso se le da una calificación de 1, para la alternativa 3 el uso de biofiltro de arena se evaluó a escala laboratorio para este tipo de afluente y se obtuvieron resultados que prueban que esta alternativa funcionaria, sin embargo no se ha llevado a gran escala<sup>91</sup>.

El tercer criterio de evaluación es el desempeño del tratamiento, la empresa no tiene planeado aumentar la capacidad de 30 ton/h en los próximos años, sin embargo no hay que descartar la posibilidad de que esto ocurra, por lo tanto para la alternativa 1 la posibilidad de expandir este proceso es posible por lo tanto se le otorga una puntuación de 1,5. El reactor de lecho fluidizado de la alternativa 2 este es construido bajo unas medidas y la posibilidad de ampliarla es más dificultosa por lo tanto se podría ampliar en determinado caso y su calificación es de 0.375. Para la alternativa 3 los materiales de construcción del mismo son fáciles de conseguir por consiguiente su ampliación sería posible sin embargo estos materiales pueden llegar a ser muy frágiles, además este tratamiento es para procesos más pequeños así es como se le da una calificación de 0.75.

El cuarto criterio de evaluación es la eficiencia del tratamiento basándose en la calidad del afluente según la bibliografía<sup>92</sup> la alternativa 1 la combinación de lagunas facultativas y aerobias logran una remoción del material orgánico de hasta un 95% por eso se le otorga una calificación de 2. La alternativa 2 el porcentaje de remoción de materia orgánica es de 86% por lo tanto su calificación es de 1.5. Para la alternativa 3 el porcentaje de remoción de material orgánico es del 92%<sup>93</sup> es alto

---

<sup>91</sup> MORENO REINOSO, Claudia. Tratamiento de agua residual de la extracción del aceite crudo de palma para su reutilización como agua de proceso mediante un biofiltro de arena. Quito, 2015, 24 h. Proyecto de investigación (ingeniero ambiental). Universidad San Francisco De Quito. Colegio de ciencias e ingeniería

<sup>92</sup> GARCIA NUÑES, Jesús. Manejo de efluentes de plantas extractoras: Diseño de lagunas de estabilización. Colombia. Cenipalma, 1997. 18 p. (Boletín técnico: No. 11).

<sup>93</sup> MORENO REINOSO, Claudia. Tratamiento de agua residual de la extracción del aceite crudo de palma para su reutilización como agua de proceso mediante un biofiltro de arena. Quito, 2015, 24 h. Proyecto de investigación (ingeniero ambiental). Universidad San Francisco De Quito. Colegio de ciencias e ingeniería

pero aun así la alternativa 1 remueve más material orgánico por esta razón a la alternativa 3 se le da una calificación de 1.5.

Las condiciones de operación y mantenimiento son importantes para la selección del tratamiento ya que si este es muy complejo, representaría más gasto de dinero tanto para la capacitación de los operarios como para la cantidad de estos, además si el mantenimiento de los equipos es difícil y en caso de estropearse las piezas son difíciles de conseguir, esto provocaría que aumentara considerablemente los gastos para la empresa por lo tanto entre más sencillo sea el funcionamiento y el mantenimiento será mejor, por consiguiente este es el quinto criterio de selección, en la alternativa 1 el diseño, operación y mantenimiento de estos equipos no es complejo y no se necesitan muchos operarios para su operación, pero al tratarse de un tratamiento biológico el uso de microorganismos es delicado ya que hay que cuidar de las condiciones adecuadas para su crecimiento incluyendo pH y temperatura por lo tanto se le otorga la calificación de 0.75. Para la alternativa 2 el reactor de lecho fluidizado hay que controlar dos parámetros importantes que son la velocidad del flujo que se aplica y además allí se produce un biogás que puede ocasionar fraccionamiento del lecho<sup>94</sup> por ello es necesario de operarios que controlen estas variables con sumo cuidado por lo tanto se le otorga una puntuación de 0.5. Para la alternativa 3 también hay que controlar los microorganismos que se están empleando y que crezcan en las condiciones adecuadas sin embargo su operación no es difícil<sup>95</sup> por lo tanto su puntuación es de 0.75.

La empresa ya tiene delimitado el espacio que se usara para la PTAR, para la alternativa 1 las lagunas facultativas y aerobias ocupan grandes espacio también dependiendo de la capacidad de la planta, para una extractora que produce (30 t rff/hora) produce aproximadamente 120.000 m<sup>3</sup> de efluente al año; necesitando cuatro piscinas aproximadamente de (50m de largo, 25m de ancho y 2m de profundidad)<sup>96</sup>, por eso se le otorga la calificación de 0.375. A la alternativa 2 se le confiere de una puntuación de 0.5 ya que este tipo de reactores no ocupa grandes espacios por lo que usaría menos terreno, se dice que una superficie especifica de 1000 a 4000 m<sup>3</sup> <sup>97</sup>. Para la alternativa 3 se necesita de grandes espacios dependiendo de la capacidad de la planta pero este lleva varias capaz y es necesario que tenga espacio para que funcione por consiguiente se le asigna la puntuación de 0.125.

---

<sup>94</sup> PROMECAFE. El tratamiento anaeróbico de los residuos del café: una alternativa energética para la disminución del impacto ambiental en el sector. Nicaragua. P 45.

<sup>95</sup> MORENO REINOSO, Claudia. Tratamiento de agua residual de la extracción del aceite crudo de palma para su reutilización como agua de proceso mediante un biofiltro de arena. Quito, 2015, 24 h. Proyecto de investigación (ingeniero ambiental). Universidad San Francisco De Quito. Colegio de ciencias e ingeniería

<sup>96</sup> ALTHAUSEN, Markus. Tratamiento de efluentes de la planta de beneficio- convertir un residuo en un recurso. En: Revista palmas. Vol. 37 No. Especial (2016). P 32 ISSN 0121- 2923

<sup>97</sup> SAINAZ, Juan Antonio. Tecnologías para la sostenibilidad: procesos y operaciones unitarias en depuración de aguas residuales. Madrid: edición fundación EOI, 2007. 301 p. ISBN 978-84-88723-58-1

El sexto parámetro de selección tiene que ver los costos del proyecto en cuanto a que en lo posible sea económico su construcción y que no ocupe más del terreno designado de tal modo que para la alternativa 1 y 3 son menos costosas debido a que no usan equipos especializados los materiales son asequibles por eso a ambas se les asigna una puntuación de 1.5, por el contrario el reactor de lecho fluidizado tiene mayor complejidad ya que este reactor tiene medidas especiales y es poco común por lo que su costo es mayor por eso se le asigna una calificación de 1.125. El ultimo parámetro de calificación pero no menos importante es la seguridad industrial, la empresa tiene que velar por la salud de sus trabajadores y que corran el menor peligro posible mientras desarrollan sus labores y para la alternativa 1 ,2 y 3 estos tratamientos no son peligrosos para los trabajadores ya que no son radiactivos ni hay uso de químicos que puedan generar problemas a largo plazo.

Gracias a la matriz de evaluación de las alternativas se pudo determinar la alternativa 1 como la mejor opción de tratamiento para la planta de tratamiento de aguas para extracción de aceite de palma.

#### 4. DISEÑO DE EXPERIMENTOS

En este capítulo se mostraran las pruebas realizadas a dos biocarbones con el fin de evaluar su capacidad reductora de cloruros, a escala laboratorio, presentes en una muestra de agua con concentración conocida, como una posible opción para la futura implementación en el efluente real del proceso. Esta etapa del proyecto es apoyada por el centro de investigación en palma de aceite “CENIPALMA” el cual proporcionó las materias primas y las recomendaciones provenientes de sus investigaciones previas y estudios científicos para el desarrollo de la investigación. Algunas de las investigaciones mencionadas previamente se desarrollaron con procesos similares de adsorción de nitrógeno amoniacal y fosfatos<sup>98</sup>. Se seleccionaron distintos tiempos de agitación y cantidades para cada uno de los biocarbones con el objetivo de evaluar la capacidad de adsorción de cloruros de cada uno.

La determinación de los cloruros en el agua se realizó por medio del sistema reactivo descrito por el método argentométrico de Mohr el cual se ve descrito en el anexo B.

De acuerdo con la literatura se pudo determinar que después del tratamiento biológico que comúnmente se realiza en las plantas extractoras de aceite de palma en Colombia, los cloruros siguen siendo un parámetro de difícil reducción. Dicha afirmación se puede verificar en la tabla 16 que presenta los valores de los parámetros posteriores al tratamiento y que fue suministrada por CENIPALMA teniendo en cuenta los valores promedio de las extractoras del país.

**Tabla 16.** Parámetros del POME luego del tratamiento.

<b>Parámetros</b>	<b>Promedio</b>
DQO (mg/l)	1.688
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	500
Solidos Suspendidos (mg/l)	784
Solidos Sedimentables (mg/l)	2,60
Grasas y Aceites (mg/l)	31
Fósforo Total (P mg/l)	317
Nitrógeno Total (N mg/l)	192
Cloruros (Cl <sup>-</sup> mg/l)	919
Sulfatos (mg/l)	48
Fenoles (mg/l)	1,05
Plomo (mg/l)	0,16

<sup>98</sup> MUNAR David, RAMÍREZ Nidia, GARCÍA Jesús. Remoción de nitrógeno amoniacal y fosfatos con biocarbón de cuesco de palma para aplicación en vertimientos de plantas de beneficio. Sep 20,



**Tabla 16.** (Continuación)

<b>Parámetros</b>	<b>Promedio</b>
Hidrocarburos Totales (mg/l)	12
Temperatura (°C)	30

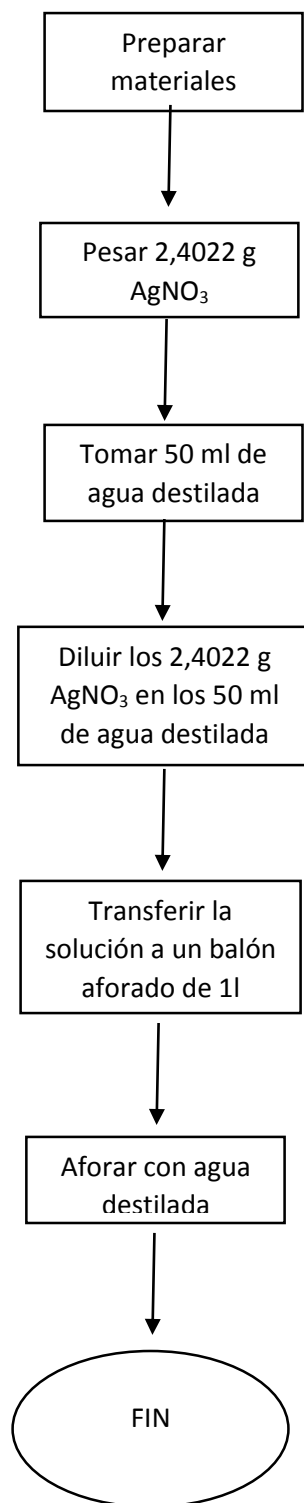
Las características presentadas en la tabla 16 justifican que el sistema de tratamiento que se debe emplear sea del tipo biológico, pero aun así se requiere la implementación de un tratamiento terciario para poder subsanar el parámetro de los cloruros. Con el fin de seleccionar el método más conveniente para disminuir la concentración de cloruros presentes en el POME posterior al tratamiento biológico, se va a experimentar el método de adsorción con biocarbones activados provenientes de la pirólisis lenta del cuesco de palma, donde uno de ellos fue pirolizado a una temperatura de 750°C (Biocarbón 1) y el otro a una temperatura de 650°C (Biocarbón 2).

#### **4.1 ELABORACION DE LAS SOLUCIONES**

Como punto de partida del desarrollo experimental fue necesaria la elaboración de tres soluciones, una muestra problema (solución de cloruros), una titulante para el método de Mohr (solución nitrato de plata) y una indicadora para el método de mohr (solución cromato de potasio), las cuales se describen a detalle en este capítulo.

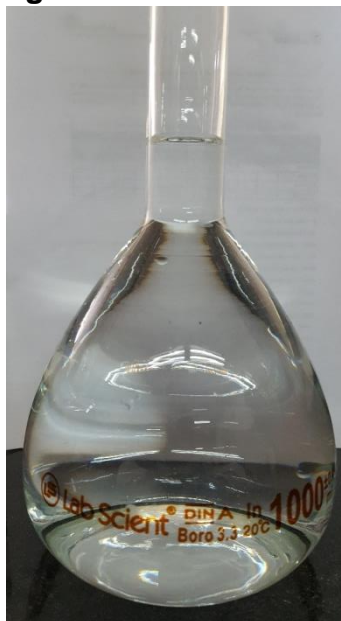
**4.1.1 Preparación solución nitrato de plata.** Para desarrollar el método de adsorción se aplicó el método mohr (argentométrico), el cual valora los haluros (cloruros y bromuros) mediante la adición de una solución estándar de nitrato de plata 0.1N. Inicialmente para la preparación de la solución fueron pesados 2,4022 g de nitrato de plata y disueltos en agua destilada según se presenta en la figura 25. Los cálculos detallados de la preparación de la solución de nitrato de plata se presentan en el anexo B.

**Figura 25.** Protocolo para la preparación solución de nitrato de plata



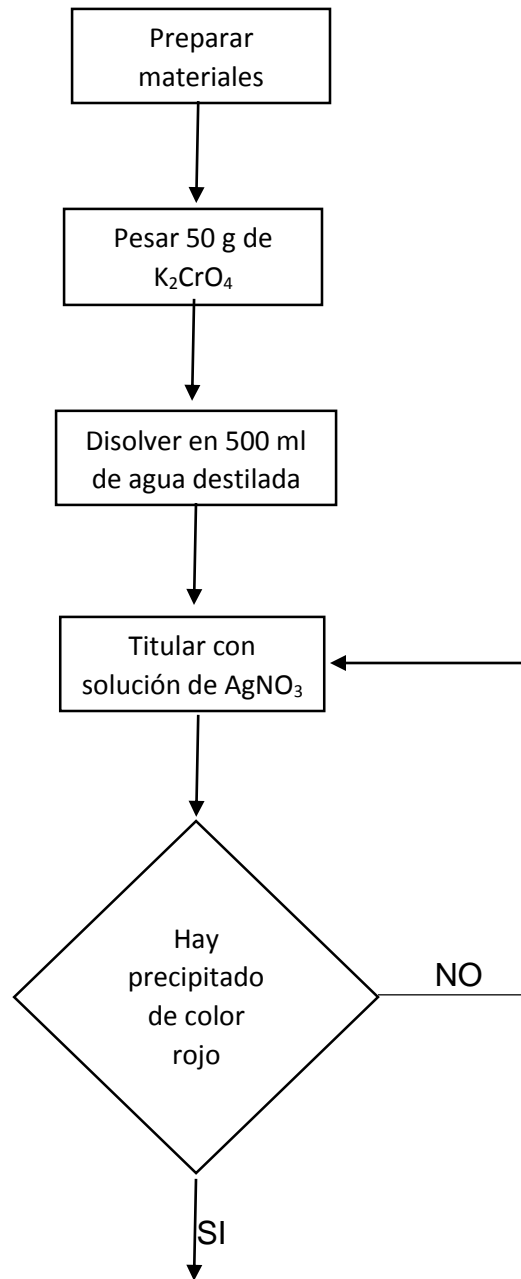
Este procedimiento de preparación de solución de nitrato de plata se realizó en dos ocasiones con el fin de disminuir el posible error por la descomposición en otros productos del nitrato de plata al ser un compuesto fotosensible. La dilución obtenida a partir del protocolo presentado en la figura 25 para la solución de nitrato de plata se muestra en el respectivo balón aforado en la figura 26.

**Figura 26.** Solución de nitrato de plata

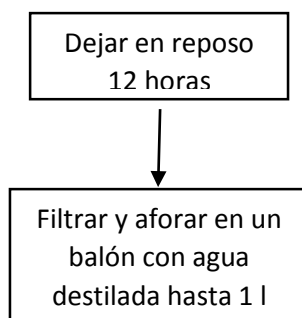


**4.1.2 Preparación solución indicadora de cromato de potasio.** Para la preparación de la solución indicadora de cromato de potasio se disolvió 50 g de cromato de potasio en 500 ml de agua destilada. Posteriormente a esto se agregó solución de nitrato de plata ( $\text{AgNO}_3$ ) hasta la aparición de un precipitado de color rojo definido; se dejó reposar 12 horas y se filtró después se completó el volumen con agua destilada hasta 1 litro. El protocolo seguido en la elaboración de la solución indicadora de nitrato de plata se muestra en la figura 27.

**Figura 27.** Protocolo para la preparación solución indicadora de cromato de potasio

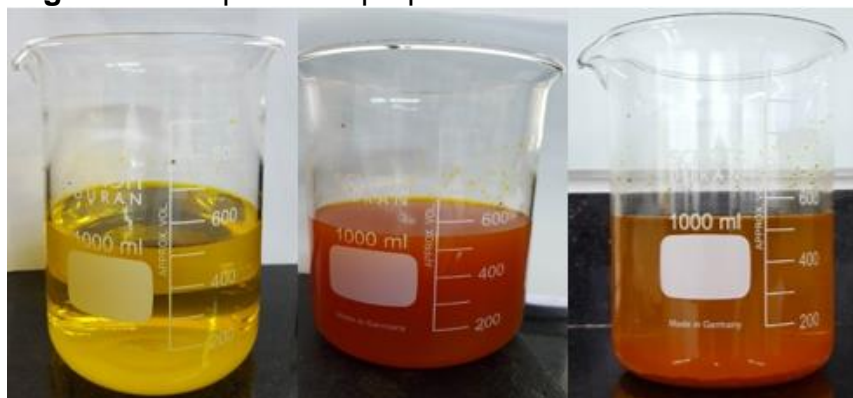


**Figura 27.** (Continuación)



Las etapas de preparación, titulación con nitrato de plata hasta la formación del precipitado rojo y reposo de 12 horas de la solución indicadora hasta la decantación del precipitado se presentan en la figura 28.

**Figura 28.** Etapas de la preparación de solución de nitrato de plata.



**4.1.3 Elaboración solución estándar de cloruros.** Teniendo en cuenta que en primer lugar como se ha mencionado anteriormente la planta extractora se encuentra en proceso de construcción por lo cual no se cuenta con un efluente (POME) real hasta el momento, se implementó agua sintética con una concentración de cloruros conocida (aproximadamente 100mg/l Cl<sup>-</sup>) como punto de partida de la experimentación, además, los métodos que se emplearon no han sido investigados a profundidad para la remoción de este tipo de contaminantes, por lo cual eliminar la mayor cantidad de impurezas en el agua permitió tener más claridad y exactitud en los resultados de remoción obtenidos; por lo tanto se decidió cómo se mencionó anteriormente la preparación de una solución estándar de cloruros bajo los siguientes cálculos.

Para preparar 1 litro de la solución de cloruros con concentración de 100 mg/l Cl se calcularon que son necesarios 0,1523 g NH<sub>4</sub>Cl. Los cálculos detallados de esta cantidad de cloruro de amonio se presentan en el anexo B.

Con el valor obtenido anteriormente se diluye con agua destilada hasta completar un volumen de 1 litro de la solución. Cabe resaltar que el método Mohr funciona en la determinación de la concentración de cloruros con muestras de pH mayor a 7 pero no mayor a 10,5 por lo cual se procedió a realizar la medición del pH de la solución con cloruros por medio de papel indicador obteniéndose un pH de 7 como se muestra en la figura 29. De igual forma estudios previos de Biocarbón de cuesco de palma han demostrado que la capacidad de adsorción del biocarbón disminuye con el aumento del pH<sup>99</sup>.

**Figura 29.** pH de la solución de cloruros

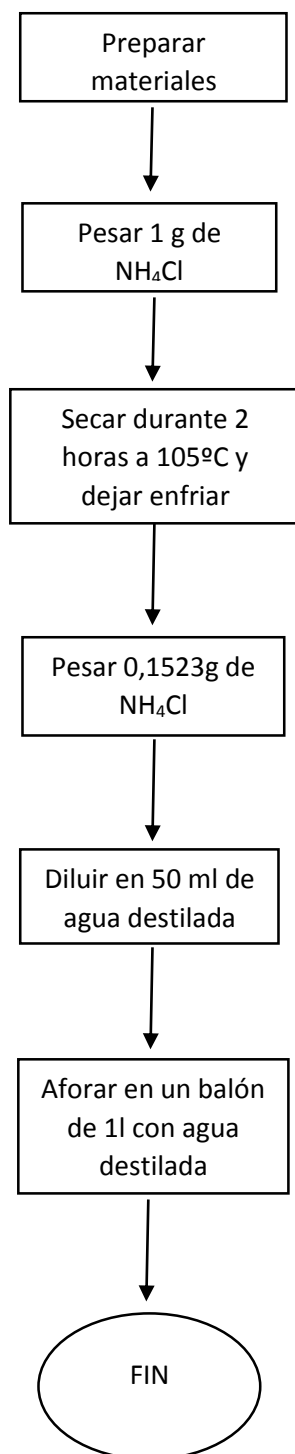


El protocolo de la preparación de la solución de cloruros se muestra en la figura 30.

---

<sup>99</sup> VARGAS, Diana P.; GIRALDO, Liliana y MORENO, Juan Carlos. Determinación de isothermas de adsorción y entalpías de inmersión de carbón activado en soluciones acuosas de 3-cloro fenol a diferente ph. En: Revista Colombiana De Qumica. vol. 39, no. 1, p. 121

**Figura 30.** Protocolo para la preparación solución estándar de cloruros



Este procedimiento se realizó 3 veces debido al agotamiento de la solución para las respectivas pruebas, por lo cual se puede esperar que las concentraciones iniciales de cada muestra varíen ligeramente.

## 4.2 ETAPAS DEL DESARROLLO EXPERIMENTAL

Como se mencionó en la introducción del capítulo, se evaluaron dos tipos de biocarbones con el fin de determinar la capacidad de adsorción de cloruros de cada uno de ellos, y la determinación de la concentración final de cloruros en la muestra se realizó utilizando el método de Mohr. Los biocarbones estudiados son provenientes de cuesco de palma obtenido de siembras de palma africana en la región de Casanare (Colombia) y fueron pirolizados bajo distintas condiciones de temperatura y para condiciones iguales de tiempo como se presenta en la tabla 17. El cuesco de palma es un buen material precursor de biocarbones activados debido a su alta densidad, alto contenido de carbón y su bajo contenido de cenizas<sup>100</sup>.

La activación de ambos biocarbones se realizó por medio de oxidación parcial con aire de la superficie del biocarbón la cual mejora la capacidad de adsorción del biocarbón para remover compuestos<sup>101</sup>. Además, la utilización del cuesco de palma sin ningún tipo de transformación permitió tenerlo de testigo para determinar si valía la pena la implementación de pirolisis para la reducción de cloruros.

**Tabla 17.** Características de obtención de las muestras de estudio.

Muestra	Descripción
Biocarbón 1	Cuesco de palma pirolizado a 750°C y oxidado parcialmente con aire
Biocarbón 2	Cuesco de palma pirolizado a 650°C y oxidado parcialmente con aire
Cuesco de palma de aceite	Cuesco de palma de aceite sin ningún tipo de pirolisis

El proceso y las condiciones de proceso de la obtención de cada uno de los biocarbones van a influir directamente en las características fisicoquímicas del producto final por lo cual se presenta de gran importancia su conocimiento. La temperatura de pirolisis y el tiempo de calentamiento influyen directamente en la reducción de materia volátil y del rendimiento del carbón debido a la destrucción de restos de celulosa y hemicelulosa. Un parámetro muy importante dentro de los procesos de adsorción en carbones activados es el pH de la solución que contiene

<sup>100</sup> JIA, Qipeng y LUA, Aik Chong. Effects of pyrolysis conditions on the physical characteristics of oil-palm-shell activated carbons used in aqueous phase phenol adsorption. En: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. vol. 83, no. 2, p. 175-179

<sup>101</sup> MUNAR David, RAMIREZ Nidia, GARCIA Jesús. Remoción de nitrógeno amoniacal y fosfatos con biocarbón de cuesco de palma para aplicación en vertimientos de plantas de beneficio. Sep 20,.



el adsorbato debido a que influye en la carga superficial del biocarbón y por ende en su capacidad de adsorción<sup>102</sup>.

**4.2.1 Tiempo mínimo de adsorción.** Para la realización del proceso de adsorción se desarrolló inicialmente una determinación del tiempo mínimo necesario por cada muestra evaluada para que esta llegara al equilibrio de adsorción donde la muestra problema ya no varía en la concentración de los cloruros. El tiempo mínimo en un sistema batch se obtuvo en intervalos de 0 a 72 horas de agitación constante con las condiciones de análisis que se presentan en la tabla 18.

Para estudios previamente realizados en procesos de adsorción de cadmio en biocarbones, se determinó que el tiempo mínimo era relativamente muy corto en ese proceso específico siendo de aproximadamente no más de un minuto antes de que se alcanzara el equilibrio<sup>103</sup>.

**Tabla 18.** condiciones de análisis proceso de adsorción

Tiempo	0	15	30	45	1h	4h	12h	18h	24h	48h	72h
	min	min	min	min							
condiciones de análisis											
concentración solución adsórbalo							100 Cl mg/litro				
dosis muestra							12,5 g/litro				
volumen solución adsórbalo							1000 ml				
velocidad de agitación							150 rpm				
Temperatura							Ambiente				

Para la determinación de la concentración de cloruros en primera instancia se utilizó el principio reactivo del método de mohr descrito en el anexo B y posterior a esto la fórmula de concentración descrita en el anexo C tomada de la norma NMX-AA-073-SCFI-2001 para la determinación de cloruros totales en agua. Así mismo los tiempos se determinaron con base a la norma ASTM D3860-98 para la determinación de la capacidad de adsorción del carbón activado mediante la técnica de isotermas en fase acuosa, la cual dicta que como tiempo mínimo deben ser dos horas y no pone un máximo para el mismo.

El esquema del protocolo llevado a cabo para la determinación del tiempo preliminar se muestra en la figura 31 y fue el mismo tanto para los dos biocarbones evaluados como para el cuesco sin pirolizar.

<sup>102</sup> TRAN, Hai Nguyen; YOU, Sheng-Jie y CHAO, Huan-Ping. Effect of pyrolysis temperatures and times on the adsorption of cadmium onto orange peel derived biochar. En: Waste Management & Research. vol. 34, no. 2, p. 129-138

<sup>103</sup> TRAN, Hai Nguyen; YOU, Sheng-Jie y CHAO, Huan-Ping. Effect of pyrolysis temperatures and times on the adsorption of cadmium onto orange peel derived biochar. En: Waste Management & Research. vol. 34, no. 2, p. 129-138

**Figura 31.** Protocolo proceso de adsorción de cloruros para determinación tiempo mínimo

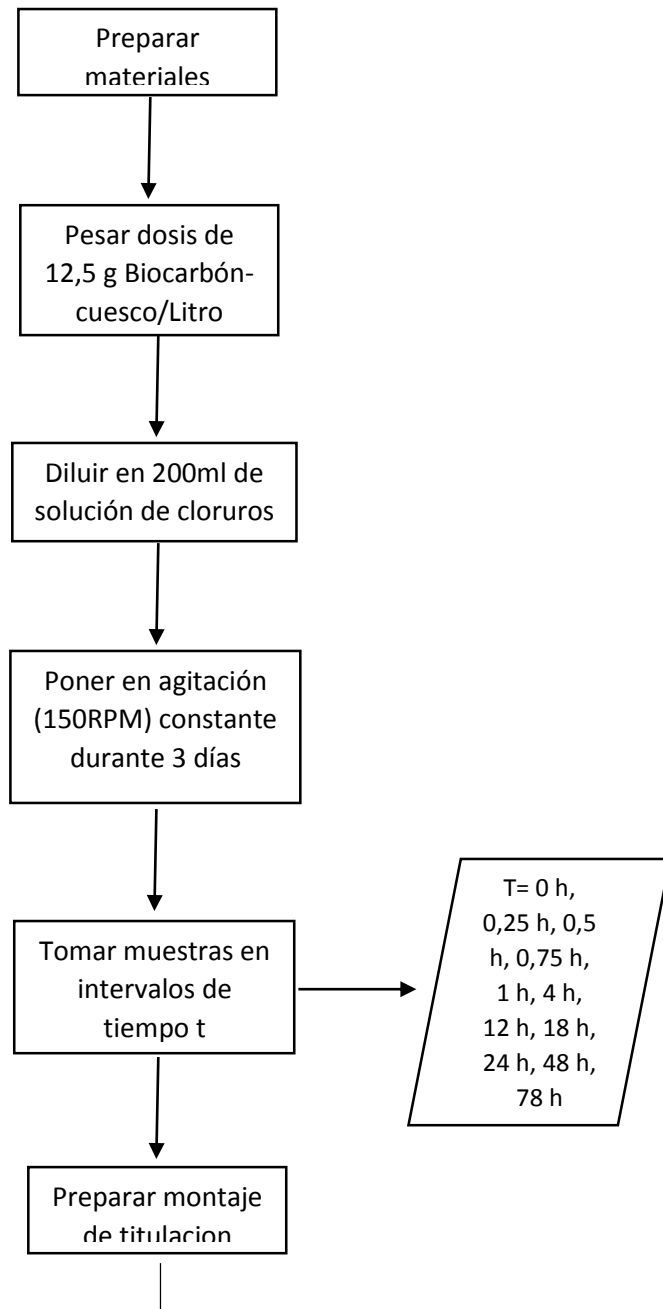
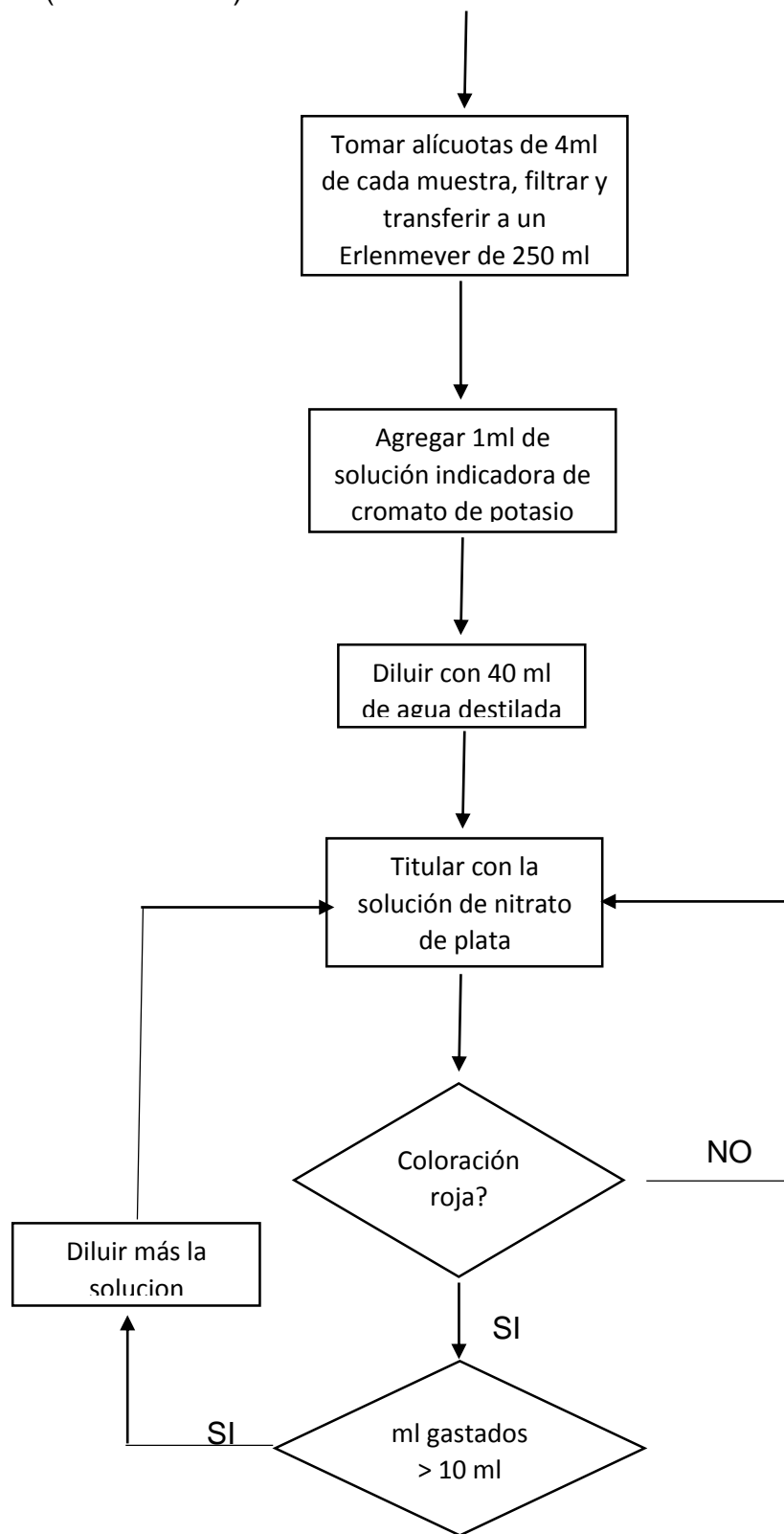
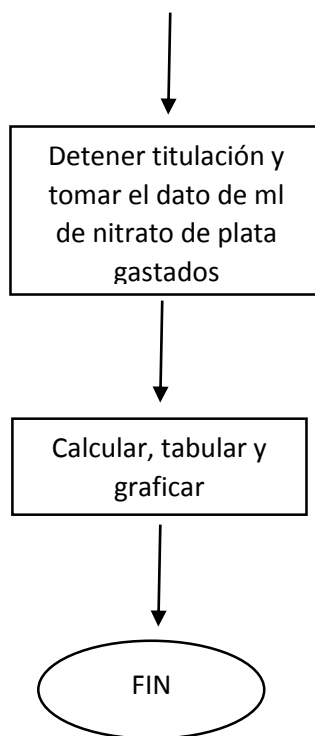


Figura 31. (Continuación)



**Figura 31.** (Continuación)



En cada uno de los ensayos realizados y, como se mostró anteriormente, se tomaron en cuenta las consideraciones presentes en la tabla 19 para los mililitros de indicador utilizados, los mililitros utilizados en la dilución de la muestra, las alícuotas (ml) de muestra problema utilizada en cada ensayo y la cantidad (ml) de solución de nitrato de plata utilizados en el blanco. Las alícuotas de muestra problema fueron filtradas previo a la titulación para retirar las cantidades de biocarbón presentes. El proceso de agitación fue llevado a cabo a 150 RPM, como se describió en la tabla 18, y utilizando agitadores magnéticos como se presenta en la figura 32.

**Tabla 19.** Consideraciones para el cálculo de la concentración de cloruros

Blanco (ml)	0,55
Volumen final (ml)	5,3
ml de muestra	4
ml de agua destilada (dilución)	40
ml de indicador	1

**Figura 32.** Proceso de agitación



**4.2.1.1 Biocarbón 1.** Se realizó una repetición por cada ensayo realizado, donde el procedimiento presentado en la figura 31 aplicado para el biocarbón 1 presentó los resultados disponibles en la tabla 20, para el ensayo 1. En este se pudo evidenciar que el carbón alcanza el equilibrio de adsorción en un tiempo aproximado de 1 hora pudiendo alcanzar una adsorción máxima del 23,5% de los cloruros presentes en la muestra, este mismo comportamiento se presentó en la repetición cuyos resultados se muestran en la tabla 21. El comportamiento del primer ensayo se muestra en la gráfica 1.

**Tabla 20.** Resultados cinética preliminar ensayo biocarbón 1  
BIOCARBON 1

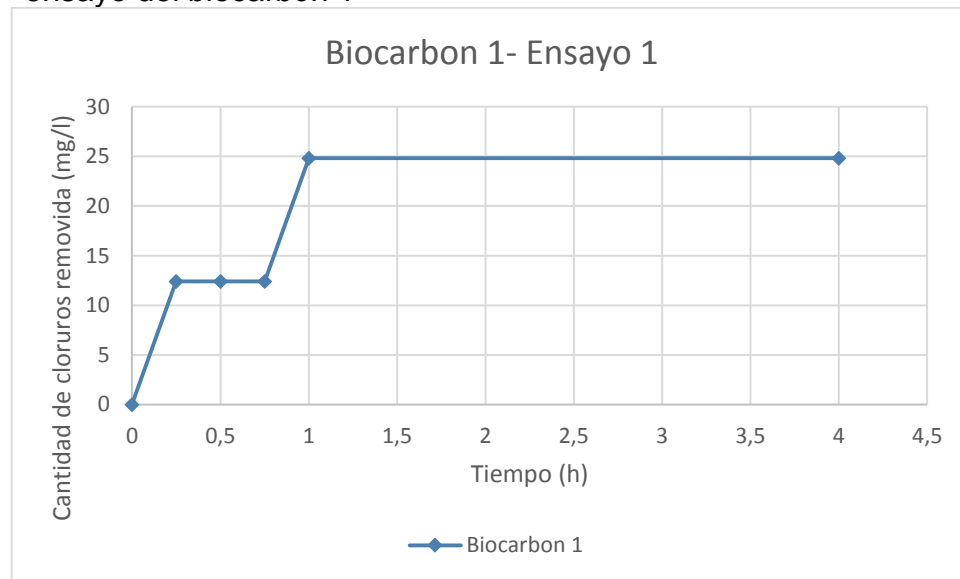
TIEMPO (horas)	Volumen de AgNO <sub>3</sub> gastado (ml)	Concentración de cloruros (mg/l)	% de remoción	Cantidad de cloruros removidos (mg/l)
0	1,4	105,46	0	0
0,25	1,3	93,05	11,76	12,41
0,5	1,3	93,05	11,76	12,41
0,75	1,3	93,05	11,76	12,41
1	1,2	80,65	23,53	24,81
4	1,2	80,65	23,53	24,81
12	1,2	80,65	23,53	24,81
18	1,2	80,65	23,53	24,81
24	1,2	80,65	23,53	24,81

**Tabla 20.** (Continuación)

Tiempo (horas)	Volumen de AgNO <sub>3</sub> gastado (ml)	Concentración de cloruros (mg/l)	% de remoción	Cantidad de cloruros removidos (mg/l)
48	1,2	80,65	23,53	24,81
72	1,2	80,65	23,53	24,81

La grafica 1 muestra los resultados obtenidos con el biocarbón 1 partiendo de agua con concentración de 105,46 mg/l Cl<sup>-</sup> donde se puede identificar que con el paso del tiempo se alcanza una máxima remoción de cloruros de 24,81 mg/l a partir de la primera hora de agitación y mostrando el comportamiento del carbón en el tiempo.

**Grafica 1.** Cantidad de cloruros en mg/l removidos en el tiempo para el ensayo del biocarbón 1



Los resultados obtenidos para la primera repetición realizada se muestran en la tabla 21 y de igual forma el comportamiento del proceso se muestra en la gráfica 2

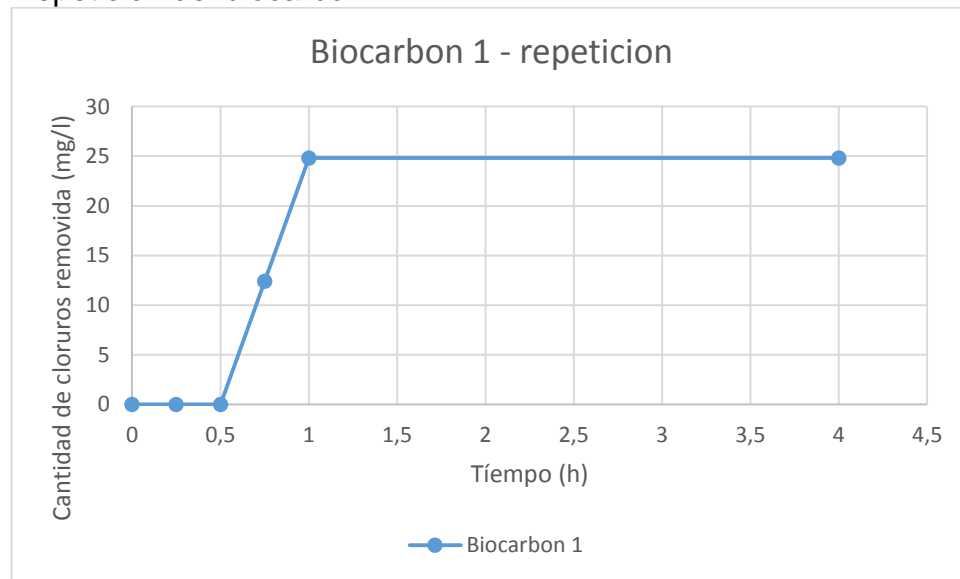
**Tabla 21.** Resultados cinética preliminar repetición biocarbón 1  
BIOCARBON 1

TIEMPO (horas)	Volumen de AgNO <sub>3</sub> gastado (ml)	Concentración de cloruros (mg/l)	% de remoción	Cantidad de cloruros removidos (mg/l)
0	1,4	105,46	0	0
0,25	1,4	105,46	0	0
0,5	1,4	105,46	0	0
0,75	1,3	93,06	11,76	12,41

**Tabla 21.** (Continuación)

TIEMPO (horas)	Volumen de AgNO3 gastado (ml)	Concentración de cloruros (mg/l)	% de remoción	Cantidad de cloruros removidos (mg/l)
1	1,2	80,65	23,53	24,81
4	1,2	80,65	23,53	24,81
12	1,2	80,65	23,53	24,81
18	1,2	80,65	23,53	24,81
24	1,2	80,65	23,53	24,81
48	1,2	80,65	23,53	24,81
72	1,2	80,65	23,53	24,81

**Grafica 2.** Cantidad de cloruros en mg/l removidos en el tiempo para la repetición del biocarbón 1



Observando la tabla 20 y 21 se puede concluir que en ambos casos el biocarbón alcanzaba el equilibrio de adsorción a un tiempo de aproximadamente 1 hora

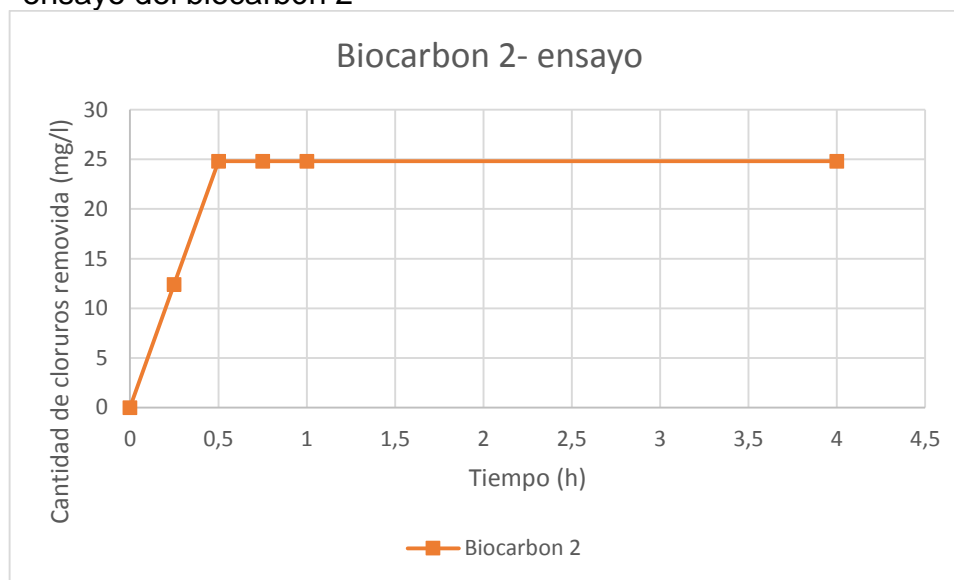
**4.2.1.2 Biocarbón 2.** De igual manera los resultados obtenidos para el ensayo del biocarbón 2 fueron tabulados en la tabla 22, donde cabe resaltar que alcanza el equilibrio de adsorción en la primera media hora de agitación alcanzando de igual forma una remoción máxima de cloruros de aproximadamente 23,5%.

**Tabla 22.** Resultados cinética preliminar ensayo biocarbón 2  
**BIOCARBON 2**

TIEMPO (horas)	Volumen de AgNO3 gastado (ml)	Concentración de cloruros (mg/l)	% de remoción	Cantidad de cloruros removida (mg/l)
0	1,4	105,46	0	0
0,25	1,3	93,06	11,76	12,41
0,5	1,2	80,65	23,53	24,81
0,75	1,2	80,65	23,53	24,81
1	1,2	80,65	23,53	24,81
4	1,2	80,65	23,53	24,81
12	1,2	80,65	23,53	24,81
18	1,2	80,65	23,53	24,81
24	1,2	80,65	23,53	24,81
48	1,2	80,65	23,53	24,81
72	1,2	80,65	23,53	24,81

Los resultados del comportamiento se presentan en la gráfica 3 de igual forma que se realizó para el biocarbón 1 partiendo de la misma concentración de cloruros en la muestra (105,46 mg/l). La cantidad de cloruros removida para el biocarbón 2 permitió identificar que con el paso del tiempo se alcanza una máxima remoción de cloruros de 24,81 mg/l a partir de la primera media hora de agitación en el ensayo desarrollado.

**Grafica 3.** Cantidad de cloruros en mg/l removidos en el tiempo para el ensayo del biocarbón 2



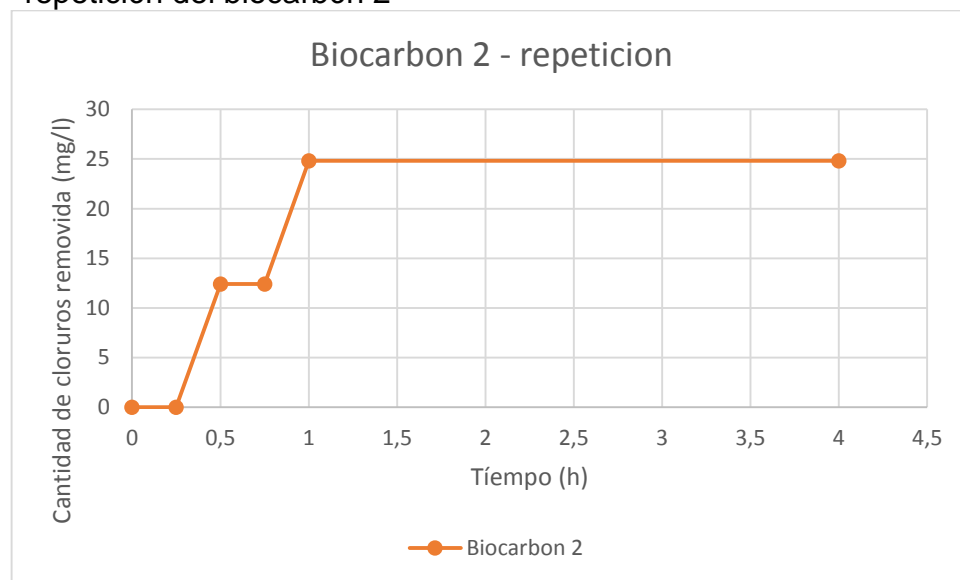


De igual forma se realizó el mismo procedimiento para la repetición obteniéndose los resultados presentes en la tabla 23 junto a su comportamiento presente en la gráfica 4.

**Tabla 23.** Resultados cinética preliminar repetición biocarbón 2

BIOCARBON 2					
TIEMPO (horas)	Volumen de AgNO3 gastado (ml)	Concentración de cloruros (mg/l)	% de remoción	Cantidad de cloruros removida (mg/l)	
0	1,4	105,46	0	0	
0,25	1,4	105,46	0	0	
0,5	1,3	93,06	11,76	12,41	
0,75	1,3	93,06	11,76	12,41	
1	1,2	80,65	23,53	24,81	
4	1,2	80,65	23,53	24,81	
12	1,2	80,65	23,53	24,81	
18	1,2	80,65	23,53	24,81	
24	1,2	80,65	23,53	24,81	
48	1,2	80,65	23,53	24,81	
72	1,2	80,65	23,53	24,81	

**Grafica 4.** Cantidad de cloruros en mg/l removidos en el tiempo para la repetición del biocarbón 2



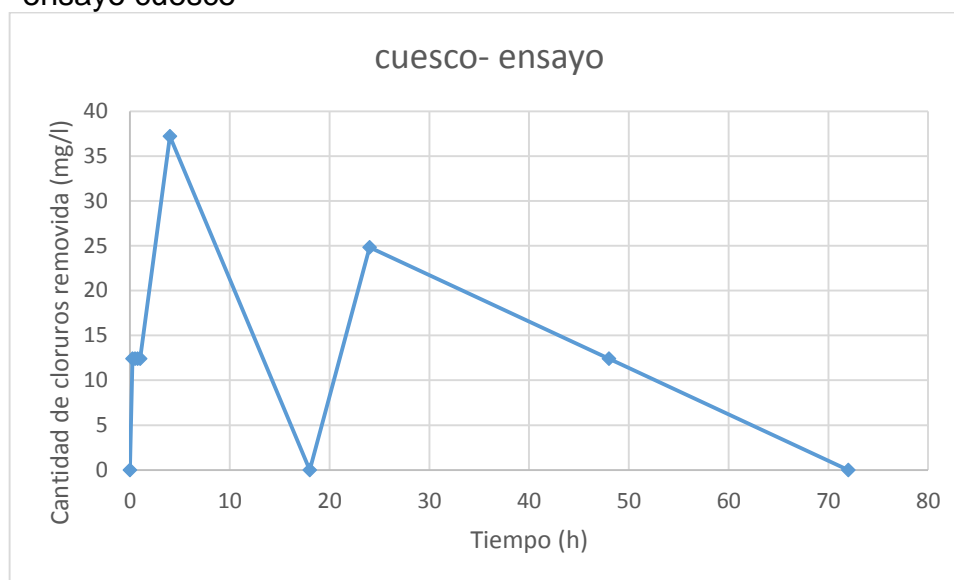
**4.2.1.3 Cuesco.** El cuesco al igual que los dos biocarbones fue expuesto al protocolo de la cinética preliminar con el fin de tomarlo como blanco frente a si podía lograr adsorciones iguales o similares a los biocarbones evaluados. En este caso el cuesco presento una tendencia muy irregular con respecto a los valores obtenidos de reducción de cloruros con el paso del tanto para el ensayo como para la repetición realizada, por lo cual no fue tenido en cuenta dentro de los ensayos batch que se realizaron posteriormente a las muestras. Los resultados obtenidos para el cuesco en el ensayo se encuentran en la tabla 24, así mismo los resultados obtenidos de la repetición se muestran en la tabla 25.

**Tabla 24 .** Resultados cinética preliminar ensayo del cuesco

TIEMPO (horas)	CUESCO			Cantidad de cloruros removida (mg/l)
	Volumen de AgNO <sub>3</sub> gastado (ml)	Concentración de cloruros (mg/l)	% de remoción	
0	1,4	105,46	0	0
0.25	1,3	93,06	11,76	12,41
0.5	1,3	93,06	11,76	12,41
0.75	1,3	93,06	11,76	12,41
1	1,3	93,06	11,76	12,41
4	1,1	68,24	54,54	37,22
12	1,3	93,06	11,76	12,41
18	1,4	105,46	0	0
24	1,2	80,65	23,53	24,81
48	1,3	93,06	11,76	12,41
72	1,4	105,46	0	0

De igual forma y con la finalidad de observar el comportamiento de los datos, presentados en la gráfica 5 donde, y como se mencionó anteriormente, se ve la irregularidad de la adsorción del cuesco.

**Grafica 5.** Cantidad de cloruros en mg/l removidos en el tiempo para el ensayo cuesco



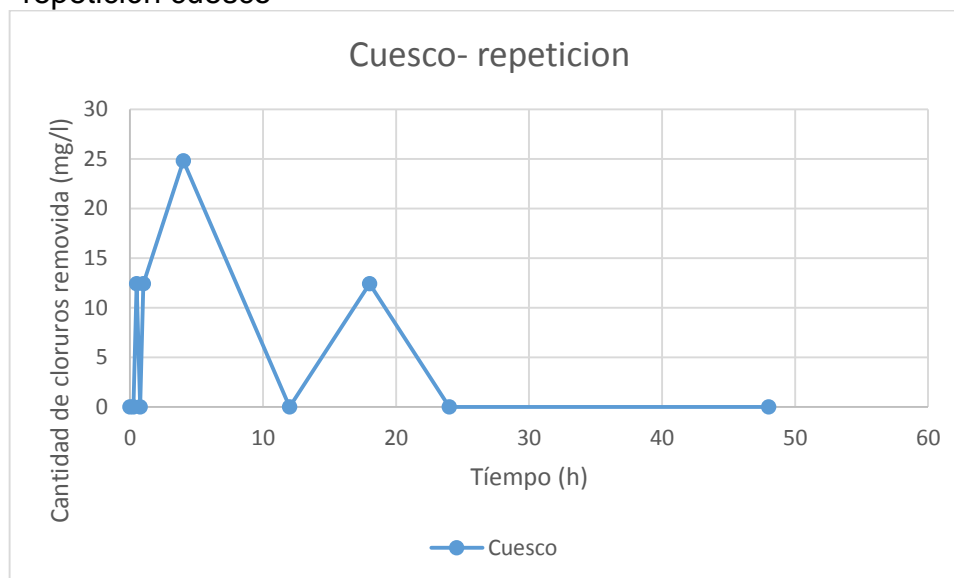
A continuación se presentan los resultados obtenidos para la repetición del cuesco.

**Tabla 25.** Resultados cinética preliminar repetición cuesco

TIEMPO (horas)	CUESCO			Cantidad de cloruros removida (mg/l)
	Volumen de AgNO3 gastado (ml)	Concentración de cloruros (mg/l)	% de remoción	
0	1,4	105,46	0	0
0.25	1,3	93,06	11,76	12,41
0.5	1,3	93,06	11,76	12,41
0.75	1,3	93,06	11,76	12,41
1	1,3	93,06	11,76	12,41
4	1,1	68,24	35,29	37,22
12	1,3	93,06	11,76	12,41
18	1,4	105,46	0	0
24	1,2	80,65	23,53	24,81
48	1,3	93,06	11,76	12,41
72	1,4	105,46	0	0

El comportamiento del cuesco en la repetición se muestra a continuación en la gráfica 6.

**Grafica 6.** Cantidad de cloruros en mg/l removidos en el tiempo para la repetición cuesco



**4.2.2 Isotermas de adsorción de cloruro.** Las isotermas de adsorción se utilizan para describir la relación entre la concentración de cloruros y el biocarbón implementado bajo temperatura constante. Tomando como punto de partida los tiempos determinados en la cinética preliminar para los dos biocarbones evaluados, se realizaron las isotermas de adsorción por medio de ensayos batch tomando como variable del proceso la cantidad de biocarbón aplicada en cada dosis y replicando las mismas condiciones de agitación y temperatura trabajadas en la fase anterior. De igual forma se trabajaron agitadores magnéticos. Las condiciones exactas trabajadas se presentan en la tabla 26.

**Tabla 26.** Condiciones de análisis ensayos batch

Cantidades (gbiocarbón/l)	0	0,1	1	2,5	5	7,5	10	12,5	
condiciones de análisis									
concentración solución adsórbalo								100 Cl mg/l	
Volumen solución de adsorbato								50 ml	
Tiempo de contacto								Cinética	
velocidad de agitación								150 rpm	
Temperatura								Ambiente	

Las formulas concernientes a la determinación de la capacidad de adsorción se presentan en el anexo D y las ecuaciones correspondientes a las isotermas de Freundlich y Langmuir (isotermas a trabajar) se presentan más adelante en el capítulo. El protocolo a seguir para el proceso de las isotermas de adsorción se

presenta en la figura 33. El tiempo determinado por medio de la cinética preliminar fue tomado como 5 horas para reducir cualquier tipo de error aun sabiendo que ambos biocarbones alcanzaron el equilibrio en aproximadamente 1 hora. Adicionalmente las cantidades de biocarbón de cada prueba fueron tomadas con base a la norma ASTM D3860-98 para la determinación de la capacidad de adsorción del carbón activado mediante la técnica de isotermas en fase acuosa.

**Figura 33.** Protocolo proceso de isotermas de adsorción

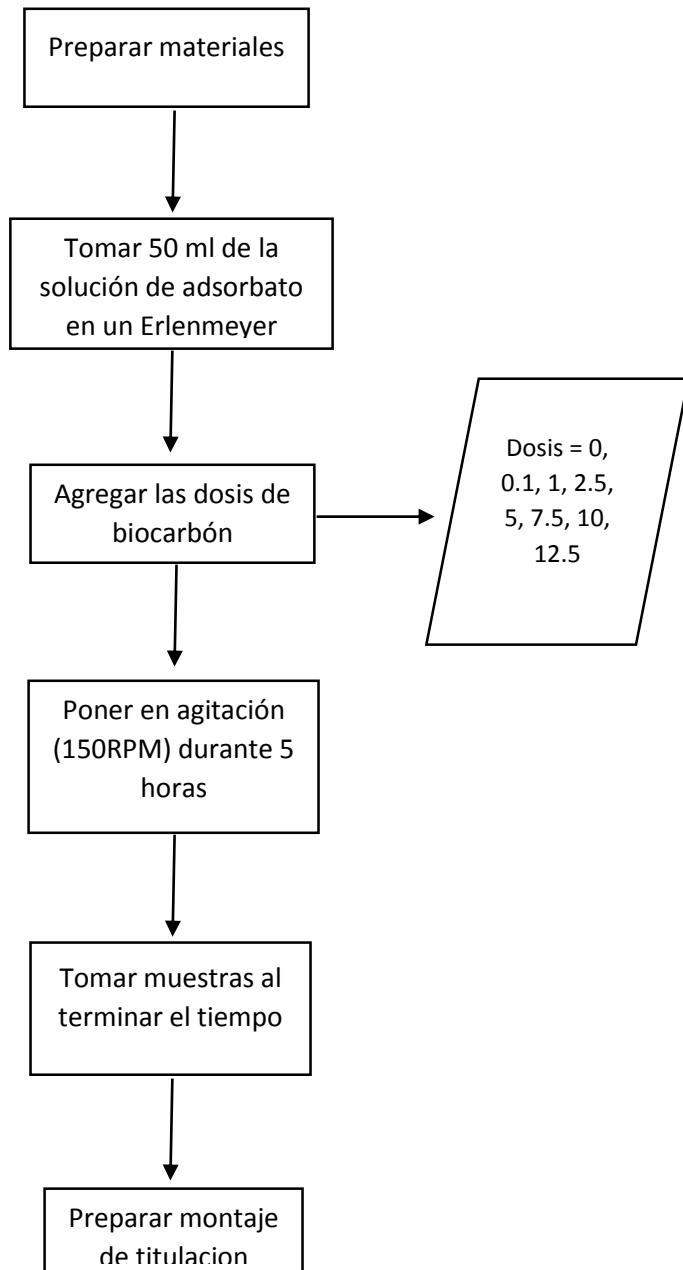
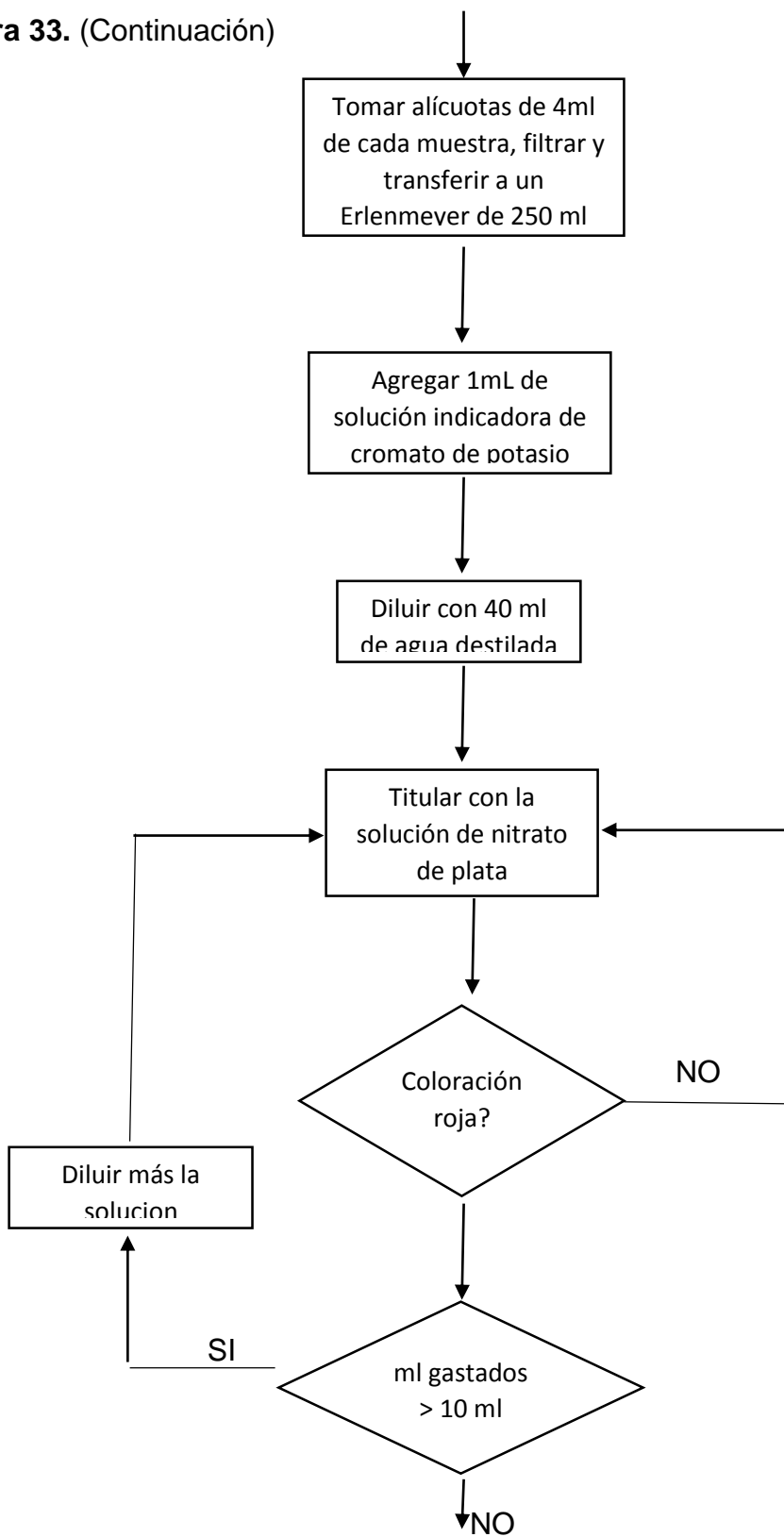
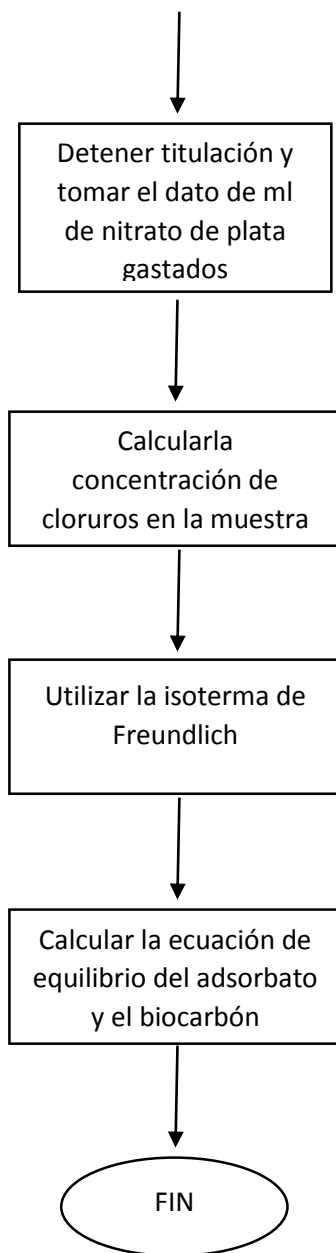


Figura 33. (Continuación)



**Figura 33.** (Continuación)



El protocolo presentado en la figura 33 se realizó en dos ocasiones (ensayo más 1 repetición) para cada uno de los biocarbones y para cada una de las 8 cantidades de biocarbón que fueron evaluadas, teniendo así un total de 48 mediciones que se presentaran más adelante en el capítulo.

#### **4.2.2.1 Capacidad de adsorción biocarbones**

- **Biocarbón 1.** Se realizaron las pruebas de adsorción en un ensayo y una repetición para el biocarbón 1 con el fin de poder obtener las isothermas de Freundlich y Langmuir presentadas más adelante en el capítulo, de la misma forma se determinó la capacidad de adsorción presentada en cada una de las pruebas y para cada una de las cantidades (g) de biocarbón, expresada como la cantidad de cloruros removidos de la solución de adsorbato y expresada en porcentaje de remoción (% remoción). Los valores obtenidos de reducción se presentan en la tabla 27 para el biocarbón 1. Los datos más detallados para cada una de las repeticiones se presentan en el anexo D.

**Tabla 27.** Reducción de cloruros por cantidad Biocarbón 1 en las dos pruebas

Cantidad (g)	Prueba 1		Prueba 2	
	Concentración equilibrio (mg/l)	Cantidad Removida (mg/l)	Concentración equilibrio (mg/l)	Cantidad Removida (mg/l)
0	111,22	0	113,56	0
0,005	111,22	0	113,56	0
0,05	110,05	1,17	112,39	1,17
0,125	107,71	3,51	110,05	3,51
0,25	103,03	8,19	106,54	7,02
0,375	105,37	5,85	101,85	11,71
0,5	94,83	16,39	99,51	14,05
0,625	87,81	23,41	87,81	25,76

La cantidad de cloruros removida fue calculada teniendo en cuenta la ecuación 2.

**Ecuación 2.** Cantidad de cloruros removida

$$\text{Reduccion de ion } Cl^- = \left( \frac{C_0 - C_e}{C_0} \right) \times 100 \quad (1)$$

Donde:

Co: concentración inicial en la solución de adsorbato

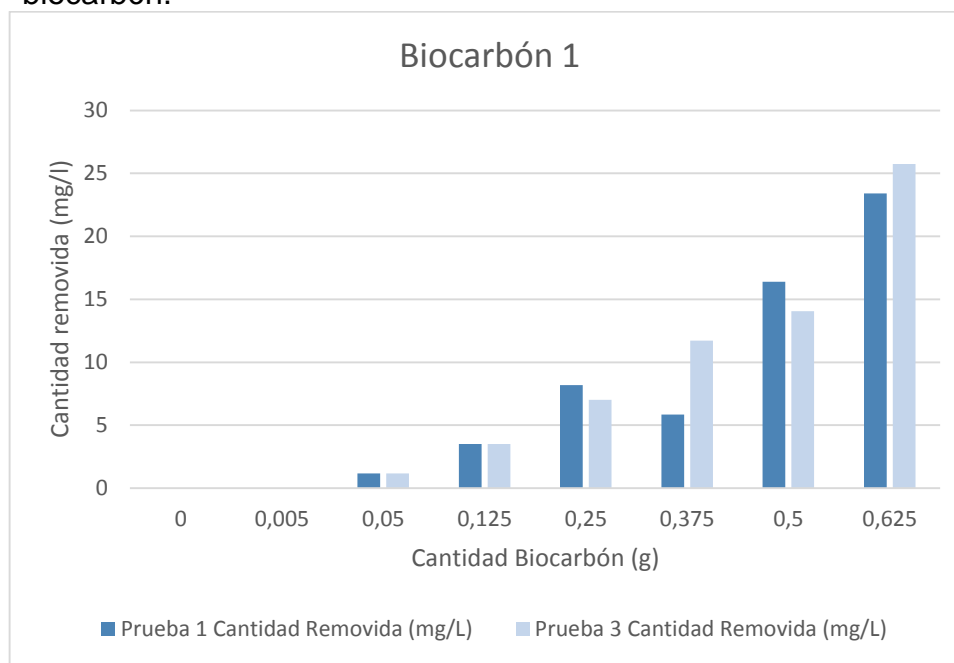
Ce: concentración en el equilibrio presente en la solución de adsorbato

En el comportamiento del biocarbón 1 se puede evidenciar que la tendencia es de aumento en la reducción de cloruros de la muestra conforme aumenta la concentración de biocarbón en la misma (ver grafica 7), esto también fue comprobado en estudios realizados de la adsorción del ion  $Pb^{2+}$  sobre carbón activado donde al aumentar la dosis de adsorbente el porcentaje de remoción incrementaba debido a la disponibilidad de más sitios activos a causa del aumento



de la dosis de carbón activado, lo que provocó que más iones  $Pb^{2+}$  se fijaran a la superficie del adsorbente<sup>104</sup>.

**Grafica 7.** Capacidad de adsorción biocarbón 1 por cada cantidad de biocarbón.



De igual forma los resultados obtenidos para el biocarbón 1 fueron expresados en forma del porcentaje de remoción de cloruros obtenido para cada una de las cantidades de biocarbón en las dos repeticiones evaluadas y disponibles en la tabla 28.

**Tabla 28.** Porcentaje de reducción de cloruros por cantidad de Biocarbón 1 en las dos pruebas

Cantidad (g)	Prueba 1		Prueba 2	
	Concentración equilibrio (mg/l)	% Remoción	Concentración equilibrio (mg/l)	% Remoción
0	111,22	0	113,56	0
0,005	111,22	0	113,56	0
0,05	110,05	1,05	112,39	1,03

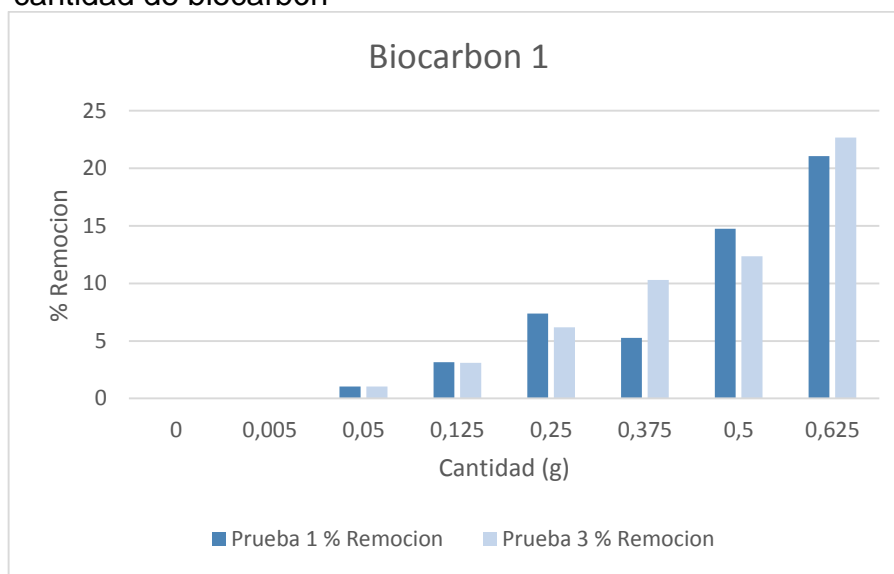
<sup>104</sup> ORTEGA, Grey C. Castellar y GARCÍA, Antonio A. García. Remoción de  $Pb^{2+}$  en disolución acuosa sobre carbón activado en polvo: Estudio por lote. En: Prospectiva. vol. 9, no. 1, p. 59-68

**Tabla 28.** (Continuación)

Cantidad (g)	Concentración equilibrio (mg/l)	% Remoción	Concentración equilibrio (mg/l)	% Remoción
0,125	107,71	3,16	110,05	3,09
0,25	103,03	7,37	106,54	6,18
0,375	105,37	5,26	101,85	10,31
0,5	94,83	14,73	99,51	12,37
0,625	87,81	21,05	87,81	22,68

En este caso el comportamiento es de la misma forma que el presentado en la gráfica 7 y en este se puede observar que el porcentaje de remoción máximo se obtuvo para la cantidad de 0,625g con aproximadamente 23% de remoción. Los resultados se presentan en la gráfica 8.

**Grafica 8.** Capacidad de adsorción (porcentaje) biocarbón 1 por cada cantidad de biocarbón



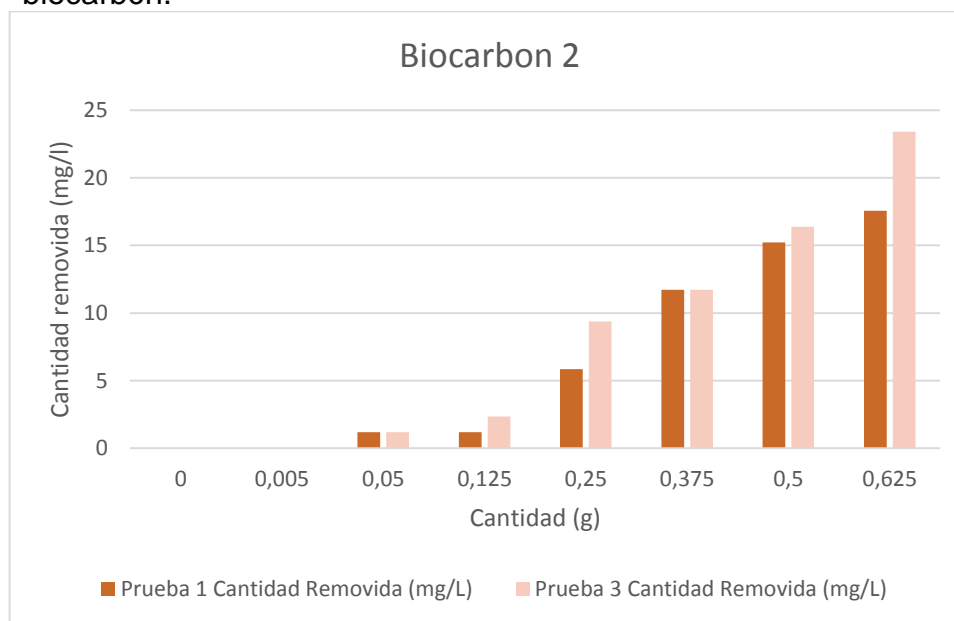
- **Biocarbón 2.** De igual forma como se realizó para el biocarbón 1 se determinaron las capacidades de adsorción de las 8 cantidades de biocarbón evaluadas en las dos pruebas (1 ensayo y 1 repetición) con el fin de obtener las isothermas de Langmuir y Freundlich y también para poder determinar el comportamiento del proceso de adsorción al variar las cantidades de biocarbón bajo una misma concentración de solución con cloruros. Los resultados obtenidos para las dos pruebas con respecto al biocarbón 2 se muestran en la tabla 29 donde la concentración y remoción de cloruros fueron determinados de igual forma como se explica en el biocarbón 1.

**Tabla 29.** Porcentaje de reducción de cloruros por cantidad de Biocarbón 2 en las dos pruebas

Cantidad (g)	Prueba 1		Prueba 2	
	Concentración equilibrio (mg/l)	Cantidad Removida (mg/l)	Concentración equilibrio (mg/l)	Cantidad Removida (mg/l)
0	111,22	0	113,56	0
0,005	111,22	0	113,56	0
0,05	110,05	1,17	112,39	1,17
0,125	110,05	1,17	111,22	2,34
0,25	105,37	5,85	104,20	9,37
0,375	99,51	11,71	101,85	11,71
0,5	96	15,22	97,17	16,39
0,625	93,66	17,56	90,15	23,41

De igual forma gráficamente se identificó de forma más asertiva la tendencia del comportamiento del biocarbón en el proceso de adsorción frente a cambios en la cantidad del mismo en la muestra o solución de adsorbato. El comportamiento presentado se situó dentro de lo esperado, ya que de igual forma al aumentar la cantidad del biocarbón aumentó la cantidad de cloruros adsorbida o retirada de la solución. La tendencia del comportamiento de este biocarbón en la adsorción se puede observar en la Gráfica 9.

**Grafica 9.** Capacidad de adsorción biocarbón 1 por cada cantidad de biocarbón.

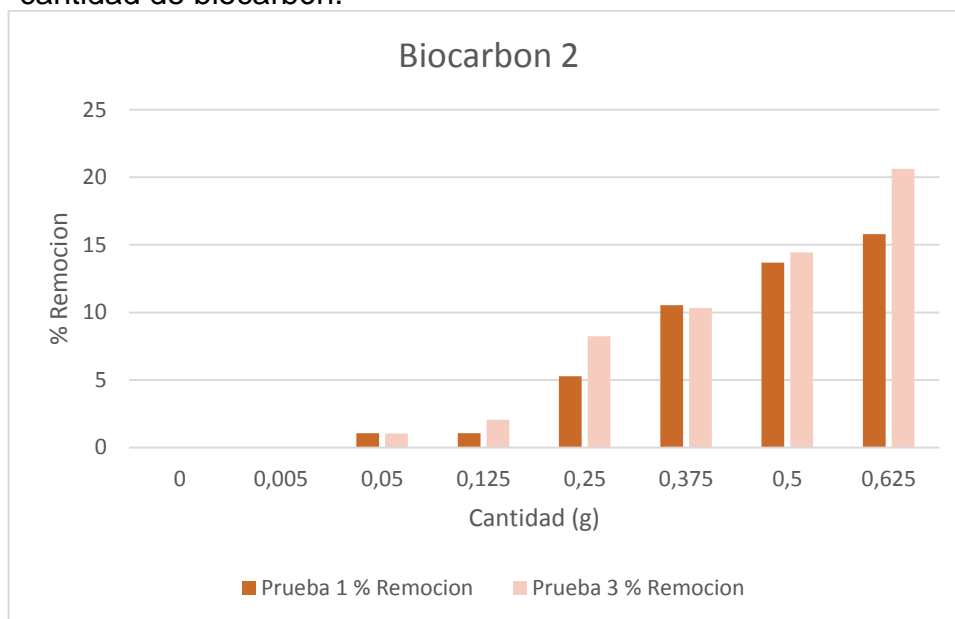


La capacidad de adsorción porcentual del biocarbón 2 se presenta en la tabla 30, pudiéndose alcanzar un máximo de aproximadamente 21% de remoción, durante las dos pruebas, para la cantidad más alta de biocarbón evaluada (0,625g). Los resultados se observan en la gráfica 10.

**Tabla 30.** Porcentaje de reducción de cloruros por cantidad de Biocarbón 2 en las dos pruebas

Cantidad (g)	Prueba 1		Prueba 2	
	Concentración equilibrio (mg/l)	% Remoción	Concentración equilibrio (mg/l)	% Remoción
0	111,22	0	113,56	0
0,005	111,22	0	113,56	0
0,05	110,05	1,05	112,39	1,03
0,125	110,05	1,05	111,22	2,06
0,25	105,37	5,26	104,20	8,25
0,375	99,51	10,53	101,85	10,31
0,5	96	13,68	97,17	14,43
0,625	93,66	15,79	90,15	20,62

**Grafica 10.** Capacidad de adsorción (porcentaje) biocarbón 2 por cada cantidad de biocarbón.



**4.2.2.2 Isoterma de Langmuir.** La isoterma de Langmuir describe cuantitativamente la formación de una monocapa de adsorbato sobre la superficie externa del adsorbente, donde posterior a esto no se realiza más el proceso de adsorción, Por lo tanto, la isoterma de Langmuir representa la distribución de equilibrio de los iones metálicos entre las fases sólida y líquida<sup>105</sup>. La isoterma de Langmuir toma como supuestos la cantidad finitas de sitios activos del adsorbente, energías uniformes de adsorción en la superficie y no hay transmigración de adsorbato en el plano de la superficie. La ecuación linealizada queda de la siguiente manera:

**Ecuación 3.** Ecuación linealizada dela isoterma de Langmuir

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{Q_0} C_e + \frac{1}{Q_0 b} \quad (2)$$

Donde:

Q<sub>0</sub>: Constante de adsorción 1- Máxima capacidad de adsorción de la monocapa (mg/g)

b: Constante de adsorción 2- Velocidad de adsorción

Se realizaron las isotermas de Langmuir con base en la ecuación (2) conociendo tanto las concentraciones en equilibrio (C<sub>e</sub>) como las concentraciones del adsorbato en el biocarbón en estado de equilibrio (q<sub>e</sub>) donde 'q<sub>e</sub>' fue calculado según la fórmula que se muestra en el anexo C.

Los resultados obtenidos para cada una de las pruebas se muestran a continuación, además las respectivas graficas con la ecuación del gráfico y su respectiva correlación R<sup>2</sup>.

- **Biocarbón 1**

**Prueba 1:**

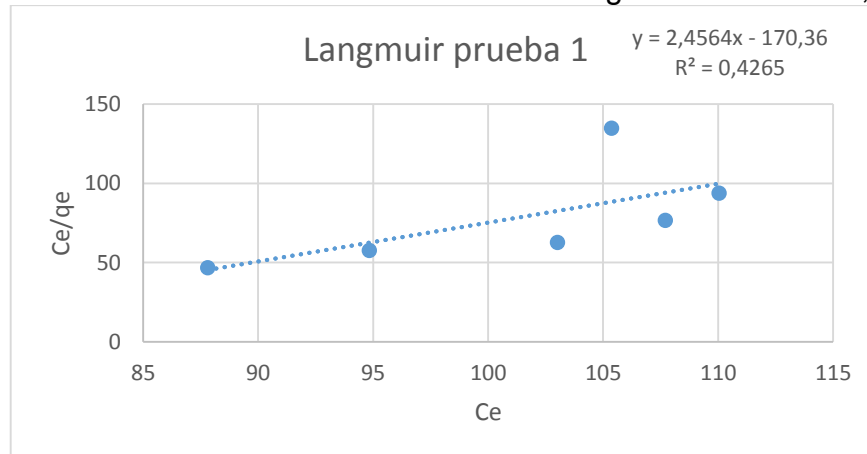
**Tabla 31.** Parámetros isoterma de Langmuir para el biocarbón 1, prueba 1

Cantidad de biocarbón	q <sub>e</sub>	C <sub>e</sub>	C <sub>e</sub> /q <sub>e</sub>
0	/	111,22	/
0,005	0	111,22	/
0,05	1,17	110,05	94
0,125	1,40	107,71	76,67

<sup>105</sup> DADA, A. O., et al. Langmuir, Freundlich, Temkin and Dubinin–Radushkevich isotherms studies of equilibrium sorption of Zn<sup>2+</sup> unto phosphoric acid modified rice husk. En: IOSR Journal of Applied Chemistry. vol. 3, no. 1, p. 38-45

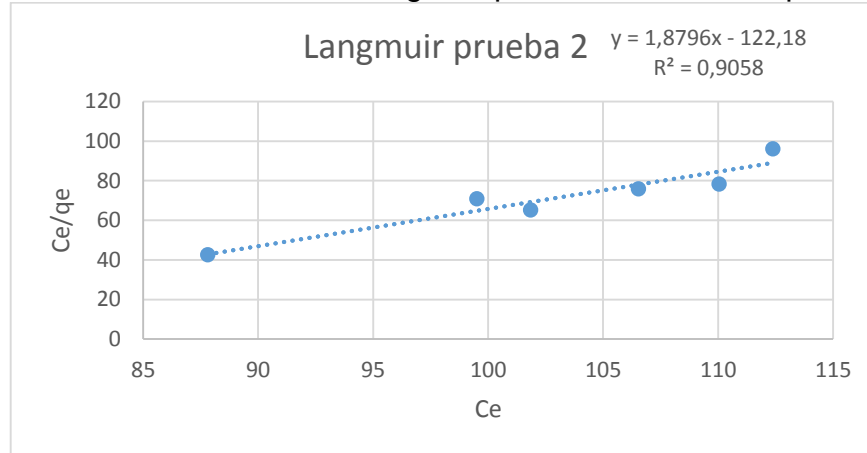
**Tabla 31.** (Continuación)

Cantidad de biocarbón	qe	Ce	Ce/qe
0,25	1,64	103,03	62,86
0,375	0,78	105,37	135
0,5	1,64	94,83	57,86
0,625	1,87	87,81	46,87

**Grafica 11.** Resultados constantes de Langmuir biocarbón 1, prueba 1.**Prueba 2:****Tabla 32.** Parámetros isoterma de Langmuir para el biocarbón 1, prueba 2

Cantidad de biocarbón	Qe	Ce	Ce/qe
0	/	113,56	/
0,005	0	113,56	/
0,05	1,17	112,39	96
0,125	1,40	110,05	78,33
0,25	1,40	106,54	75,83
0,375	1,56	101,85	65,25
0,5	1,40	99,51	70,83
0,625	2,06	87,81	42,61

**Grafica 12.** Isoterma de Langmuir para el biocarbón 1, prueba 2.

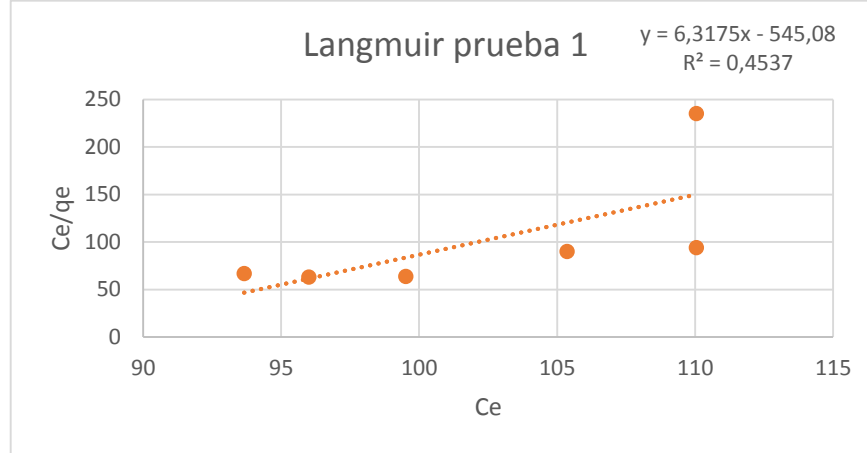


• **Biocarbón 2**  
**Prueba 1:**

**Tabla 33.** Parámetros isoterma de Langmuir para el biocarbón 2, prueba 1

Cantidad de biocarbón	qe	Ce	Ce/qe
0	/	111,22	/
0,005	0	111,22	/
0,05	1,17	110,05	94
0,125	0,47	110,05	235
0,25	1,17	105,37	90
0,375	1,56	99,51	63,75
0,5	1,52	96	63,08
0,625	1,40	93,66	66,67

**Grafica 13.** Isoterma de Langmuir para el biocarbón 2, prueba 1



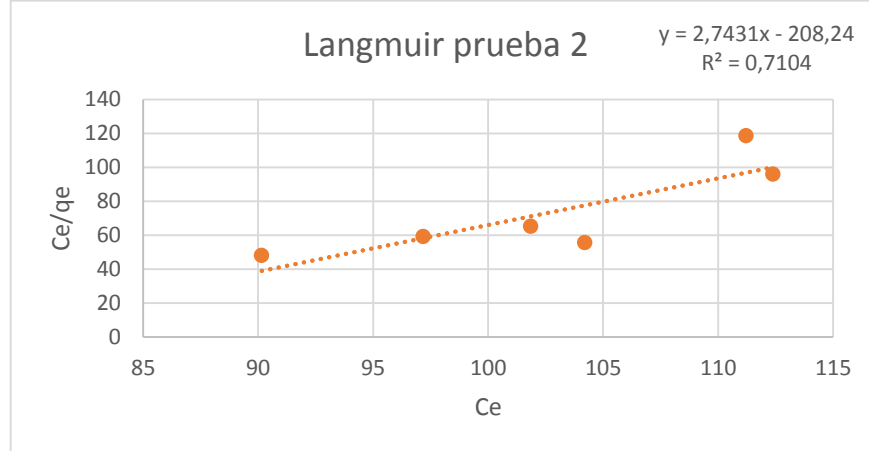
**Repetición 2:**

**Tabla 34.** Parámetros isoterma de Langmuir para el biocarbón 2, prueba 2

Cantidad de biocarbón	qe	Ce	Ce/qe
0	/	113,56	/
0,005	0	113,56	/
0,05	1,17	112,39	96
0,125	0,94	111,22	118,75
0,25	1,87	104,20	55,62
0,375	1,56	101,85	65,25
0,5	1,64	97,17	59,29
0,625	1,87	90,15	48,12



**Grafica 14.** Isoterma de Langmuir para el biocarbón 2, prueba 2



**4.2.2.3 Isoterma de Freundlich.** Esta isoterma se usa comúnmente para describir las características de adsorción para una superficie heterogénea<sup>106</sup>. La forma linealizada viene dada por la ecuación 4:

**Ecuación 4.** Ecuación linealizada de Freundlich.

$$\boxed{\text{Log}(qe) = \left(\frac{1}{n}\right) \text{Log} Ce + \text{Log} Kf} \quad (4)$$

Donde:

Kf: Constante isoterma de Freundlich (mg/g)

n: Estimativo del proceso de adsorción. Ver anexo E.

Los resultados obtenidos para cada una de las repeticiones se muestran a continuación, además las respectivas graficas con la ecuación del gráfico y su respectiva correlación  $R^2$ .

- **Biocarbón 1**

**Prueba 1:**

**Tabla 35.** Parámetros isoterma de Freundlich para el biocarbón 1, prueba 1

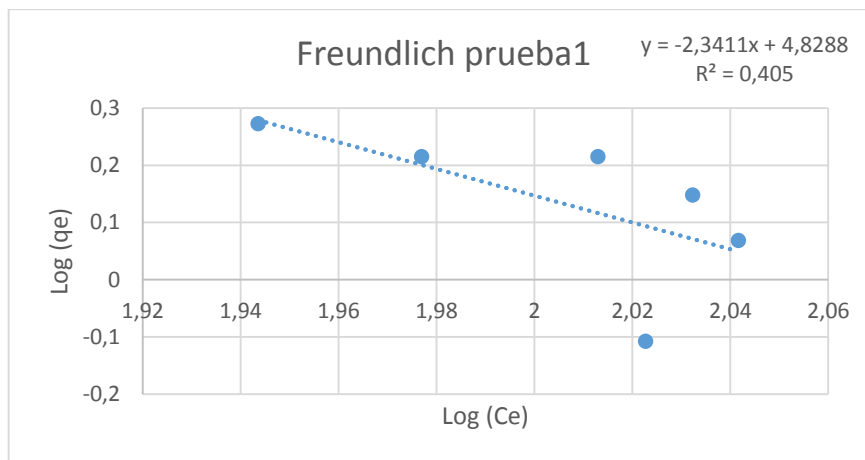
Cantidad de biocarbón	Qe	Log qe	Log Ce
0	/	/	2,05
0,005	0	/	2,046

<sup>106</sup> DADA, A. O., et al. Langmuir, Freundlich, Temkin and Dubinin–Radushkevich isotherms studies of equilibrium sorption of Zn<sup>2+</sup> into phosphoric acid modified rice husk. En: IOSR Journal of Applied Chemistry. vol. 3, no. 1, p. 38-45

**Tabla 35.** (Continuación)

Cantidad de biocarbón	Qe	Log qe	Log Ce
0,05	1,17	0,068	2,041
0,125	1,40	0,15	2,032
0,25	1,64	0,21	2,013
0,375	0,78	-0,11	2,023
0,5	1,64	0,21	1,98
0,625	1,87	0,27	1,94

**Grafica 15.** Isoterma de Freundlich para el biocarbón 1, prueba 1

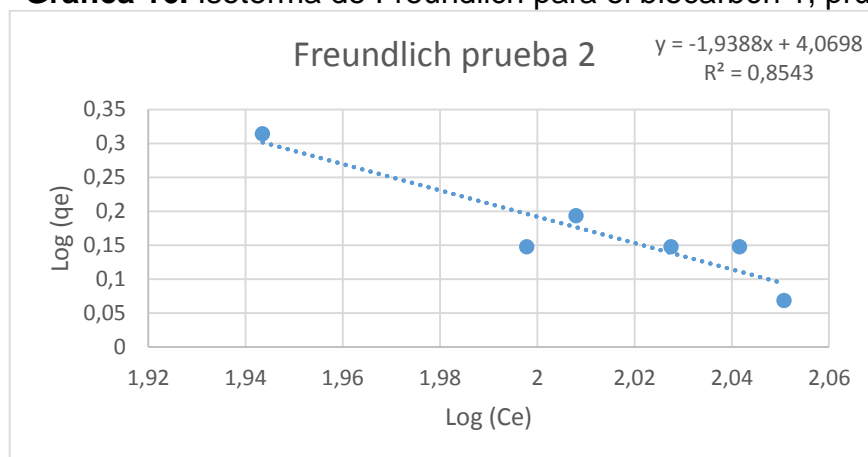


## Prueba 2

**Tabla 36.** Parámetros isoterma de Freundlich para el biocarbón 1, prueba 2

Cantidad de biocarbón	qe	Log qe	Log Ce
0	/	/	2,055
0,005	0	/	2,055
0,05	1,17	0,068	2,055
0,125	1,40	0,15	2,041
0,25	1,40	0,15	2,027
0,375	1,56	0,19	2,0079
0,5	1,40	0,15	2
0,625	2,06	0,31	1,94

**Grafica 16.** Isoterma de Freundlich para el biocarbón 1, prueba 2



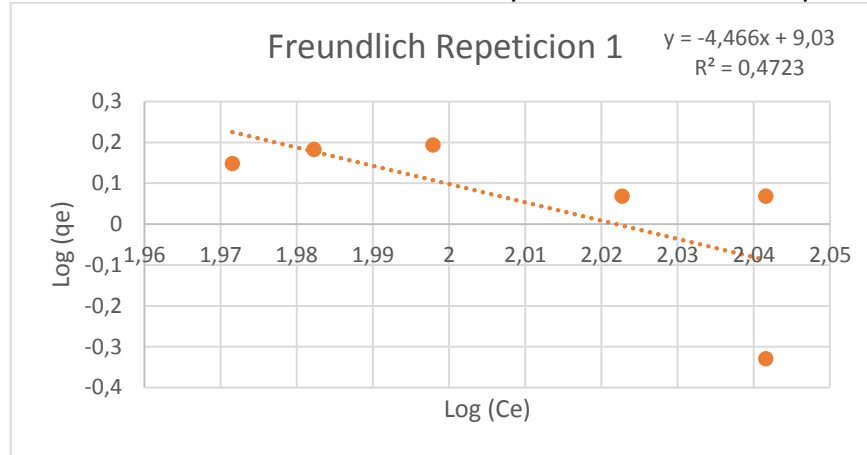
- **Biocarbón 2**

**Prueba 1:**

**Tabla 37.** Parámetros isoterma de Freundlich para el biocarbón 2, prueba 1

Cantidad de biocarbón	qe	Log qe	Log Ce
0	/	/	2,046
0,005	0	/	2,046
0,05	1,17	0,068	2,041
0,125	0,47	-0,33	2,041
0,25	1,17	0,068	2,022
0,375	1,56	0,19	2
0,5	1,52	0,18	1,98
0,625	1,40	0,15	1,97

**Grafica 17.** Isoterma de Freundlich para el biocarbón 2, prueba 1

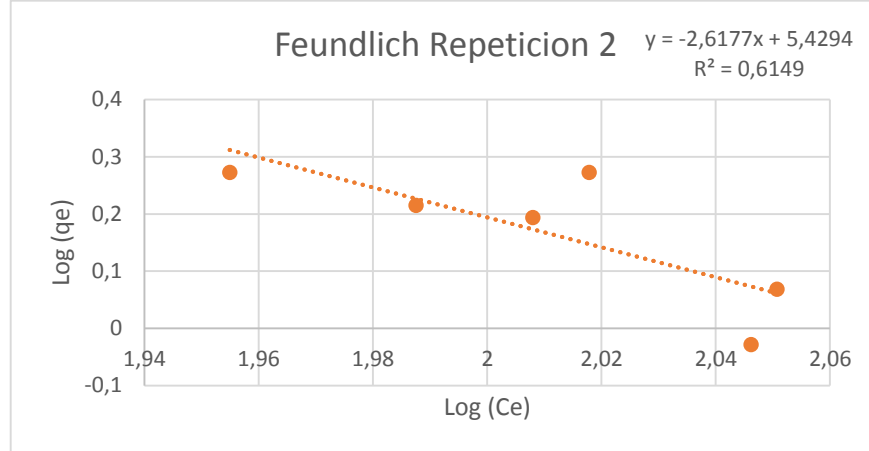


**Prueba 2:**

**Tabla 38.** Parámetros isoterma de Freundlich para el biocarbón 2, prueba 2

Cantidad de biocarbón	Qe	Log qe	Log Ce
0	/	/	2,05
0,005	0	/	2,05
0,05	1,17	0,068	2,05
0,125	0,94	-0,028	2,046
0,25	1,87	0,27	2,018
0,375	1,56	0,19	2,008
0,5	1,64	0,21	1,99
0,625	1,87	0,27	1,95

**Grafica 18.** Isoterma de Freundlich para el biocarbón 2, prueba 2



**4.2.2.4 Interpretación de resultados.** Para la interpretación de los resultados es importante tener en cuenta que solamente las isothermas de Langmuir y Freundlich fueron evaluadas para el proceso de adsorción de los iones cloruros en el biocarbones a base de cuesco (pirolizado) obtenido del proceso de extracción de aceite de palma. Como se mencionó durante el desarrollo del capítulo, los biocarbones fueron obtenidos en procesos de pirolisis distintos variando su temperatura y activándose de la misma forma para poder determinar la influencia directa de la temperatura de pirolisis en el proceso de adsorción. El fin de encontrar las dos isothermas que moldeaban el comportamiento era a su vez poder determinar la capacidad máxima de adsorción que podían tener los dos biocarbones para el caso particular de los cloruros.

Con el fin de evaluar el tratamiento de la reducción de los iones cloruros por medio del biocarbón se realizaron las pruebas de variación de dosis de adsorbente obteniéndose los resultados, descritos previamente en el capítulo, expresados de forma gráfica siguiendo la forma de linealizada tanto de Freundlich como de Langmuir. En ninguna de las ocho graficas calculadas (4 Langmuir y 4 Freundlich) se obtuvo un coeficiente de correlación ( $R^2$ ) cercano o igual a 1 (línea recta) lo que indica que no hay linealidad en los datos, siendo así que el valor más cercano se presentó en la gráfica 12 obtenido para la segunda repetición del biocarbón 1 y bajo el modelo de Langmuir con un  $R^2$  de 0,9058, valor que igualmente no podría ser tenido en cuenta para el cálculo de las constantes puesto que estrictamente las isothermas trabajan con líneas rectas y su cálculo, bien puede arrojar valores que moldearían una ecuación sin sentido físico alguno. Un ejemplo de este fenómeno se puede observar en el anexo E donde se presentan los resultados de las constantes calculadas sin tener en cuenta el principio de linealidad de las isothermas.

Al realizar las isothermas de Langmuir y Freundlich se deduce que no se ajustó a ninguna de estas, por lo que no se puede explicar el comportamiento del proceso de adsorción que se lleva a cabo en la superficie del biocarbón, siendo así que

teniendo en cuenta los principios de cada una de las isothermas donde en el caso de Langmuir se asume la formación de una monocapa sobre la superficie y en el caso de Freundlich la adsorción sobre superficies heterogéneas<sup>107</sup>, se llegó a la conclusión que el sistema de adsorción del biocarbón no se rige bajo ninguna de estas dos condiciones, tomando en cuenta también posibles factores de desorción debido a que el tiempo de exposición en agitación fue mayor al tiempo preliminar calculado, siendo así que comúnmente los principales componentes de los errores experimentales son sistemáticos y existe la posibilidad de que varíen de un experimento a otro<sup>108</sup>.

Los factores de error dentro de la obtención de las isothermas fueron atribuidos en primera instancia principalmente a errores humanos de la medición o errores sistemáticos, como se mencionó anteriormente, debido a que el método argentométrico para la determinación de cloruros requiere de alta precisión en la titulación y en este caso no se contaba con un titulador automático; por lo que se existe la posibilidad de que se hubieran presentado errores en la apreciación visual del valor exacto en la bureta produciendo un error que se pudo haber repetido en cada una de las pruebas. Como segundo factor se asumió la posible degradación del nitrato de plata (titulante) utilizado durante las argentometrías, debido a que este es un compuesto fotosensible que, a causa de los grandes intervalos de tiempo entre las titulaciones y su largo almacenamiento, pudieron haber generado la degradación del mismo. No se puede descartar la posible presencia de impurezas en los materiales usados durante la experimentación, adicionando que la agitación se realizó en un Erlenmeyer sin tapa. De igual forma se puede tomar como un factor de error la posible desorción del biocarbón durante el proceso de agitación debido al tiempo de agitación como se mencionó anteriormente y también a que no se cuenta con información de la estabilidad del ion cloruro sobre la superficie del biocarbón.

Se encuentran errores instrumentales tales como la calibración de los instrumentos como balanzas. El biocarbón se pudo haber contaminado debido a que entro en contacto con otros recipientes que podían contener impurezas.

Así mismo aunque los biocarbones no se ajustaron a ninguno de los modelos de isothermas evaluados, si se pudo determinar que hay capacidad de adsorción, que aunque es muy baja, logró alcanzar cerca de un 23 % de remoción para el biocarbón 1 y de 21% para el biocarbón 2. Este comportamiento se puede explicar teniendo en cuenta experimentos previos sobre biocarbones en los cuales la capacidad de

---

<sup>107</sup> DADA, A. O., et al. Langmuir, Freundlich, Temkin and Dubinin–Radushkevich isotherms studies of equilibrium sorption of Zn<sup>2+</sup> onto phosphoric acid modified rice husk. En: IOSR Journal of Applied Chemistry. vol. 3, no. 1, p. 38-45

<sup>108</sup> VRHEGYI, Gbor, et al. Kinetics of the thermal decomposition of cellulose in sealed vessels at elevated pressures. Effects of the presence of water on the reaction mechanism. En: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. vol. 26, no. 3, p. 159-174

adsorción de ciertos compuestos aromáticos aumentó conforme aumentaba la temperatura de pirolisis del biocarbón<sup>109</sup>, lo cual según la temperatura de pirolisis de ambos biocarbones debía permitir mayor capacidad de adsorción al número uno tal cual como fue comprobado. Bajo estos resultados fue seleccionado el biocarbón 1 como el precursor de posibles nuevas investigaciones debido a que su capacidad de adsorción sigue siendo muy baja.

---

<sup>109</sup> CHEN, Baoliang; ZHOU, Dandan y ZHU, Lizhong. Transitional adsorption and partition of nonpolar and polar aromatic contaminants by biochars of pine needles with different pyrolytic temperatures. En: Environmental Science & Technology. vol. 42, no. 14, p. 5137-5143

## 5. DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS

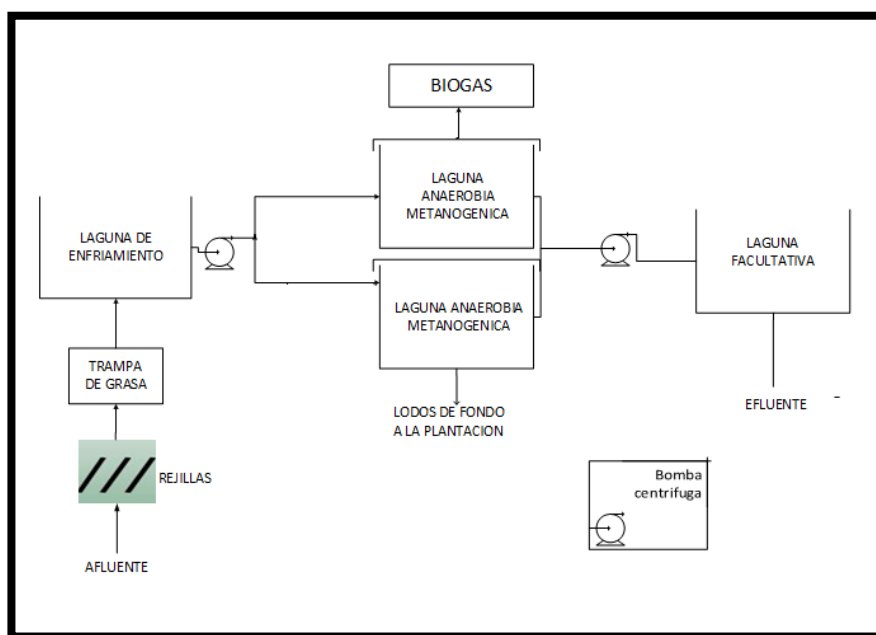
A partir de la alternativa seleccionada en el capítulo 3 (alternativa 1) y dadas las condiciones de la empresa CI SIGRA S.A quienes tienen destinado para la planta de tratamiento de aguas residuales 3 hectáreas, por lo tanto se procederá a realizar el debido dimensionamiento de los equipos.

Las operaciones unitarias que se realizarán secuencialmente para lograr el tratamiento de aguas son una separación de materiales gruesos (rejillas), después una recuperación de aceite, seguida de una estabilización, después de unas lagunas anaerobias metanogénicas, posteriormente una laguna facultativa. El diseño de este tratamiento se basará en el boletín técnico número 11 de Cenipalma.<sup>110</sup>

### 5.1 DIAGRAMA DE EQUIPOS

En la figura 34 se muestra el diagrama de flujo del tratamiento de aguas para la planta extractora de aceite de palma.

**Figura 34.** Diagrama de flujo tratamiento de agua residual



<sup>110</sup> GARCIA NUÑES, Jesús. Manejo de efluentes de plantas extractoras: Diseño de lagunas de estabilización. Colombia. Cenipalma, 1997. 35p. (Boletín técnico: No. 11).



## 5.2 REJILLA

El objetivo que tienen las rejillas dentro del tratamiento de aguas es retener el material grueso como frutos, palos y basuras entre otros, con el fin de proteger las bombas además de evitar acumulaciones en los siguientes procesos.

Las rejillas típicas que van a la entrada del tanque florentino serán instaladas en un canal de 0.80 m debido al caudal que se maneja de 720 m<sup>3</sup>/día. Estas rejillas son de limpieza manual, tienen típicamente inclinaciones de 45 a 60 grados con respecto a la horizontal<sup>111</sup>, para poder facilitar la limpieza, para este tipo de afluente se usan rejillas de 45°, con una separación entre las barras de 1,25 cm, estas barras tienen un espesor de 1,27 cm. Por lo tanto el número de barras que se necesitan se expresa en la ecuación 5:

### Ecuación 5. Calculo del número de barras

$$n = \frac{W - C}{C + d_b}$$

Dónde:

C= Apertura entre las barras (m)

W= ancho del canal (m)

n= número de espacios

d<sub>b</sub> = espesor de la barra (m)

$$n = \frac{0.8 - 0.0125}{0.0125 + 0.0127} = 31$$

Por lo tanto se necesitaran 31 barras, el material de las rejillas es de acero<sup>112</sup>.

## 5.3 TRAMPA DE GRASA

El fin de tener una trampa de grasa o tanque florentino durante el proceso es retener materiales más pequeños como piedras o arenillas y en general partículas sedimentables, además de recuperar aceite que puede ser enviado de nuevo al proceso. El diseño de este es parecido a la trampa de grasa por lo cual, lo primero que hay que tener en cuenta que el tiempo de retención hidráulica (TRH) es decir el tiempo que el afluente estará dentro del tanque por lo general estos tratamientos es de 2 días. Así pues el volumen del tanque está determinado por la ecuación 6.

### Ecuación 6. Volumen de la trampa de grasa

---

<sup>111</sup>COMISION NACIONAL DE AGUAS. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: pretratamiento y tratamiento primario. México. 2 p. ISBN 978-607-626-008-1

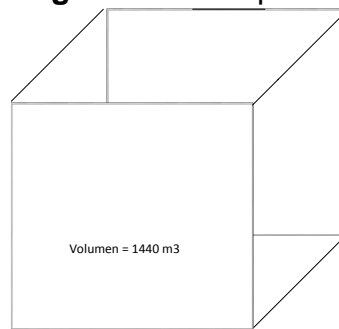
<sup>112</sup> Ibíd., p. 2.

$$V = TRH * Q$$

Por lo tanto:

$$V = 2 \text{ dias} * 720 \frac{m^3}{\text{dia}} = 1440 m^3$$

**Figura 35.** Trampa de grasa



#### 5.4 LAGUNA DE ENFRIAMIENTO

El objetivo de agregar esta laguna es de enfriar, desaceitar e igualar (ecualizar) los flujos. Se debe realizar el enfriamiento ya que el afluente sale a alta temperatura (70°C y debe llegar a unos 40°C) y para que funcione el tratamiento posterior es necesario regular la temperatura asegurando las condiciones adecuadas para el crecimiento de los microorganismos. Además sobre la superficie se forma un aceite ácido, por lo tanto por medio de esta laguna se puede lograr recuperar este aceite que puede ser usado en otras industrias como lo es la del jabón; la clave de esta laguna es el tiempo de retención hidráulica que por lo general son entre 2 y 3 días. Para su dimensionamiento se tiene en cuenta el volumen que está determinado por la ecuación 6:

$$V = TRH * Q$$

El tiempo de retención hidráulica se escoge entre un promedio entre 2 y 3 que son los días recomendados, por lo tanto el TRH es de 2.5 días.

$$V = 2.5 \text{ dia} * 720 \frac{m^3}{\text{dia}} = 1800 m^3$$

La profundidad (hp) que se adopta para este tipo de lagunas es de 1.4 m, esta es necesaria para calcular el área de la laguna, como se muestra en la ecuación 7.

**Ecuación 7.** Área de la laguna

$$Area = \frac{V}{hp}$$

Por lo tanto el área necesaria para la laguna es de:

$$Area = \frac{1800m^3}{1.4 m} = 1286m^2$$

Las lagunas pueden ser rectangulares o cuadradas con una relación largo-ancho 3:1 y 4:1<sup>113</sup>. Para este volumen se utilizara una relación 3:1, por lo tanto:

Largo: 33 m

Ancho: 11 m

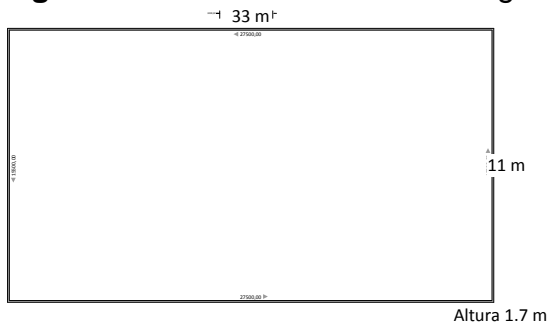
Borde libre: 0,30 m (teniendo en cuenta que se pueden presentar precipitaciones o factores externos que aumenten el volumen del agua)

Altura total: 1,7 m

Las dimensiones finales se pueden apreciar en la figura 36.

Para la recuperación de aceite ácido se hacen fosos en la orilla de la laguna de 1 m de ancho x 2 m de largo y con una profundidad de 0,7 m, para que de esta manera que el nivel del agua coincida con la del foso. Cuando se quiera recuperar el aceite se cierra la salida de la laguna para aumentar el nivel del agua de la laguna y que la capa de aceite se desborde por los fosos, después este se recupera en los fosos y se extrae por bombas de succión, para que puedan ser almacenados en tanques.

**Figura 36.** Medidas finales de la laguna de enfriamiento



## 5.5 LAGUNAS ANAEROBIAS

Con el tratamiento anaerobio se considera que ocurren los procesos básicos de la descomposición anaerobia, es decir, desnitrificación de nitratos, respiración de sulfatos, hidrólisis y fermentación metanogénica.<sup>114</sup>

Se seleccionan lagunas anaerobias metanogénicas, estas consisten en que se pueden acondicionar para procesar metano, ya que de este proceso se libera

<sup>113</sup> TCHOBANOGLIOUS, George. Sistema de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados. Bogotá: McGraw-Hill interamericana s.a, 2000. 549 p. ISBN 9584100416

<sup>114</sup> ROMERO, Jairo. Tratamiento de aguas residuales teoría y principios de diseño. Bogotá: Escuela colombiana de ingeniería, 2004. 233 p. ISBN 9588060133.

metano (60-70%) y dióxido de carbono (30-40%), para que estos gases no sean liberados a la atmosfera y además generen mayor contaminación estas lagunas se pueden carpar con plástico de polietileno de alta densidad<sup>115</sup>, para capturar el metano y producir biogás y ser usado como energía en otros procesos o incluso para venderlo. La estabilización o remoción biológica anaerobia de DBO ocurre en la etapa de formación de metano.<sup>116</sup>

Para que haya una mayor flexibilidad en la operación del sistema se escogen dos lagunas metanogénicas en paralelo y así el volumen se divide en estas dos.

Para el diseño de estas primero hay que saber cuál es la carga orgánica del efluente proveniente de la laguna de enfriamiento, esta viene dada por la ecuación 8.

**Ecuación 8.** Cálculo de la carga orgánica

$$CO = DQO * Q$$

El DQO de este efluente es de 55 kg/m<sup>3</sup>, por consiguiente la carga orgánica es de:

$$CO = 55 \frac{kg}{m^3} * 720 \frac{m^3}{dia} = 40150 \frac{kg}{dia}$$

Es importante tener la carga orgánica volumétrica (COV) y es necesaria ya que esta es la relación con el tiempo de retención. En Colombia la COV máxima de las lagunas anaerobias metanogénicas es de 5 kg DQO/m<sup>3</sup>-dia. Para los diseños de las lagunas se trabaja con un porcentaje entre 0,60 y 0,80 de la COV máxima. Para el caso de este proyecto se plantea el peor escenario por lo tanto se escoge el 0,80 de la COV máxima, por consiguiente la COV es de 4 kg DQO/m<sup>3</sup>-dia. Con lo anterior ya se puede calcular el volumen de las lagunas con la ecuación 9:

**Ecuación 9.** Calculo del volumen necesario para laguna anaeróbica.

$$V = \frac{CO}{COV} = \frac{40150 \frac{kg}{dia}}{4 \frac{kg}{m^3 dia}} = 10037.5 m^3$$

El volumen necesario es de 10038 m<sup>3</sup> pero como se usaran dos lagunas para aumentar la eficiencia del proceso cada laguna es de un volumen útil de 5019 m<sup>3</sup>.

<sup>115</sup> ALTHAUSEN, Markus. Tratamiento de efluentes de la planta de beneficio- convertir un residuo en un recurso. En: Revista palmas. Vol. 37 No. Especial (2016). Pp 31-37 ISSN 0121- 2923

<sup>116</sup> ROMERO, Jairo. Tratamiento de aguas residuales teoría y principios de diseño. Bogotá: Escuela colombiana de ingeniería, 2004. 237 p. ISBN 9588060133

Ahora es necesario saber el tiempo de retención hidráulica para las lagunas, a partir de la ecuación 10.

**Ecuación 10.** Tiempo de retención hidráulica para lagunas anaerobias.

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

Por lo general se mencionan tiempos de retención de 2 a 20 días, con pH de 6.8 a 7.4 <sup>117</sup>. Así pues que el tiempo de retención hidráulica entre las dos lagunas es de:

$$TRH = \frac{10038 \text{ m}^3}{720 \text{ m}^3} = 13,94 \text{ dias}$$

Para las lagunas anaerobias se construyen con unas alturas útiles entre 2 y 4 m siendo el valor más utilizado normalmente el de los 3 m<sup>118</sup>, una altura inferior a esta se comportaría como una laguna aerobia.

Así pues se usará una profundidad (hp) de 3m y el área de cada laguna metanogénica se calcula con la ecuación 11:

**Ecuación 11.** Área de cada laguna

$$A = \frac{V}{hp} = \frac{5019 \text{ m}^3}{3 \text{ m}} = 1673 \text{ m}^2$$

La relación largo-ancho de estas lagunas es de 6:1 por lo tanto:

Ancho= 17 m

Largo = 102 m

Y como para todas las lagunas hay que dejar un borde libre de 0,30 m teniendo en cuenta que se pueden presentar épocas de lluvia.

Para una altura total de 3,3 m. Las dimensiones finales se pueden apreciar en la figura 37. Y se calcula el volumen final a través de la ecuación 12.

**Ecuación 12.** Volumen final de cada laguna.

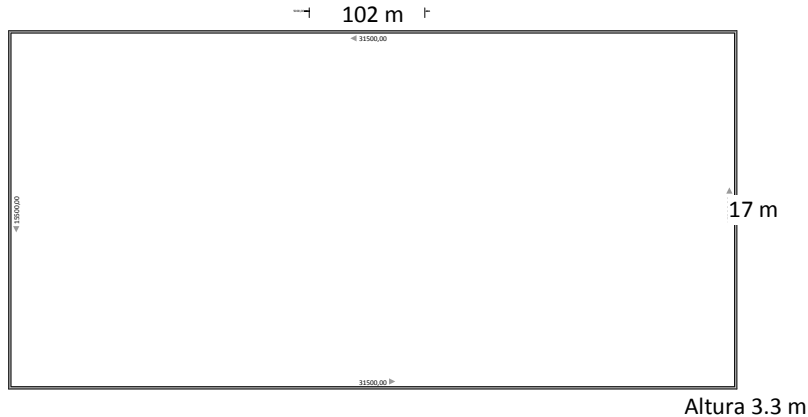
---

<sup>117</sup> ROMERO, Jairo. Tratamiento de aguas residuales teoría y principios de diseño. Bogotá: Escuela colombiana de ingeniería, 2004. 238p. ISBN 9588060133.

<sup>118</sup> FERRER, José. Tratamientos biológicos de aguas residuales. España: Universidad Politécnica de Valencia, 2003. 145 p. ISBN 9788497054669.

$$\text{Volumen final de cada laguna} = 17\text{m} * 102\text{m} * 3.3\text{m} = 5722\text{m}^3$$

**Figura 37.** Dimensiones finales de la laguna anaerobia



Para calcular la DQO de salida de las lagunas primero se debe saber la carga orgánica del efluente, la ecuación viene dada por la ecuación 13

**Ecuación 13.** Calculo de la carga orgánica del efluente

$$CO \text{ efluente} = \text{carga aplicada} (1 - \text{eficiencia})$$

Para la eficiencia este proceso tiene una eficiencia entre el 90% y hasta el 95% de remoción de materia orgánica, para efectos prácticos se tomara un promedio entre estos dos, por consiguiente la eficiencia se tomara de 0.9.

$$CO \text{ efluente} = 40150 \frac{\text{kg}}{\text{dia}} * (1 - 0.9) = 4015 \frac{\text{kg}}{\text{dia}}$$

La concentración de DQO a la salida viene dada por la ecuación 14.

**Ecuación 14.** Calculo de la DQO de salida.

$$[DQO \text{ a la salida}] = \frac{CO \text{ efluente}}{Q}$$

$$[DQO \text{ a la salida}] = \frac{4015 \frac{\text{kg DQO}}{\text{dia}}}{720 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}}} = 5,58 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 5580 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

$$[DQO \text{ a la salida}] = 5580 \text{ mg/l}$$

En la laguna anaerobia también se retira DBO en los procesos típicos tiene una remoción de 80-90%.<sup>119</sup>

Planteando el peor escenario que solo remueva el 80%, según la caracterización la concentración de DBO es de 25000 mg/l. la concentración de DBO final sería de:

$$\text{Concentracion final de DBO} = (25000 - 20000) \text{ mg/l} = 5000 \text{ mg/l}$$

Para asegurar el correcto funcionamiento de este sistema de tratamiento debe haber un grupo de microorganismos que descompongan la materia orgánica presente. Las bacterias metanogénicas son semejantes a las encontradas en el estómago de animales rumiantes y en sedimentos de lagos y ríos; los géneros principales son *Methanobacterium*, *Methanococcus*, *Methanosarcina* y *Methanobacillus*.<sup>120</sup>

Debido a la facilidad de transportar el inóculo de otra planta que ya realice este proceso, es mucho más fácil que criar el inóculo, se dispone de transportar 500 m<sup>3</sup> de inóculo a la planta de Sigra.

- **Lodos de fondo.** Debido a la actividad metanogénica en la laguna anaerobia en el fondo se forma un lodo estabilizado, compuesto por células muertas; por consiguiente se debe prever un sistema para la retención de estos sólidos para que no se saturen las siguientes lagunas.<sup>121</sup> La evacuación de estos lodos se realiza desde el fondo de las lagunas por medio de un múltiple recolector. La tubería puede ser de 6" y las perforaciones de 1" espaciadas cada 20 cm.<sup>122</sup> Una de las ventajas del proceso anaerobio es su baja tasa de síntesis o bajo porcentaje de conversión de materia orgánica en células biológicas minimizando los problemas de disposición de lodos.<sup>123</sup> Se prevé un lugar (lechos de secado) donde estos pueden ser secados y luego llevados a la plantación. En los lechos de secado el agua se evapora y el sólido que queda ya puede ser usado como fertilizante en la plantación.

---

<sup>119</sup> ROMERO, Jairo. Tratamiento de aguas residuales teoría y principios de diseño. Bogotá: Escuela colombiana de ingeniería, 2004. 682 p. ISBN 9588060133.

<sup>120</sup> *Ibíd.*, p. 238.

<sup>121</sup> GARCIA NUÑES, Jesús. Manejo de efluentes de plantas extractoras: Arranque, operación y mantenimiento de lagunas de estabilización. Colombia. Cenipalma, 1996. 21p. (Boletín técnico: No. 10) ISBN 958-95000-3-X.

<sup>122</sup> GARCIA NUÑES, Jesús. Manejo de efluentes de plantas extractoras: Diseño de lagunas de estabilización. Colombia. Cenipalma, 1997. 42p. (Boletín técnico: No. 11).

<sup>123</sup> ROMERO, Jairo. Tratamiento de aguas residuales teoría y principios de diseño. Bogotá: Escuela colombiana de ingeniería, 2004. 243 p. ISBN 9588060133.

- **Biogás.** En la fermentación metanogénica, los microorganismos metanogénicos convierten los productos en CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> principalmente.<sup>124</sup>

La producción de biogás de los efluentes de las plantas extractoras de aceite de palma para generar energía ha sido explotada comercialmente.<sup>125</sup> Cada metro cubico de POME tiene un potencial entre 25 y 35 m<sup>3</sup> de biogás o 150-210 kWh.

<sup>126</sup>

Un beneficio de realizar el proyecto con biogás es que produce energía renovable y abono orgánico de manera permanente, lo que genera ingresos continuos y sostenibles, además de eliminar emisiones de gases efecto invernadero y generar malos olores al no tener las lagunas carpadas<sup>127</sup>.

La generación de biogás se hace por medio de la captura de biogás por medio de la cobertura de la laguna anaerobia, luego el biogás pasa por una batería de filtros de H<sub>2</sub>S y extracción de humedad antes de enviarlo a un motor de combustión interna readaptado para generar electricidad.<sup>128</sup>

El cálculo de la cantidad de biogás producido se muestra en el anexo I, teniendo en cuenta el metano que se produce y su capacidad calorífica.

## 5.6 LAGUNA FACULTATIVA

Una laguna facultativa es un estanque de 2m a 5m de profundidad. Son las más usadas ya que estas producen un buen efluente, requieren un control mínimo. El objetivo de instalar la laguna e disminuir el DBO.

CO= carga efluente laguna metanogénica

CO= 4015 kg/día

Se necesita la carga orgánica volumetría (COV) este dato de toma de la bibliografía es un dato experimental a nivel nacional.

COV= 0.5 kg DQO/m<sup>3</sup>-dia

Para poder determinar el volumen de la laguna se usa la ecuación 15.

---

<sup>124</sup> *Ibíd.*, p. 235.

<sup>125</sup> NGAN, Ma Ali. Innovaciones en el manejo del efluente de las plantas extractoras de aceite de palma. En: Revista Palmas. Vol. 21. No. 2 (2000)

<sup>126</sup> ALTHAUSEN, Markus. Tratamiento de efluentes de la planta de beneficio- convertir un residuo en un recurso. *En*: Revista palmas. Vol. 37 No. Especial (2016). P 32 ISSN 0121- 2923

<sup>127</sup> *Ibíd.*, p.36

<sup>128</sup> GARCIA NUÑEZ, Jesús. Tratamiento de efluentes de la planta de beneficio- convertir un residuo en un recurso. *En*: Revista palmas. Vol. 37 No. Especial (2016). P 99. ISSN 0121- 2923



**Ecuación 15.** Calculo del volumen de laguna facultativa.

$$V = \frac{CO}{COV}$$

Con la ecuación y los datos anteriores se dice que el volumen es de:

$$V = \frac{4015 \text{ kg/día}}{0.5 \text{ kg DQO/m}^3 \cdot \text{día}} = 8030 \text{ m}^3$$

Después de haber obtenido el volumen de la laguna facultativa 1, se determinara el tiempo de retención hidráulico necesario por medio de la ecuación 16.

**Ecuación 16.** Calculo del tiempo de retención hidráulico.

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

Para el volumen de 8030 m<sup>3</sup> se necesita un tiempo de retención hidráulica:

$$TRH = \frac{8030 \text{ m}^3}{720 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}} = 11 \text{ días}$$

La laguna facultativa es un estanque de 2m a 5m de profundidad<sup>129</sup>, para esta laguna se adopta una altura de 4m debido a la gran cantidad de volumen que se trabaja.

La relación largo/ancho es de 2. Por lo tanto:

Ancho: 45 m

Largo: 90 m

Altura: 4m

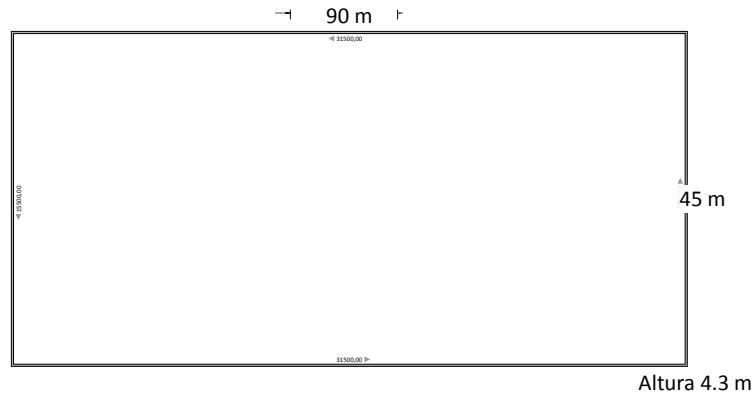
Borde libre 0.3m, para una altura total de 4.3 m. Las dimensiones se pueden observar en la figura 38.

Para un volumen total de 9315 m<sup>3</sup>.

---

<sup>129</sup> ROMERO, Jairo. Tratamiento de aguas residuales teoría y principios de diseño. Bogotá: Escuela colombiana de ingeniería, 2004. 527p. ISBN 9588060133.

**Figura 38.** Dimensiones finales de la laguna facultativa



Para calcular la concentración del DQO a la salida de la laguna facultativa es necesario conocer la carga del efluente, por medio de la ecuación 17.

**Ecuación 17.** Calculo de la carga del efluente

$$Carga\ efluente = carga\ aplicada\ (1 - eficiencia)$$

Para determinar la eficiencia del proceso solo el 75-80% del tejido celular puede ser oxidado<sup>130</sup>. Por lo tanto se plantea el peor de los casos en donde la eficiencia es del 75%. La carga aplicada es de 4015 kg/día.

$$Carga\ efluente = 4015\ kg/dia\ (1 - 0.75) = 1003.75\ kg\ DQO/dia$$

Para saber la DQO de salida del tratamiento de la laguna facultativa 1 se tiene la ecuación 18.

**Ecuación 18.** Calculo del DQO de salida.

$$[DQO\ a\ la\ salida] = \frac{Carga\ efluente}{Q}$$

---

<sup>130</sup> FERRER, José. Tratamientos biológicos de aguas residuales. España: Universidad politécnica de valencia, 2003. 103p. ISBN 9788497054669.

Por consiguiente la DQO de salida es de:

$$[DQO \text{ a la salida}] = \frac{1003.75 \text{ kg DQO} / \text{día}}{720 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}} = 1.394 \text{ kg DQO} / \text{m}^3 = 1394 \text{ mg} / \text{l}$$

Este último valor de DQO de 1394 mg/l estaría cumpliendo con la norma (resolución 631 de 2015) ya que el valor máximo permitido es de 1500 mg/l de DQO.

Se dice que después de este tratamiento la caracterización de las aguas de más de 30 plantas extractoras de Colombia se presenta en la tabla 39<sup>131</sup>, sin olvidar que el DQO final del efluentes para este caso es de 1394 mg/l, siendo menor que el promedio de las extractoras de Colombia, se podría suponer que los demás parámetros también se reducirían frente al promedio Nacional.

**Tabla 39.** Promedio de la caracterización después del tratamiento de aguas.

Parámetros	Promedio
DQO (mg/l)	1.688
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	500
Solidos Suspendidos (mg/l)	784
Solidos Sedimentables (mg/l)	2,60
Grasas y Aceites (mg/l)	31
Fósforo Total (P mg/l)	317
Nitrógeno Total (N mg/l)	192
Cloruros (Cl- mg/l)	919
Sulfatos (mg/l)	48
Fenoles (mg/l)	1,05
Plomo (mg/l)	0,16
Hidrocarburos Totales (mg/l)	12
Temperatura (°C)	30

Sin embargo, por la experimentación se concluyó que no se puede usar el biocarbón para la reducción de los cloruros, por lo tanto se propone usar otro tipo de carbón activado o utilizar osmosis inversa.

<sup>131</sup> GARCIA NUÑEZ, Jesús Alberto. Caracterizaciones después del tratamiento de aguas [correo electrónico]. Mensaje enviado a: Andrés Felipe PEREZ y Camila RIOS. 15 DE agosto de 2017. [citado en 10 de noviembre de 2017] Comunicación personal

- **Uso final del agua tratada.** Como el agua no cumple con todos los parámetros para ser vertida a un cuerpo de agua se opta por darle un uso a esta, se propone para el uso de la producción de compost.

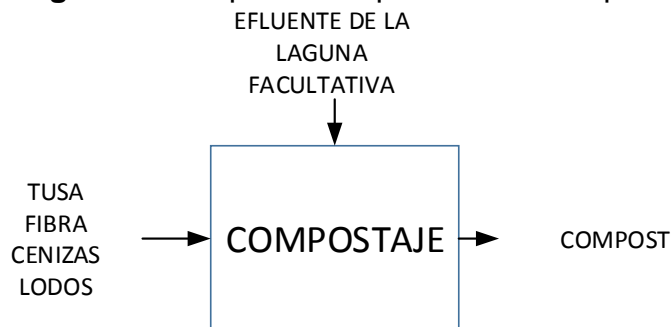
Una alternativa para usar este efluente final es en el compostaje, en la industria de palma de aceite el compostaje consiste en la construcción de pilas abierta, seguida de coberturas (invernaderos) que permiten mayor control del proceso.

Esta biomasa sólida (tusa, fibra, cenizas entre otros) que se dispone en pilas junto con los lodos de fondo de la laguna anaerobia y el efluente proveniente de la laguna facultativa se aplica a estas pilas en una proporción de 3,2 m<sup>3</sup> por cada tonelada de biomasa a ser compostada<sup>132</sup>, para alcanzar los niveles de temperatura y humedad requeridos por los procesos mesofílicos y termofílicos que se presentan en el proceso de degradación. Después de conformar las pilas de biomasa comienza la degradación biooxidativa, que se basa en alternar etapas mesotérmicas (30-40°C) con etapas termogénicas (40-75°C), donde las bacterias esporígenas y actinomicetos, junto con los microorganismos mesófilos y termófilos, descomponen las ceras, proteínas y hemicelulosas.<sup>133</sup>

De 2,5 a 3 meses después se obtiene el compost, que es rico en nutrientes y materia orgánica; que servirá como enmienda de suelos y complemento para la fertilización química del cultivo<sup>134</sup>. Se dice que por cada tonelada de racimo de fruto fresco que se procesa se genera aproximadamente 207 kg de compost<sup>135</sup>.

En la figura 39 se muestra un esquema del proceso compostaje.

**Figura 39.** Esquema del proceso de compostaje



<sup>132</sup> Rodríguez, D.T., Ramírez, N.E. y García, J.A. Evaluación de la incidencia de la producción de compost, usando biomasa de la planta de beneficio, en la huella de carbono del aceite de palma. Estudio de caso. Revista Palmas. Vol. 36(2015). P 29. ISSN 0121-2923

<sup>133</sup> *Ibíd.*, p 30.

<sup>134</sup> GARCIA NUÑEZ, Jesús. Tratamiento de efluentes de la planta de beneficio- convertir un residuo en un recurso. *En*: Revista palmas. Vol. 37 No. Especial (2016). P 100. ISSN 0121- 2923

<sup>135</sup> *Ibíd.*, p 100.

El uso de compost y la generación de biogás reduce las emisiones de CH<sub>4</sub>, además permiten recuperar los nutrientes presentes en la tusa y los efluentes que son utilizados como enmienda orgánica; esto en parte sustituye una parte de los requerimientos de fertilizantes químicos<sup>136</sup>. La alternativa de compost genera un ahorro para la empresa, en cuanto a que se puede reemplazar 0,1 kilogramo de fertilizante químico por 1 kilogramo de fertilizante orgánico<sup>137</sup>.

Se considera que bajo unas buenas condiciones de operación, no se generan lixiviados en las pilas del compostaje y en caso tal que se generara, estos serían devueltos a las lagunas de tratamientos de efluentes para su posterior recirculación al proceso de compostaje<sup>138</sup>.

Para la aplicación del efluente sobre las pilas se realiza con una bomba que soporta los diferentes ácidos del efluente, cuya capacidad es de 200-250 galones por minuto, reguladores de presión hidráulica, una tubería de entrada que alimenta la bomba y dos salidas para un humedecimiento homogéneo del sustrato<sup>139</sup>.

En el anexo K se muestran los requisitos que debe cumplir el abono orgánico según la normativa<sup>140</sup>. Y se cumple con estos requisitos de acuerdo a la tabla 39, además la humedad es de 30-35%<sup>141</sup>.

---

<sup>136</sup> Rodríguez, D.T., Ramírez, N.E. y García, J.A. Evaluación de la incidencia de la producción de compost, usando biomasa de la planta de beneficio, en la huella de carbono del aceite de palma. Estudio de caso. Revista Palmas. Vol. 36(2015). P 29. ISSN 0121-2923

<sup>137</sup> Rodríguez, D.T., Ramírez, N.E. y García, J.A. Evaluación de la incidencia de la producción de compost, usando biomasa de la planta de beneficio, en la huella de carbono del aceite de palma. Estudio de caso. Revista Palmas. Vol. 36(2015). P 32. ISSN 0121-2923

<sup>138</sup> *Ibíd.*, P 30.

<sup>139</sup> TORRES, Randall. Proyecto comercial de compostaje de los desechos agroindustriales de la palma aceitera. Revista palmas. Vol. 24. No. Especial (2004). P 377.

<sup>140</sup> NTC. Productos para la industria agrícola productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo (2004)

<sup>141</sup> Rodríguez, D.T., Ramírez, N.E. y García, J.A. Evaluación de la incidencia de la producción de compost, usando biomasa de la planta de beneficio, en la huella de carbono del aceite de palma. Estudio de caso. Revista Palmas. Vol. 36(2015). P 33. ISSN 0121-2923

## 6. ANÁLISIS FINANCIERO PROYECTO

En el siguiente capítulo se presentara una propuesta de los costos operacionales de la planta en cuanto a mantenimientos y mano de obra además de los costos de inversión y los ingresos generados con respecto a la alternativa de aprovechamiento seleccionada en el capítulo 3. Con esto se puede evaluar la planta con respecto al VPN del proyecto y su posible impacto económico sobre la empresa de CI SIGRA.

### 6.1 COSTOS DIRECTOS

Para la determinación de los costos directos fueron tenidos en cuenta tanto los balances de masa realizados previamente como el dimensionamiento de las lagunas y los equipos. En la tabla 40 se muestran los costos directos del proyecto ligados a los equipos utilizados y a la materia prima. Las cotizaciones concernientes a los valores presentados se muestran en el anexo G para los valores de lagunas y geomembrana, el valor del depurador de gases y el módulo de compost se muestran en el anexo H. Para efectos de los costos en pesos (COP) se tomó como tasa representativa del mercado (TRM) un valor asumido de 3000 COP/USD

**Tabla 40.** Costos directos equipos

EQUIPOS	Cantidad	Pesos (COP)
Una laguna anaerobia	1	\$ 1.091.600.206
Cubierta geomembrana, tubería de biogás, válvulas de control, booster y quemador	1	\$ 694.341.523
Laguna facultativa	1	\$ 292.535.833
Motor	1	\$ 2.100.000.000
Depurador de gases	1	\$ 2.145.000.000
Módulo de compost	1	\$ 1.380.000.000
<b>TOTAL</b>		<b>\$ 7.703.477.562</b>

Es importante aclarar que las cotizaciones realizadas y presentadas anteriormente en la tabla 40 incluyen el costo de los equipos auxiliares del sistema como por ejemplo las bombas, y también los costos de instalación del sistema. En cuanto a las materias primas utilizadas es claro que, como entrada principal al proceso de producción de biogás, se tiene el efluente obtenido durante el proceso de extracción del aceite de palma (POME) como se ha explicado en los capítulos anteriores, por lo cual este no tiene un costo estimado al ser considerado un subproducto del proceso productivo de la planta de extracción de aceite. La única materia prima utilizada durante el proceso es el inóculo de la laguna metanogénica cuyo precio fue estimado por SIGRA y se presenta a en la tabla 41.

**Tabla 41.** Costos materia prima

Materia prima	Cantidad	Precio (COP)
inóculo (500m <sup>3</sup> )	1	\$ 20.000.000,00

## 6.2 COSTOS INDIRECTOS

Dentro de los costos indirectos se abordaron principalmente los costos operacionales, costos energéticos y los costos de mano de obra del proyecto de obtención del biogás.

**6.2.1 Costos de mano de obra.** Los costos generados por la mano de obra que van a operar tanto el sistema de biogás como el de compost se sacaron con base al salario mínimo vigente para el año 2017 de \$ 737,717 COP y también con base a las nóminas que SIGRA espera manejar. De igual forma se tuvo en cuenta la dedicación del personal (tiempo) esperada por SIGRA para la obtención de los salarios. Otro parámetro importante a tener en cuenta es que se toma un factor prestacional del 53%. Los costos de mano de obra del biogás se presentan en la tabla 42 y los costos de mano de obra del compost se presentan en la tabla 43.

**Tabla 42.** Costos mano de obra biogás

Mano de obra	Nivel salarial en referencia a salarios mínimos	No en personas	Salario (COP)	Salario + Factor prestacional (53%) (COP)	Dedicación
Supervisor	2,5	1	\$1.844.292	\$2.821.767	100%
Ingeniero	5	1	\$3.688.585	\$5.643.535	25%
Operario	1	1	\$737.717	\$1.128.707	100%
Supervisor especializado		1		\$4.800.000	
<b>TOTAL MENSUAL</b>	<b>\$10.161.358</b>		<b>TOTAL ANUAL</b>	<b>\$121.936.296</b>	

**Tabla 43.** Costos mano de obra compost

Mano de obra	Nivel salarial en referencia a salarios mínimos	No personas	Salario (COP)	Salario Factor prestacional (53%) (COP)	+ Dedicación
Operario	1	4	\$2.950.868	\$4.514.828	100%
<b>TOTAL MENSUAL</b>				<b>\$4.514.828</b>	
			<b>TOTAL ANUAL</b>		<b>\$54.177.936</b>

Los costos totales de mano de obra se presentan en la tabla 44.

**Tabla 44.** Costos totales mano de obra

Mano de obra	Costo (COP)
Biogás	\$10.161.358
Compost	\$4.514.828
<b>TOTAL MENSUAL</b>	<b>\$14.676.186</b>
<b>TOTAL ANUAL</b>	<b>\$176.114.232</b>

**6.2.2 Costos operacionales.** Los costos operacionales del proceso de biogás y compost fueron calculados teniendo en cuenta los parámetros presentes en la tabla 44, los cuales fueron estimados por la empresa. El mantenimiento del biodigestor y compost se asumió para cada año, el mantenimiento del motogenerador se asumió para cada dos años.

**Tabla 45.** Parámetros de cálculo de costos operacionales.

Costo operacional	Parámetro de calculo
Mantenimiento biodigestor	4% del costo total del sistema
Mantenimiento compost	4% del costo total del sistema
Mantenimiento motogenerador	1,5 Centavo Dólar/KWh generado

Con base a los anteriores parámetros se calcularon los costos operacionales del proceso en cuanto a los mantenimientos de cada uno de los equipos utilizados. Los resultados se presentan en la tabla 45. Es importante tener en cuenta que los costos de mantenimiento fueron aplicados a partir del segundo año de funcionamiento de la planta, además los demás parámetros tenidos en cuenta para el cálculo de los kWh generados se presentan en el anexo I.



**Tabla 46.** Costos operacionales totales anuales

<b>Costo operacional</b>	<b>Costo (COP)</b>
Mantenimiento biodigestor	\$168.939.102
Mantenimiento compost	\$55.200.000
Mantenimiento motogenerador	\$383.808.468
<b>Costo total</b>	<b>\$607.947.570</b>

**6.2.3 Costos energéticos.** Para la determinación de los costos energéticos se sacó un aproximado del consumo energético generado por la planta de biogás y este fue determinado en aproximadamente \$165/kWh de energía requerida por la planta, así mismo se estimó el costo de generar la energía eléctrica con diésel el cual fue calculado teniendo en cuenta el costo del diésel en la ciudad de Villavicencio al 30 de diciembre de 2016 como 7801COP\$/gal<sup>142</sup>, además se asumió costos de transporte y otros de \$200 cop dando un total de \$408,98/kWh. Los cálculos detallados de la obtención del costo energético del diésel se muestran en el anexo F. Es importante resaltar que se asumió el valor del consumo eléctrico de la planta en 22 kWh/tonRFF siendo así que en la tabla 46 se muestra el costo energético de la planta.

**Tabla 47.**Costos energéticos biogás por cada escenario

Capacidad ton RFF/año	Costo energético biogás (COP)	Costo energético diésel (COP)
120.000	\$ 435.600.000	\$ 1.079.707.200

### 6.3 DETERMINACIÓN DEL VALOR PRESENTE NETO (VPN)

Para la realización del valor presente neto se tuvieron en cuenta dos escenarios distintos, el primero fue la obtención del VPN con la implementación del proyecto propuesto y el segundo fue el escenario sin que se realice el proyecto. En ambos casos fueron tenidas en cuenta las variables económicas presentes en la tabla 47.

**Tabla 48.** Variables económicas del proyecto

<b>Variable económica</b>	
Impuesto industria y comercio (ICA)	0,7%
Impuesto a la renta	34%
Tasa descuento ponderado	15%
Depreciación obras civiles	20 años
Depreciación equipos	10 años
Depreciación muebles y encerres	5 años
Depreciación equipos transporte	5 años

<sup>142</sup> [Noticiasfinancieras]Con La Entrada En Vigencia Del Impuesto Verde, Precio De La Gasolina En Enero Queda En \$8.181. NoticiasFinancieras. Miami. Jan 3,.

**6.3.1 VPN con proyecto.** El proyecto fue evaluado a 25 años debido a recomendaciones de SIGRA. Los ingresos generados por el biogás fueron calculados según los parámetros expuestos en la tabla 48. Los beneficios de la utilización de la energía del biogás se calcularon según el costo energético con diésel menos el costo energético con biogás. El valor del DQO fue tomado de la bibliografía como se expuso en los capítulos anteriores. Así mismo el IPCC (Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático) sugiere como buena práctica utilizar como capacidad máxima de producción de metano el valor por defecto 0,25 kg CH<sub>4</sub>/kg DQO<sup>143</sup>.

El poder calorífico del biogás fue tomado como el valor del gas natural licuado debido a que su composición es básicamente la misma<sup>144</sup>. La eficiencia de transformación de la materia orgánica fue tomada con base a la eficiencia alcanzada por un reactor anaeróbico utilizado en el tratamiento de los efluentes de una tenería en Venezuela<sup>145</sup>. Es importante aclarar que no se realizaron proyecciones del precio del diésel ni del biogás, se manejan a un precio constante.

**Tabla 49.** Parámetros obtención de energía con biogás

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
POME (m <sup>3</sup> /tonRFF)	0,85
DQO (kg/m <sup>3</sup> )	55
kg CH <sub>4</sub> /kg DQO	0,25
Eficiencia de transformación de materia orgánica a metano	74%
Densidad metano a 273K (kg/m <sup>3</sup> )	0,71
Poder calorífico (kW/m <sup>3</sup> metano)	5,85

Los cálculos detallados de la obtención de energía y el ingreso generado por la venta de la misma se presentan en el anexo I. Con los parámetros expuestos anteriormente se calculó la generación neta de energía con biogás, a esta se le restó la energía necesaria para la planta y así se calculó la energía neta disponible para la venta. Se asumió un precio de venta de energía de 320\$/kW según los datos encontrados de las tarifas de venta de energía de EPSA (Empresa de energía del pacífico) a los estratos 2 y 3 al 16 de enero del 2017, estos valores se pueden observar en el anexo J, así mismo el valor se planteó según lo propuesto por la empresa. Las depreciaciones fueron determinadas según los tiempos de vida útil presentados en la tabla 47 y sus resultados para el primer año se presentan en la tabla 50.

<sup>143</sup> GALOTTI,P. y SANTALLA,E. Estimación del potencial energético de los efluentes industriales. En: Potencia. vol. 4, no. 4, p. 4

<sup>144</sup> VAN BASSHUYSEN, Richard. Natural Gas and Renewable Methane for Powertrains : Future Strategies for a Climate-Neutral Mobility. 1st ed. 2016 ed. Cham: Springer, 2016. p. 54-56

<sup>145</sup> BEHLING, Elisabeth, et al. Eficiencia de un reactor anaeróbico en el tratamiento del efluente de una tenería. En: Boletn Del Centro De Investigaciones Biológicas. vol. 38, no. 3,

**Tabla 50.** Depreciaciones activos

<b>Activo</b>	<b>Costo activo (COP)</b>	<b>Vida útil (años)</b>	<b>Depreciación anual (COP)</b>
Dos lagunas anaerobias	\$1.091.600.206	20	\$54.580.010
Laguna facultativa	\$292.535.833	20	\$14.626.792
Cubierta geomembrana, tubería de biogás, válvulas de control, booster y quemador	\$694.341.523	20	\$34.717.076
Módulo de compost	\$1.380.000.000	20	\$69.000.000
Motor	\$2.100.000.000	10	\$210.000.000
Depurador	\$2.235.000.000	10	\$223.500.000

El flujo de caja calculado para los 4 primeros años de evaluación del proyecto se presentan a continuación en la tabla 51.

**Tabla 51.** Flujo de caja primeros cuatro años

<b>AÑO</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Ingreso		\$ 2.535.722.9	\$ 2.535.722.9	\$ 2.535.722.9	\$ 2.535.722.9
		75	75	75	75
Ing. Desp. ICA		\$ 2.517.972.9	\$ 2.517.972.9	\$ 2.517.972.9	\$ 2.517.972.9
		14	14	14	14
Total egreso		\$ 1.042.023.8	\$ 1.442.277.2	\$ 1.827.085.6	\$ 1.442.277.2
		78	17	85	17
Utilidad antes de impuesto		\$ 1.475.949.0	\$ 1.075.695.6	\$ 690.887.229	\$ 1.075.695.6
		36	97	690.887.229	97
Utilidad después de impuesto.		\$ 974.126.364	\$ 709.959.160	\$ 455.985.571	\$ 709.959.160
Flujo operacional		\$ 1.580.550.2	\$ 1.316.383.0	\$ 1.062.409.4	\$ 1.316.383.0
		42	38	49	38
Inversión	\$ 7.703.4 77.562				
FNC	-\$ 7.703.4 77.562	\$ 1.580.550.2 42	\$ 1.316.383.0 38	\$ 1.062.409.4 49	\$ 1.316.383.0 38

El valor presente neto y la TIR calculada del proyecto se presentan a continuación.

**Tabla 52.**Resultados indicadores financieros con proyecto

<b>Indicador financiero</b>	<b>Valor (COP)</b>
VPN	\$130.069.351
TIR	15%
Tasa descuento	15%

**6.3.2 VPN sin proyecto.** Para la determinación de los indicadores financieros sin la implementación del proyecto fue tomada en cuenta la consideración de que la planta de extracción al estar bajo la supervisión del ente ambiental pertinente (Corporinoquia) no puede operar bajo ninguna condición si no cuenta con un sistema de tratamiento de efluentes<sup>146</sup>, por lo cual para el desarrollo de este capítulo se trabajó únicamente el tratamiento de piscinas convencionales y la generación energética con diésel. Los costos de inversión en este caso se presentan en la tabla 53.

**Tabla 53.**Costos directos sistema sin proyecto

<b>Activo</b>	<b>Costo unitario (COP)</b>	<b>Unidades</b>	<b>Total</b>
Dos lagunas anaerobias	\$1.091.600.206	1	\$1.091.600.206
Laguna facultativa	\$292.535.833	1	\$292.535.833
Módulo compost	\$1.380.000.000	1	\$1.380.000.000
<b>Total</b>	<b>\$2.764.136.039</b>	<b>1</b>	<b>\$2.764.136.039</b>

Así mismo los valores de las depreciaciones fueron calculados y presentados en la tabla 54.

**Tabla 54.**Depreciación de activos sin proyecto.

<b>Activo</b>	<b>Costo unitario (COP)</b>	<b>Vida útil (años)</b>	<b>Total</b>
Dos lagunas anaerobias	\$1.091.600.206	20	\$54.580.010
Laguna facultativa	\$292.535.833	20	\$14.626.792
Módulo fertirriego	\$1.380.000.000	20	\$69.000.000
<b>Total</b>	<b>\$2.527.175.371</b>		<b>\$126.358.769</b>

El flujo de caja para los primeros cuatro años del proyecto se presenta en la tabla 55.

<sup>146</sup> Corporinoquia. Corporinoquia impuso medidas preventivas a extractoras de aceite de palma en Vichada. Mayo 16,. [Consultado el 13 de noviembre de 2017]. Disponible en: <http://www.corporinoquia.gov.co/index.php/pages/2015-02-02-15-01-12/318-extractoras-vichada.html>

**Tabla 55.** Flujo de caja primeros cuatro años sin proyecto

<b>AÑO</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Ingreso		\$	\$	\$	\$
Ing.					
Desp.					
ICA		\$	\$	\$	\$
Total		\$	\$	\$	\$
egreso		1.217.914.0	1.327.291.9	1.327.291.9	1.327.291.9
		02	38	38	38
Utilidad		-\$	-\$	-\$	-\$
antes de		1.217.914.0	1.327.291.9	1.327.291.9	1.327.291.9
impuesto		02	38	38	38
Utilidad		-\$	-\$	-\$	-\$
después		803.823.24	876.012.67	876.012.67	876.012.67
de		1	9	9	9
impuesto		-\$	-\$	-\$	-\$
Flujo		665.616.43	737.805.87	737.805.87	737.805.87
operacio		9	7	7	7
nal					
Inversión	\$				
	2.764.136.0				
	39				
FNC	-\$	-\$	-\$	-\$	-\$
	2.764.136.0	665.616.43	737.805.87	737.805.87	737.805.87
	39	9	7	7	7

El valor presente neto calculado para la extractora sin la realización del proyecto se presenta en la tabla 56.

**Tabla 56.** Resultados indicadores financieros sin proyecto

<b>Indicador financiero</b>	<b>Valor (COP)</b>
VPN	-\$6.504.586.300

**6.3.3 Toma de decisión.** Basándose en los valores presentes en las tablas 52 y 56 para los dos escenarios evaluados, se puede tomar la decisión de realizar el proyecto ya que se obtienen grandes beneficios por su realización como la recuperación de la inversión y las ganancias generadas posterior al tiempo evaluado (25 años) aun teniendo en cuenta el alto valor de la inversión necesaria. Para el caso de no implementar el proyecto únicamente se tendrían gastos (egresos) por cada año de trabajo de la planta como se puede evidenciar en la tabla 55 por lo cual no es una alternativa viable. Así mismo estudios realizados para Colombia en el año 2000 determinaron que la implementación de biodigestores era una de las

mejores alternativas de tratamiento de efluentes debido a los ingresos generados y a los cortos tiempos de recuperación de la inversión<sup>147</sup>.

---

<sup>147</sup> BRUGOS, Carlos, et al. Evaluación económica de sistemas de tratamiento de efluentes para una planta extractora de aceite de palma. En: Revista Palmas. vol. 21, no. especial, p. 256-263

## 7. CONCLUSIONES

- Se diagnosticó el estado de las aguas provenientes del proceso de extracción de aceite de palma por medio de la bibliografía, puesto que la planta extractora se encuentra en fase de construcción, por lo tanto se toman las caracterizaciones de afluentes de plantas extractoras que se encuentran a nivel nacional en distintas partes del país y se concluyó que comúnmente estas plantas no cumplen con los parámetros límites permisibles expuestos en la resolución 631 de 2015 en cuanto al DBO, DQO, cloruros, grasas y aceites, los cuales fueron cruciales para el diseño de tratamiento de aguas.
- A partir de la caracterización del agua (según la bibliografía) se detectó que era necesario un tratamiento biológico debido al contenido de DQO y DBO, se propuso tres alternativas para el tratamiento de aguas de la planta extractora de aceite de palma de CI SIGRA S.A, y por medio de una matriz de selección se escogió la alternativa más conveniente, para ello se incluyeron parámetros como la caracterización del efluente, aplicabilidad del proceso, desempeño del tratamiento, eficiencia del tratamiento, condiciones de operación y mantenimiento, disponibilidad de terreno, los costos y la seguridad industrial
- La alternativa seleccionada consiste en hacer pasar el afluente por unas rejillas, trampa de grasa, laguna de estabilización, lagunas anaerobias y laguna facultativa.
- Por medio de la alternativa seleccionada se encontró que esta no reducía la concentración de cloruros del afluente, por lo que se propuso una opción para el tratamiento de los cloruros, a través de un biocarbón producto de la pirolisis del cuesco (desecho del proceso de extracción de aceite de palma), que se llevó a nivel laboratorio para comprobar su eficiencia.
- La disposición final del agua es enviada para un tratamiento de compostaje ya que los residuos sólidos serán secados y enviados para producir compost, para la plantación de palma y el agua tratada será utilizada para regar estos residuos sólidos.
- Los resultados experimentales obtenidos presentaron una eficiencia máxima de 22% de remoción de los cloruros por medio de adsorción con el biocarbón activado pero el proceso de adsorción no pudo ser moldeado a ninguna ecuación debido a que no se ajustó a ninguna de las dos isothermas de adsorción evaluadas (Langmuir y Freundlich) por lo cual no se pudo describir el comportamiento de los biocarbones.
- Se evaluó financieramente el proyecto teniendo en cuenta el VPN obtenido tanto con la implementación del proyecto como sin ella. Para ello se tuvo en cuenta

todos los valores relacionados tanto con los costos variables como con los costos fijos. En el caso de la implementación del proyecto se obtuvo un VPN de **\$130.069.351 COP** y en el caso de la no implementación del proyecto se obtuvo un VPN de **--\$6.504.586.300 COP**.

- Para disminuir la contaminación que se genera y hacer un aprovechamiento de los gases (metano y dióxido de carbono) que se producen con el proceso de las lagunas anaerobias, estas son carpadas para capturar los gases y generar biogás, generando beneficios para la planta ya que se puede generar energía eléctrica para los equipos que se trabajan en la planta.



## 8. RECOMENDACIONES

- Realizar la caracterización con un efluente real de la planta extractora para obtener la información de una fuente primaria y poder desarrollar de una forma más exacta los cálculos del proyecto desde el dimensionamiento de los equipos hasta los cálculos de inversión del proyecto ya que se tendrían valores de ingresos más exactos.
- Realizar las pruebas para la determinación de las isothermas de Freundlich y Langmuir variando presiones de ser posible, las cantidades de biocarbón para determinar su comportamiento bajo distintas condiciones y así tener un punto de comparación con las propuestas en el proyecto. Así mismo la determinación de las isothermas con otros tipos de biocarbón pirolizados y activados bajo condiciones distintas pueden otorgar información importante sobre la importancia de estas etapas de pirolisis y activación.
- Repetir las pruebas cuidando las cantidades de nitrato de plata que reaccionan, prevenir todas las formas de contaminación y los tiempos entre la toma de la muestra y la titulación de la misma para poder evitar posibles errores al momento de realizar la toma de dato y evitar el deterioro de las sustancias químicas utilizadas como lo son el nitrato de plata y el indicador cromato de potasio, para así obtener resultados más asertivos en el cálculo de las isothermas.
- Probar otras alternativas para la remoción de cloruros como precipitación u osmosis inversa para ver la eficiencia de estos tratamientos para este tipo de afluente frente al de adsorción con biocarbón activado y poder determinar de una forma más amplia el panorama del biocarbón frente al proceso de adsorción de dicho ion.
- Evaluar otras alternativas de aprovechamiento de residuos como pelletización y pirolisis lenta para ver su viabilidad bajo las condiciones del proyecto y complementar con un estudio de mercado de los subproductos obtenidos para verificar si hay posibilidad de incursión en el mercado colombiano, con el fin de escoger cual sería la alternativa adecuada para la empresa en cuanto a sus ganancias económicas.
- Evaluar otras isothermas diferentes a Langmuir y Freundlich para verificar si el proceso de adsorción se ajusta a alguna de ellas y poder moldear de este modo el comportamiento de adsorción que describiría el biocarbón bajo la presencia de los iones cloruro, además de conocer el comportamiento de adsorción de este que podría ser útil para el uso en la adsorción de otros iones.

## BIBLIOGRAFIA

ALAM, Shah. Manejo de efluentes de las plantas extractoras de aceite de palma. En: Palmas. vol. 16, p. 171-177

ALFARO, Marcos y ORTIZ, Elvin. Proceso De Producción De Aceite De Palma. 2006.

ALNICOLSA. Aceite de palma: usos, orígenes e impactos [en línea] <<http://taninos.tripod.com/aceitepalma.htm> > [citado en 12 de junio de 2017]

ALTHAUSEN, Markus. Tratamiento de efluentes de la planta de beneficio- convertir un residuo en un recurso. En: Revista palmas. Vol. 37 No. Especial (2016). P 32 ISSN 0121- 2923

ARESTA, Michele; DIBENEDETTO, Angela y DUMEIGNIL, Franck. Biorefinery: From Biomass to Chemicals and Fuels. Walter de Gruyter, 2012. p. 406, 385

BANSAL, Roop Chand y GOYAL, Meenakshi. Activated Carbon Adsorption. CRC press, 2005.

BEHLING, Elisabeth, et al. Eficiencia de un reactor anaeróbico en el tratamiento del efluente de una tenería. En: Boletín Del Centro De Investigaciones Biológicas. vol. 38, no. 3,

Bratieres K, Fletcher TD, Deletic A, Zinger Y. 2008. "Nutrient and sediment removal by stormwater biofilters: A large-scale design optimisation study".

BRUGOS, Carlos, et al. Evaluación económica de sistemas de tratamiento de efluentes para una planta extractora de aceite de palma. En: Revista Palmas. vol. 21, no. especial, p. 256-263

CARVAJAL OCAMPO, Juan Camilo; DUARTE, Luis y CARDONA, Carlos. INFLUENCIA DE LA ESCALA SOBRE EL DESEMPEÑO DE BIOREFINERIAS A PARTIR DE BAGAZO DE CAÑA Y MANDARINA. En: Evaluación Técnica, Económica Y Ambiental De Una Biorefinería a Partir De Materias Primas Con Alto Contenido En Lignina En El Contexto Colombiano.

CENIPALMA. Clarificación dinámica: un nuevo panorama tecnológico para el proceso de extracción de aceite de palma en Colombia [en línea]. <<http://www.cenipalma.org/clarificacion-dinamica>> [citado en 15 de julio de 2017].

CENTRO PANAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y CIENCIAS DEL AMBIENTE. (2002). Conferencia sistema de tratamiento de aguas residuales.

CHEN, Baoliang; ZHOU, Dandan y ZHU, Lizhong. Transitional adsorption and partition of nonpolar and polar aromatic contaminants by biochars of pine needles with different pyrolytic temperatures. En: Environmental Science & Technology. vol. 42, no. 14, p. 5137-5143

COMISION NACIONAL DE AGUAS. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: pretratamiento y tratamiento primario. México. 2 p. ISBN 978-607-626-008-1

Corporinoquia. Corporinoquia impuso medidas preventivas a extractoras de aceite de palma en Vichada. Mayo 16. [Consultado el 13 de noviembre de 2017]. Disponible en: <http://www.corporinoquia.gov.co/index.php/pages/2015-02-02-15-01-12/318-extractoras-vichada.html>

[Cultivopalma] Desfrutado. [Consultado el Junio 25,2017]. Disponible en: <http://cultivopalma.webcindario.com/desfruta.htm>

[Cultivopalma] Digestion. [Consultado el Julio 1,2017]. Disponible en: <http://cultivopalma.webcindario.com/digesta.htm>

[Cultivopalma] Prensado. [Consultado el Julio 1,2017]. Disponible en: <http://cultivopalma.webcindario.com/prensa.htm>

[Cyclucid] Tratamiento terciario. [Consultado el Julio 15,2017]. Disponible en: <http://www.cyclucid.com/tecnologias-aguas-residuales/tratamiento-aguas/tratamiento-terciario/>

DADA,A. O., et al. Langmuir, Freundlich, Temkin and Dubinin–Radushkevich isotherms studies of equilibrium sorption of Zn<sup>2</sup> unto phosphoric acid modified rice husk. En: IOSR Journal of Applied Chemistry. vol. 3, no. 1, p. 38-45

DAS,K. C.; GARCA-NUEZ,J. A. y GARCA-PREZ,M. Overview of a biorefinery and opportunities in the Palm Oil Sector. En: Revista Palmas. vol. 28, p. 91-100

DEMIRBAS, Ayhan. Biorefineries: For Biomass Upgrading Facilities. Springer Science & Business Media, 2009. p. 123

FEDEPALMA. Recomendaciones para la gestión integral de aguas residuales en plantas de beneficio y el cumplimiento de la resolución 0631 de 2015 sobre vertimientos. En: [cidpalmero](http://cidpalmero.fedepalma.org/node/124) [en línea](2016)<<http://cidpalmero.fedepalma.org/node/124>> [citado en 10 de agosto de 2017].

FEDEPALMA. Rutas tecnológicas para el manejo integral de aguas residuales en las plantas de beneficio del sector palmero. 2015. P 48.

FERNANDEZ PADILLA, Carlos Andrés. CLARIFICACIÓN DINÁMICA: UN NUEVO PANORAMA TECNOLÓGICO PARA EL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE PALMA EN COLOMBIA. [Consultado el 12 Julio2017]. Disponible en: <http://www.cenipalma.org/clarificacion-dinamica>

FERRER, José. Tratamientos biológicos de aguas residuales. España: Universidad politécnica de valencia, 2003. 145 p. ISBN 9788497054669.

GALOTTI, P. y SANTALLA, E. Estimación del potencial energético de los efluentes industriales. En: Potencia. vol. 4, no. 4, p. 4

GALEON. Filtro de arena, caudal [en línea] <<http://galeon.com/elregante/arena.html>> [citado en 20 de agosto]

GARCIA NUÑES, Jesús. Manejo de efluentes de plantas extractoras: Diseño de lagunas de estabilización. Colombia. Cenipalma, 1997. 35p. (Boletín técnico: No. 11).

GARCIA NUÑES, Jesús Alberto. Evolución De Las Plantas De Beneficio Del Fruto De La Palma De Aceite En Biorrefinerías: Evaluación Técnica, Ambiental Y Socio-Económica De Seis Conceptos De Biorrefinería.

GARCIA NUÑEZ, Jesús Alberto, et al. Evolution of palm oil mills into bio-refineries: literature review on current and potential uses of residual biomass and effluents. En: Resources, Conservation and Recycling. vol. 110, p. 99-114

GARCIA NUÑEZ, Jesús Alberto, et al. Evaluation of alternatives for the evolution of palm oil mills into biorefineries. En: Biomass and Bioenergy. vol. 95, p. 310-329

GARCIA, Jesús Alberto. Alternativas para convertir una planta de beneficio en una biorrefinera. En: Revista Palmas. vol. 37, p. 95-106

GARCIA NUÑES, Jesús. Manejo de efluentes de plantas extractoras: Arranque, operación y mantenimiento de lagunas de estabilización. Colombia. Cenipalma, 1996. 21p. (Boletín técnico: No. 10) ISBN 958-95000-3-X.

GARCIA NUÑEZ, Jesús. Tratamiento de efluentes de la planta de beneficio-convertir un residuo en un recurso. En: Revista palmas. Vol. 37 No. Especial (2016). P 99. ISSN 0121- 2923

GARCIA NUÑEZ, Jesús Alberto. Caracterizaciones después del tratamiento de aguas [correo electrónico]. Mensaje enviado a: Andrés Felipe PEREZ y Camila RIOS. 15 DE agosto de 2017. [Citado en 10 de noviembre de 2017] Comunicación personal

GOMELLA,C. y GUERREE,H. Tratamiento De Aguas Para Un Abastecimiento Publico. Barcelona: Editores técnicos asociados S.A, 1977. p. 151-152

HAPPEL, John y JORDAN, Donald G. Economía De Los Procesos Químicos. Revert, 1981. p. 322

HASSAN, Mohd Ali, et al. Treatment of palm oil wastewaters. En: Waste Treatment in the Food Processing Industry. p. 101-118

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Referencias bibliográficas. Contenido, forma y estructura. NTC 5613. Bogotá D.C. El instituto, 2008. 33p.c.

\_\_\_\_\_. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Bogotá D.C. El instituto, 2008. 36p. 2008.

\_\_\_\_\_. Referencias documentales para fuentes de información electrónicas. NTC 4490. Bogotá D.C. El instituto. 1998. 23p.

Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias, Quevedo (Ecuador) Estación Experimental Tropical Pichilingue Unidad de Documentación. Bibliografía sobre palma africana (*Elaeis guineensis*).

JACOBSON, Willard. Programa De Formación Continua En Educación Ambiental Para Profesores Y Asesores De Ciencias De Enseñanza Secundaria. Bilbao, España: Los libros de la catarata, 1996. p. 84-85

JIA, Qipeng y LUA, Aik Chong. Effects of pyrolysis conditions on the physical characteristics of oil-palm-shell activated carbons used in aqueous phase phenol adsorption. En: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. vol. 83, no. 2, p. 175-179

KAPARAJU, Prasad, et al. Bioethanol, biohydrogen and biogas production from wheat straw in a biorefinery concept. En: Bioresource Technology. vol. 100, no. 9, p. 2562-2568

LAPEÑA, Miguel. Tratamiento De Aguas Industriales: Aguas De Proceso Y Residuales. Marcombo, 1989. p. 73-74

MALLEVIALLE, Joël. Water Treatment Membrane Processes. New York [u.a.]: McGraw-Hill, 1996. p. 28-29

MA, Ah Ngan. Innovaciones en el manejo del efluente de las Plantas de beneficio de aceite de palma. En: Revista Palmas. vol. 21, no. 2, p. 41-49

MAÑUNGA, Tatiana. Tratamiento de agua residual domestica sin clarificación primaria en un sistema de lodos activados en la modalidad de estabilización por contacto. En: Revista científica ingeniería y desarrollo. Vol 30. No.2, 2012. ISSN 0122-3461

MARADIAGA, J. A. y ROSALES, E. ciclo de capacitación sobre preparación y evaluación de proyectos de desarrollo agrícola. En: Ejercicio Práctico: Fomento Del Cultivo De La Palma Africana En El Valle Del Aguan.

MARSH, Harry y RODRÍGUEZ-REINOSO, Francisco. Activated Carbon. 1. ed. ed. Amsterdam [u.a.]: Elsevier, 2006. p. 150080444636

MASSIEU, Bernardo. Tratamiento de aguas residuales [en línea] <http://files.bernardo-servin-massieu.com/200000057-b3f9cb4e88/residuales.pdf> [citado en 20 de julio de 2017].  
Metcalf & Eddy. Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización. Tercera edición. Pag 40.

MINISTERIO DE DESARROLLO Y MEDIO AMBIENTE. Resolución 0631 de 2015

MORENO REINOSO, Claudia. Tratamiento de agua residual de la extracción del aceite crudo de palma para su reutilización como agua de proceso mediante un biofiltro de arena. Quito, 2015, 24 h. Proyecto de investigación (ingeniero ambiental). Universidad San Francisco De Quito. Colegio de ciencias e ingeniería

MUNAR David, RAMÍREZ Nidia, GARCÍA Jesús. Remoción de nitrógeno amoniacal y fosfatos con biocarbón de cuesco de palma para aplicación en vertimientos de plantas de beneficio. Sep 20.

MURANAKA, Cnthia Tiemi. Combinao De Adsoro Por Carvo Ativado Com Processo Oxidativo Avavano (POA) Para Tratamento De Efluentes Contendo Fenol. Universidade de São Paulo, 2010. p. 28-29

NEMEROW, Nelson Leonard y DASGUPTA, Avijit. Tratamiento De Vertidos Industriales Y Peligrosos. Ediciones Díaz de Santos, 1998. p. 156-157

NGAN, Ma Ali. Innovaciones en el manejo del efluente de las plantas extractoras de aceite de palma. En: Revista Palmas. Vol. 21. No. 2 (2000)

NODAL BECERRA, Elida. Procesos biológicos aplicados al tratamiento de agua residual. En: Revista ingeniería hidráulica y ambiental. Vol. 12. No. 4, 2001. 54 p.

[Noticiasfinancieras] Con La Entrada En Vigencia Del Impuesto Verde, Precio De La Gasolina En Enero Queda En \$8.181. NoticiasFinancieras. Miami. Jan 3.

NTC. Productos para la industria agrícola productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo (2004)

OROPEZA, Norma. Lodos residuales: estabilización y manejo. En: Revista caos conciencia. Vol 1, 2006. 64 p.

OROZCO, Álvaro. Bioingeniería de aguas residuales: teoría y diseño. Editor: acodal, 2005. 455 p. ISBN 9689645453

ORTEGA, Grey C. Castellar y GARCÍA, Antonio A. García. Remoción de Pb<sub>2</sub> en disolución acuosa sobre carbón activado en polvo: Estudio por lote. En: Prospectiva. vol. 9, no. 1, p. 59-68

ORTIZ, Rubén y FERNANDEZ, Olman. El Cultivo De La Palma Aceitera. Primera ed. San José, Costa rica: Universidad estatal a distancia, 1994. p. 165-166

PALMA DE ACEITE. Clarificación [en línea] <<http://cultivopalma.webcindario.com/clarifica.htm>> [citado en 05 de julio de 2017].

PALMA DE ACEITE. Desfibración [en línea]. <<http://cultivopalma.webcindario.com/desfibra.htm>> [citado en 17 de julio de 2017].

PALMA DE ACEITE PALMA DE ACEITE. La extracción del aceite de palmiste [en línea]. <<http://cultivopalma.webcindario.com/palmiste.htm>> [citado en 17 de agosto de 2017].

[Plantasaceiteras] Prensado en frio para la extracción de aceite. [Consultado el Julio 2,2017]. Disponible en: [http://www.plantasaceiteras.com/prensado\\_en\\_frio\\_extraccion\\_aceite.html](http://www.plantasaceiteras.com/prensado_en_frio_extraccion_aceite.html)

[Plantasaceiteras] Prensado en caliente. [Consultado el Julio 2,2017]. Disponible en: <http://www.plantasaceiteras.com/plata-de-molienda-de-aceite/prensado-en-caliente.html>

[Portafolio] Colombia, cuarto productor de aceite de palma en el mundo. Septiembre 18,. [Consultado el Junio 15,2017]. Disponible en: <http://www.portafolio.co/economia/finanzas/colombia-cuarto-productor-aceite-palma-mundo-59140>

PROMECAFE. El tratamiento anaeróbico de los residuos del café: una alternativa energética para la disminución del impacto ambiental en el sector. Nicaragua. P 45.

RUBIANO, German. Mejoramiento en la extracción de aceite de palmiste. En: Revista Palmas [en línea]. Vol. 19 (1998)

<<https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/675/675>>  
[citado en 01 de agosto de 2017].

RAMALHO, Rubens. Tratamiento de aguas residuales. Quebec Editorial Reverte, 2003. 10 p. ISBN 84-291-7975-5.

Rodríguez, D.T., Ramírez, N.E. y García, J.A. Evaluación de la incidencia de la producción de compost, usando biomasa de la planta de beneficio, en la huella de carbono del aceite de palma. Estudio de caso. Revista Palmas. Vol. 36(2015). P 29. ISSN 0121-2923

ROMERO, Jairo. Tratamiento de aguas residuales teoría y principios de diseño. Bogotá: Escuela colombiana de ingeniería, 2004. 246p. ISBN 9588060133.

RUPANI, Parveen Fatemeh, et al. Review of current palm oil mill effluent (POME) treatment methods: vermicomposting as a sustainable practice. En: World Applied Sciences Journal. vol. 11, no. 1, p. 70-81

SAINAZ, Juan Antonio. Tecnologías para la sostenibilidad: procesos y operaciones unitarias en depuración de aguas residuales. Madrid: edición fundación EOI, 2007. 301 p. ISBN 978-84-88723-58-1

SANS, Ramón. Ingeniería ambiental: contaminación y tratamientos. Barcelona. Marcombo, 1989. 11 p. ISBN 84-267-0742-4

SETHUPATHI, Sumathi. Removal Of Residue Oil From Palm Oil Mill Effluent (Pome) Using Chitosan. En: Microfiche.

TCHOBANOGLIOUS, George. Sistema de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados. Bogotá: McGraw-Hill interamericana s.a, 2000. 549 p. ISBN 9584100416

THEK, Gerold y OBERNBERGER, Ingwald. The Pellet Handbook: The Production and Thermal Utilization of Biomass Pellets. Routledge, 2012. p. 1

TORRES, Randall. Proyecto comercial de compostaje de los desechos agroindustriales de la palma aceitera. Revista palmas. Vol. 24. No. Especial (2004). P 377.

TRAN, Hai Nguyen; YOU, Sheng-Jie y CHAO, Huan-Ping. Effect of pyrolysis temperatures and times on the adsorption of cadmium onto orange peel derived biochar. En: Waste Management & Research. vol. 34, no. 2, p. 129-138

TRATAMIENTOS DEL AGUA Y DEPURACION. Pretratamientos de aguas residuales. [En línea]



<<http://www.tratamientosdelaguaydepuracion.es/pretratamientos-aguas-residuales.html>> [citado en 20 de julio de 2017]

TUNAY, et al. Chemical Oxidation Applications for Industrial Wastewaters. 1 ed. GB: Iwa Publishing, 2010. p. 1-29

VAN BASSHUYSEN, Richard. Natural Gas and Renewable Methane for Powertrains: Future Strategies for a Climate-Neutral Mobility. 1st ed. 2016 ed. Cham: Springer, 2016. p. 54-56331923224X

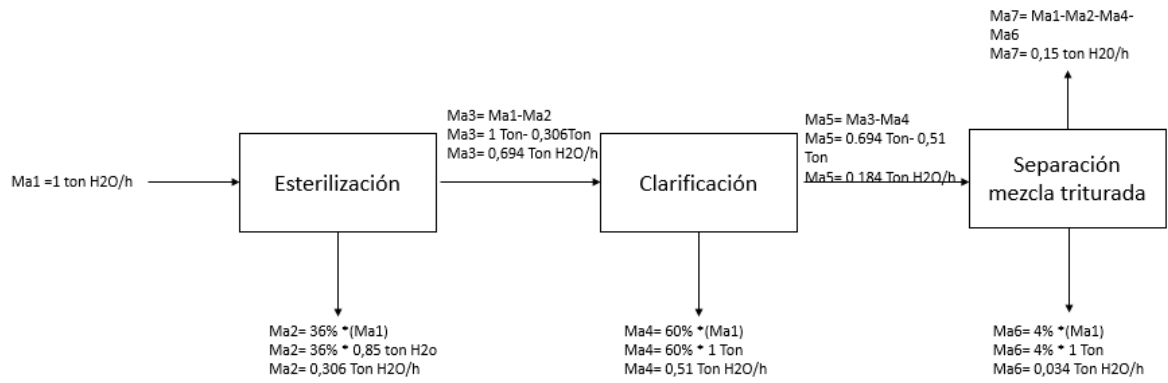
VARGAS, Diana P.; GIRALDO, Liliana y MORENO, Juan Carlos. Determinación de isotermas de adsorción y entalpías de inmersión de carbón activado en soluciones acuosas de 3-cloro fenol a diferente ph. En: Revista Colombiana De Química. vol. 39, no. 1, p. 121

VRHEGYI, Gbor, et al. Kinetics of the thermal decomposition of cellulose in sealed vessels at elevated pressures. Effects of the presence of water on the reaction mechanism. En: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. vol. 26, no. 3, p. 159-174

WEBER, Walter J. Control De La Calidad Del Agua: Procesos Fisicoquímicos. Revert, 1979. p. 215-220

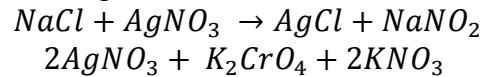
WELLINGER, Arthur; MURPHY, Jerry D. y BAXTER, David. The Biogas Handbook: Science, Production and Applications. Elsevier, 2013. p. 1-2

ANEXO A  
BALANCES DE MASA DEL AGUA PARA LA ESTERILIZACIÓN, CLARIFICACIÓN  
Y SEPARACIÓN DE MEZCLA TRITURADA



ANEXO B  
CÁLCULOS DE LAS SOLUCIONES

- Sistema reactivo método argentométrico de mohl



- Cálculos detallados preparación solución de nitrato de plata

Para la preparación de la solución de nitrato de plata se preparó un litro de solución (1l) teniendo en cuenta los siguientes cálculos:

$$X_{gAgNO_3(s)=1\text{ l solución}} = 1\text{ l solución} * \frac{0.014\text{ eq } AgNO_3}{1\text{ l solución}} * \frac{169.87\text{ g}}{1\text{ eq } AgNO_3} = 2.3782\text{ g}$$

Teniendo en cuenta una pureza del 99% del  $AgNO_3$ :

$$100\% * \frac{2,3782\text{ g } AgNO_3}{99\%} = 2,4022\text{ } AgNO_3$$

- Cálculos detallados preparación solución estándar de cloruro

$$X_{gNH_4Cl} = 100 \frac{mg}{l} Cl * \frac{1 * 10^{-3} g Cl}{1 mg Cl} * \frac{1 mol NH_4Cl}{35.45 g Cl} * \frac{53.45 g NH_4Cl}{1 mol NH_4Cl} = 0,1508g$$

Teniendo en cuenta que la pureza del  $NH_4Cl$  es de 99%:

$$100\% * \frac{0.1508\text{ g } NH_4Cl}{99\%} = 0,1523\text{ g } NH_4Cl$$

ANEXO C  
NORMA NMX-AA-073-SCFI-2001 PARA DETERMINACIÓN DE CLORUROS  
TOTALES EN AGUA Y CÁLCULO DE LA CONCENTRACIÓN DEL ADSORBATO  
EN EL BIOCARBÓN EN ESTADO DE EQUILIBRIO ( $q_e$ ).

- Norma ASTM determinación de cloruros

$$mg Cl^{-} = \frac{(A - B) * N * 35450}{ml muestra}$$

Donde:

A = ml de solución nitrato de plata gastados en la muestra

B= ml de solución nitrato de plata gastados en el blanco

N= normalidad de la solución de nitrato de plata (0.014N)

Para efectos prácticos el valor de "B" presente en la formula fue los ml de solución de nitrato de plata gastados en la formación del precipitado rojo de una muestra de agua destilada de 40 ml.

- Ecuación concentración del adsorbato en el biocarbón en estado de equilibrio.

$$qe = \frac{(Co - Ce)V}{M}$$

Donde:

V= volumen de la solución (l)

M= gramos de biocarbón agregado en cada muestra

Co= concentración inicial de adsorbato (mg/l)

Ce= concentración en el equilibrio de adsorbato (mg/l)

ANEXO D  
CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DETALLADA DE LOS BIOCARBONES



Las concentraciones iniciales de algunas repeticiones varían entre sí, debido a que fue necesario realizar tres soluciones de cloruros durante el desarrollo de la experimentación debido a que fueron utilizadas en su totalidad.

- Biocarbón 1- Repetición 1

Dosis de biocarbón	Volumen total de AgNO <sub>3</sub> gastado en la titulación (ml)	concentración	% de remoción
0	1,45	111,22125	
0,005	1,45	111,22125	0
0,05	1,44	110,0505	1,052631579
0,125	1,42	107,709	3,157894737
0,25	1,38	103,026	7,368421053
0,375	1,4	105,3675	5,263157895
0,5	1,31	94,83075	14,73684211
0,625	1,25	87,80625	21,05263158

- Biocarbón 1- Repetición 3

Dosis de biocarbón	Volumen total de AgNO <sub>3</sub> gastado en la titulación (ml)	concentración	% de remoción
0	1,47	113,56275	
0,005	1,47	113,56275	0
0,05	1,46	112,392	1,030927835
0,125	1,44	110,0505	3,092783505
0,25	1,41	106,53825	6,18556701
0,375	1,37	101,85525	10,30927835
0,5	1,35	99,51375	12,37113402
0,625	1,25	87,80625	22,68041237

- Biocarbón 2- Repetición 1

Dosis de biocarbón	Volumen total de AgNO <sub>3</sub> gastado en la titulación (ml)	concentración	% de remoción
0	1,45	111,22125	
0,005	1,45	111,22125	0
0,05	1,44	110,0505	1,052631579
0,125	1,44	110,0505	1,052631579
0,25	1,4	105,3675	5,263157895
0,375	1,35	99,51375	10,52631579
0,5	1,32	96,0015	13,68421053
0,625	1,3	93,66	15,78947368

- Biocarbón 2- Repetición 3

Dosis de biocarbón	Volumen total de AgNO <sub>3</sub> gastado en la titulación (ml)	concentración	% de remoción
0	1,47	113,56275	
0,005	1,47	113,56275	0
0,05	1,46	112,392	1,030927835
0,125	1,45	111,22125	2,06185567
0,25	1,39	104,19675	8,24742268
0,375	1,37	101,85525	10,30927835
0,5	1,33	97,17225	14,43298969
0,625	1,27	90,14775	20,6185567

ANEXO E  
RESULTADOS DE LAS CONSTANTES DE LAS ISOTERMAS

Para la interpretación de los datos se tuvieron en cuenta los promedios de las constantes encontradas para ambos biocarbonos en las dos repeticiones realizadas, esto tanto para la isoterma de Freundlich como para la isoterma de Langmuir.

Los promedios para cada constante se sacaron según la siguiente fórmula:

$$X_{total} = \frac{\sum X_n}{n} \quad (4)$$

Donde:

X= constante evaluada

n= N° de pruebas

#### • Constantes de Freundlich

Los resultados de las constantes de Freundlich para el biocarbón 1 se presentan en la tabla A.

Tabla A. Resultados constantes de Freundlich biocarbón 1

Kf	n
39582,6565	-0,47146629

De acuerdo a esto la ecuación que describiría el proceso de adsorción de este biocarbón bajo el modelo de la isoterma de Freundlich quedaría de la siguiente forma:

$$\text{Log } q_e = \left( \frac{1}{-0,47146629} \right) \text{Log } C_e + \text{Log}(39582,6565)$$

Los resultados de las constantes de Freundlich para el biocarbón 2 se presentan en la tabla B.

Tabla B. Resultados constantes de Freundlich biocarbón 2

Kf	n
535894044	-0,30296438

La ecuación, en el caso del biocarbón 2, que describe el comportamiento del fenómeno de adsorción según la isoterma de Freundlich se presenta a continuación:

$$\text{Log } q_e = \left( \frac{1}{-0,30296438} \right) \text{Log } C_e + \text{Log}(535894044)$$

Se puede observar que los resultados obtenidos no presentaron un lógico comportamiento físico pues en un proceso de adsorción se obtuvo un estimativo (n) negativa indicando una posible desorción.

- **Constantes de Langmuir**

Los resultados de las constantes de Langmuir para el biocarbón 1 se presentan en la tabla C donde 'Qo' es la cantidad máxima de cobertura de la monocapa (supuesto de Langmuir).

Tabla C. Resultados constantes de Langmuir para biocarbón 1

Qo	B
0,46956396	-0,01490137

La ecuación que describe el proceso de adsorción por medio de la monocapa superficial bajo las constantes de Langmuir para el biocarbón 1 se muestra a continuación:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{0,46956396} C_e + \frac{1}{(-0,00699)}$$

Los resultados del Biocarbón 2 se presentan en la tabla D.

Tabla D. Resultados constantes de Langmuir para biocarbón 2

Qo	b
0,26142076	-0,01238141

La ecuación que describe el proceso de adsorción por medio de la isoterma de Langmuir para el biocarbón 2 se presenta a continuación:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{0,26142076} C_e + \frac{1}{(-0,003215)}$$

ANEXO F  
CALCULO COSTO ENERGÉTICO DEL DIÉSEL

El poder calorífico del diésel fue tomado de tablas de combustibles de la universidad nacional del santa de Perú.

$$11,74 \frac{kWh}{kg \text{ diesel}} \times 840 \frac{kg}{m^3} = 9861,6 \frac{kWh}{m^3}$$

$$9861,6 \frac{kWh}{m^3} \times 1 \frac{m^3}{264,172 gal} = 37,33 \frac{kWh}{gal}$$

$$\frac{1 gal}{37,33 kWh} \times \frac{\$7801 cop}{gal} = \frac{\$208,97 cop}{kWh}$$

$$\frac{\$208,97 cop}{kWh} + \$200 cop = \frac{\$408,97 cop}{kWh}$$

ANEXO G  
COTIZACION LAGUNAS





✓ DBO <sub>5</sub> , mg/l	≤	22000
✓ DQO, mg/l	≤	65000
✓ SS, mg/l	≤	35000
✓ SSV, mg/l	≤	28000
✓ Grasas y aceites, mg/l	≤	15000
✓ Sulfatos, mg/l	≤	250

## 2.2 CAUDAL DE DISEÑO

Se asume como caudal de diseño el promedio que, corresponde al procesamiento de 15 toneladas durante 24 horas en el periodo de cosecha y máximo de producción con una relación 1:0.80, es decir, 360 m<sup>3</sup>/d, dejando la distribución y los requerimientos técnicos de la ampliación a 30 TFH equivalente a 720 m<sup>3</sup>/d.

## 2.3 DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS Y COMPONENTES DE LA PLANTA

De acuerdo con el caudal a tratar y a la composición típica de las aguas residuales de los procesos de extracción, a continuación, se describen las diferentes etapas de tratamiento que harán parte integral del tratamiento de las aguas residuales.

**Lagunas-digestores anaerobios en paralelo.** La magnitud de la carga orgánica y la disponibilidad de oxígeno disuelto, determinan las condiciones bajo las cuales se realizará la actividad biológica en una laguna anaerobia. La digestión anaeróbica es un proceso natural que ocurre cuando compuestos orgánicos biodegradables son expuestos a la degradación biológica en ausencia de oxígeno molecular. En los procesos de digestión anaerobia una comunidad compleja de organismos anaerobios convierte los compuestos orgánicos casi completamente en dióxido de carbono y metano.

**Laguna facultativa de pulimento y almacenamiento.** El efluente de las lagunas-digestores anaerobios en serie alimenta una laguna facultativa. La principal función de ésta laguna es la remoción de la carga orgánica (básicamente soluble) que escapó al tratamiento primario en las lagunas-digestores anaerobios, de tal forma que, se pueda cumplir con los requerimientos en la calidad del efluente para fertilizante.

En la **primera** alternativa la evaluación se hace proyectando el diseño y construcción de dos (2) lagunas anaerobias en serie entre ellas con una laguna facultativa, con la capacidad suficiente para reducir la DQO en el efluente de esta por debajo de 1500 mg/l y sólidos suspendidos menor de 2 ml/l. Incluye también la construcción de un digestor de lodos en tierra para facilidades en el manejo de los lodos antes de su disposición.

En la **segunda** alternativa la evaluación se hace proyectando el diseño y construcción de una (1) laguna anaerobia con una laguna facultativa, con la capacidad suficiente para reducir la DQO en el efluente de esta por debajo de 2000 mg/l y sólidos suspendidos menor de 2 ml/l.

## 3. PRESUPUESTO ESTIMADO PRIMERA ETAPA

**PRIMER CASO**

Dos lagunas anaerobias en serie con su respectivo digestor de lodos y una laguna facultativa como pulimiento final y almacenamiento para fertiriego.

DESCRIPCIÓN	COSTO	
Dos lagunas anaerobias en serie	\$	1,091,600,206
Digestor de lodos	\$	155,973,700
Cubierta en geomembrana PHD, tubería de biogás, válvulas de control, Booster y quemador fabricación nacional	\$	694,341,523
Laguna facultativa para fertiriego	\$	292,535,833
<b>TOTAL</b>	<b>\$</b>	<b>2,234,451,263</b>

En este caso el área total estimada para las 30 toneladas es de aproximadamente 2.8 Ha, con una primera etapa de 1.6 Ha.

**SEGUNDO CASO**

Una laguna anaerobia, y una laguna facultativa como pulimiento final y almacenamiento para fertiriego.

DESCRIPCIÓN	COSTO	
Una laguna anaerobia	\$	854,639,538
Cubierta en geomembrana PHD, tubería de biogás, válvulas de control, Booster y quemador fabricación nacional	\$	642,831,757
Laguna facultativa para fertiriego	\$	292,535,833
<b>TOTAL</b>	<b>\$</b>	<b>1,790,007,128</b>

En este caso el área total estimada para las 30 toneladas es de aproximadamente 2.3 Ha, con una primera etapa de 1.4 Ha.

**Nota.** Como su nombre lo indica "el presupuesto estimado" es solo un estimado del valor de la inversión en la primera etapa y, solo con el diseño a detalle del proyecto se puede conocer el costo total o real de la construcción de las obras en su primera etapa..

Atentamente,

**HERNÁN CUERVO FUENTES**  
Gerente

ANEXO H  
COTIZACION COMPOST Y DEPURADOR

#### 4. ORDEN DE MAGNITUD DE INVERSIÓN

A continuación, se presenta un estimado de la Inversión bajo la modalidad de contrato "llave en mano total" para la Implementación de la planta de biogás con generación eléctrica (no incluye costo del motor ni instalación), así mismo proyectamos el costo del proyecto sin captura de biogás (solo el tratamiento de efluentes); los precios estimados son:

Tabla 6. Inversión para generar electricidad solo para autoconsumo

RUBRO		REACTOR TIPO LAGUNA	REACTOR TIPO TANQUE
Inversión (USD)	Biodigestión sin captura de biogás ( Solo tratamiento)	1.035.000	1.180.000
	Biodigestor + Captura de biogás + Depuración del biogás para generación eléctrica	1.750.000	1.690.000
	Motorgenerador (230 kW)	según proveedor + instalaciones	
	Módulo de compost	460.000	

*Nota: En caso del interés de Extractora LA ILUSIÓN por realizar las Obras Civiles que el proyecto ofertado requiere, existe la posibilidad de concertar un contrato "Llave en mano parcial".*

#### 5. CRONOGRAMA Y FINANCIAMIENTO

##### Cronograma

La Implementación de una planta de biogás tanque en tierra (tipo laguna) es de aproximadamente 11 meses, y la Implementación con tanque metálico es de 10 meses; contando a partir de la firma del contrato, pago del anticipo y entrega de todos los datos técnicos para dar inicio a la Ingeniería.

ACTIVIDAD/MES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Fase 1: Biodigestión sin captura de biogás											
Fase 2: Captura de biogás y quema en tea											
Fase 3: Depuración del biogás para generación eléctrica											

El sistema de compost se puede Implementar en aproximadamente 6 meses.

##### Financiamiento

ANEXO I  
CALCULOS OBTENCION DE BIOGAS E INGRESO POR VENTA

$$\begin{aligned} \text{Cantidad de POME} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right) &= 0,85 \frac{\text{m}^3}{\text{ton RFF año}} \times 120.000 \text{ ton RFF año} \\ &= 102.000 \text{ m}^3/\text{año} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Carga organica a degradar} \left( \frac{\text{kg}}{\text{año}} \right) &= 55 \frac{\text{kg DQO}}{\text{m}^3} \times 102.000 \frac{\text{m}^3}{\text{año}} \\ &= 5.610.000 \frac{\text{kg DQO}}{\text{año}} \end{aligned}$$

$$\frac{\text{kg metano}}{\text{año}} = 5.610.000 \frac{\text{kg DQO}}{\text{año}} \times 0,25 \frac{\text{kg metano}}{\text{kg DQO}} = 1.402.500 \text{ kg metano}$$

$$\begin{aligned} \text{kg metano finales} &= 74 \% \text{ remocion} \times 1.402.500 \text{ kg metano} \\ &= 1.037.850 \text{ kg metano} \end{aligned}$$

$$\frac{\text{m}^3 \text{ metano}}{\text{año}} = \frac{1.037.850 \text{ kg metano}}{0,71 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 1.461.761 \frac{\text{m}^3 \text{ metano}}{\text{año}}$$

*Generacion electrica con metano (kWh)*

$$= 5,85 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3 \text{ metano}} \times 1.461.761 \frac{\text{m}^3 \text{ metano}}{\text{año}} = 8.551.299 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}$$

$$\begin{aligned} \text{Energia requerida planta (kWh)} &= 22 \frac{\text{kWh}}{\text{ton RFF}} \times 120.000 \frac{\text{ton RFF}}{\text{año}} \\ &= 2.640.000 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \end{aligned}$$

$$\text{Energia para la venta (kWh)} = 8.551.299 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} - 2.640.000 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} = 5.911.299 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}$$

$$\text{Ingreso venta energia (\$COP)} = 5.911.299 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \times \frac{\$320}{\text{kWh}} = \$ 1.891.615.774$$

ANEXO J  
PRECIOS VENTA DE ENERGÍA EPSA



# INFORMACIÓN SOBRE TARIFAS

Enero 16 de 2017



EMPRESA DE ENERGIA DEL PACIFICO S.A. E.S.P. informa a sus clientes regulados conectados a sus redes, en el VALLE DEL CAUCA, las tarifas de prestación del servicio de energía eléctrica vigentes, calculadas con base en las resoluciones CREG 03487 y 11907(Fórmula Tarifaria), 10300 (Cargos Uso STR), 01907(PP), 01006(FC), 05808 y 13413(Cargos ADD), 00766(Costo base Comercialización), 03606(Garantías Financieras), 097 y 13303(Metodología cargos uso STR SDL), 03410(Cargos uso STR SDL), 18610(Subsidios estratos 1-2) y Resoluciones UPME 005504 y 01300(consumo subsidencia).

## 1. TARIFAS PARA EL MERCADO RESIDENCIAL (\$/kWh)

S: Consumo de Subsidencia es 173 kWh/mes en municipios con altura inferior a 1000 msnm y 130 kWh/mes en otros. En barrios subnormales, CS es 184 kWh/mes en municipios con altura inferior a 1000 msnm y 138 kWh/mes en otros.

### Mercado EPSA

Estrato	PROPIEDAD DE EPSA		PROPIEDAD DEL CLIENTE	
	CU1 0-CS (\$/kWh)	Consumo Mayor a CS (\$/kWh)	CU1 sin Inv. 0-CS (\$/kWh)	Consumo Mayor a CS (\$/kWh)
1	209.48	471.91	191.88	427.75
2	261.83	471.91	239.57	427.75
3	401.12	471.91	383.59	427.75
4	471.91	471.91	427.75	427.75
5 y 6	568.20	568.20	513.30	513.30

Barrios subnormales: el costo de la energía subsidiada es \$177,68 /kWh y \$408,35 /kWh para consumo restante. Mediciones comunitarias en tensión 2 y estrato 1 : el costo de la energía subsidiada \$162,5 /kWh y para el resto es \$379,49 /kWh.

## TARIFAS PARA EL MERCADO NO RESIDENCIAL (\$/kWh)

A los clientes sujetos al pago de contribución de solidaridad se les aplicará un porcentaje sobre estas tarifas así:  
 20% Clientes comerciales e industriales con Contribución  
 10% Empresas de acueducto y alcantarillado  
 0% Clientes exentos de contribución

	Periodo	Tensión 1		Tensión 2	Tensión 3
		CU1 (\$/kWh)	CU1 sin Inv. (\$/kWh)	CU2 (\$/kWh)	CU3 (\$/kWh)
SENCILLA	00:00 a 24:00	471.91	427.75	---	---
DOBLE	HORA PICO	474.19	430.03	381.39	340.04
	Horas Restantes	471.13	428.97	378.85	337.54
HORARIA Y TRIPLE	MAX	474.19	430.03	381.39	340.04
	MED	471.88	427.72	379.49	338.17
	MIN	468.58	424.39	376.64	335.36


## 2. COMPONENTES DEL COSTO UNITARIO DE PRESTACIÓN DEL SERVICIO CU

Nivel de Tensión	G	T	PR	D	R	C	CU
CU1 con Inv.	159.30	29.56	30.52	164.45	20.31	67.78	471.91
CU1 sin Inv.	159.30	29.56	30.52	120.29	20.31	67.78	427.75
CU2	159.30	29.56	10.68	91.87	20.31	67.78	379.49
CU3	159.30	29.56	8.84	52.39	20.31	67.78	338.17



ANEXO K  
REQUISITOS ESPECIFICOS PARA FERTILIZANTES O ABONOS ORGANICOS

Fertilizantes o abonos orgánicos, orgánico minerales y enmiendas orgánicas															
Fertilizantes o abonos orgánicos.															
Clasificación del producto	Indicaciones relacionadas con la obtención y los componentes principales	Parámetros a caracterizar	Parámetros a garantizar (en base húmeda)												
1	2	3	4												
Abono orgánico	Producto sólido obtenido a partir de la estabilización de residuos de animales, vegetales o residuos sólidos urbanos (separados en la fuente) o mezcla de los anteriores, que contiene porcentajes mínimos de materia orgánica expresada como carbono orgánico oxidable total y los parámetros que se indican.	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Pérdidas por volatilización %</li> <li>* Contenido de cenizas máximo 60%</li> <li>* Contenido de humedad:               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Para materiales de origen animal, máximo 20%</li> <li>- Para materiales de origen vegetal, máximo 35%</li> <li>- Para mezclas, el contenido de humedad estará dado por el origen del material predominante.</li> </ul> </li> <li>* Contenido de carbono orgánico oxidable total mínimo 15%.</li> <li>* N1P2O5 Y K2O totales (declararlos si cada uno es mayor de 1%)</li> <li>* Relación C/N</li> <li>* Capacidad de intercambio catiónico, mínimo 30 cmol(+) Kg (meq/100g)</li> <li>* Capacidad de retención de humedad, mínimo su propio peso.</li> <li>* pH mayor de 4 y menor de 9</li> <li>* Densidad máximo 0,6 g/cm3</li> <li>* Límites máximos en mg/Kg (ppm) de los metales pesados expresados a continuación.               <table style="margin-left: 20px; border: none;"> <tr><td>Arsénico (As)</td><td>41</td></tr> <tr><td>Cadmio (Cd)</td><td>39</td></tr> <tr><td>Cromo (Cr)</td><td>1 200</td></tr> <tr><td>Mercurio (Hg)</td><td>17</td></tr> <tr><td>Níquel (Ni)</td><td>420</td></tr> <tr><td>Plomo (Pb)</td><td>300</td></tr> </table> </li> <li>* Se indicará la materia prima de la cual procede el producto.</li> </ul>	Arsénico (As)	41	Cadmio (Cd)	39	Cromo (Cr)	1 200	Mercurio (Hg)	17	Níquel (Ni)	420	Plomo (Pb)	300	<ul style="list-style-type: none"> <li>Contenido de carbonoorgánico oxidable total (%C)</li> <li>Humedad máxima (%)</li> <li>Contenido de Cenizas (%)</li> <li>Capacidad de intercambio catiónico (cmol(+)/Kg-1) (meq/100g)</li> <li>Capacidad de Retención de Humedad (%) pH</li> <li>Contenido de Nitrogeno Total (%N)</li> <li>Densidad (g/cm3)</li> </ul>
Arsénico (As)	41														
Cadmio (Cd)	39														
Cromo (Cr)	1 200														
Mercurio (Hg)	17														
Níquel (Ni)	420														
Plomo (Pb)	300														
		* La suma de estos parámetros debe ser 100													


 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2016

## AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL LUMIERES




Nosotros Andrés Felipe Pérez Plata y María Camila Ríos Arredondo en calidad de titulares de la obra DISEÑO CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA LA PLANTA EXTRACTORA DE ACEITE DE PALMA DE LA EMPRESA CI SIGRA S.A, elaborada en el año 2017 , autorizamos al **Sistema de Bibliotecas de la Fundación Universidad América** para que incluya una copia, indexe y divulgue en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres, la obra mencionada con el fin de facilitar los procesos de visibilidad e impacto de la misma, conforme a los derechos patrimoniales que nos corresponden y que incluyen: la reproducción, comunicación pública, distribución al público, transformación, en conformidad con la normatividad vigente sobre derechos de autor y derechos conexos (Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, entre otras).

Al respecto como Autores manifestamos conocer que:

- La autorización es de carácter no exclusiva y limitada, esto implica que la licencia tiene una vigencia, que no es perpetua y que el autor puede publicar o difundir su obra en cualquier otro medio, así como llevar a cabo cualquier tipo de acción sobre el documento.
- La autorización tendrá una vigencia de cinco años a partir del momento de la inclusión de la obra en el repositorio, prorrogable indefinidamente por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales del autor y podrá darse por terminada una vez el autor lo manifieste por escrito a la institución, con la salvedad de que la obra es difundida globalmente y cosechada por diferentes buscadores y/o repositorios en Internet, lo que no garantiza que la obra pueda ser retirada de manera inmediata de otros sistemas de información en los que se haya indexado, diferentes al Repositorio Digital Institucional – Lumieres de la Fundación Universidad América.
- La autorización de publicación comprende el formato original de la obra y todos los demás que se requiera, para su publicación en el repositorio. Igualmente, la autorización permite a la institución el cambio de soporte de la obra con fines de preservación (impreso, electrónico, digital, Internet, Intranet, o cualquier otro formato conocido o por conocer).
- La autorización es gratuita y se renuncia a recibir cualquier remuneración por los usos de la obra, de acuerdo con la licencia establecida en esta autorización.
- Al firmar esta autorización, se manifiesta que la obra es original y no existe en ella ninguna violación a los derechos de autor de terceros. En caso de que el trabajo haya sido financiado por terceros, el o los autores asumen la responsabilidad del cumplimiento de los acuerdos establecidos sobre los derechos patrimoniales de la obra.
- Frente a cualquier reclamación por terceros, el o los autores serán los responsables. En ningún caso la responsabilidad será asumida por la Fundación Universidad de América.
- Con la autorización, la Universidad puede difundir la obra en índices, buscadores y otros sistemas de información que favorezcan su visibilidad.

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2016

Conforme a las condiciones anteriormente expuestas, como autores establecemos las siguientes condiciones de uso de nuestra obra de acuerdo con la licencia **Creative Commons** que se señala a continuación:

	<b>Atribución- no comercial- sin derivar:</b> permite distribuir, sin fines comerciales, sin obras derivadas, con reconocimiento del autor.
X 	<b>Atribución – no comercial:</b> permite distribuir, crear obras derivadas, sin fines comerciales con reconocimiento del autor.
	<b>Atribución – no comercial – compartir igual:</b> permite distribuir, modificar, crear obras derivadas, sin fines económicos, siempre y cuando las obras derivadas estén licenciadas de la misma forma.

Licencias completas: [http://co.creativecommons.org/?page\\_id=13](http://co.creativecommons.org/?page_id=13)

Siempre y cuando se haga alusión de alguna parte o nota del trabajo, se debe tener en cuenta la correspondiente citación bibliográfica para darle crédito al trabajo y a sus autores.

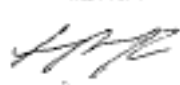
De igual forma como autores autorizamos la consulta de los medios físicos del presente trabajo de grado así:

AUTORIZO (AUTORIZAMOS)	SI	NO
La consulta física (sólo en las instalaciones de la Biblioteca) del CD-ROM y/o Impreso	X	
La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer para efectos de preservación	X	

Información Confidencial: este Trabajo de Grado contiene información privilegiada, estratégica o secreta o se ha pedido su confidencialidad por parte del tercero, sobre quien se desarrolló la investigación. En caso afirmativo expresamente indicaremos, en carta adjunta, tal situación con el fin de que se respete la restricción de acceso.	SI	NO
		X

Para constancia se firma el presente documento en Bogotá, a los 19 días del mes de febrero del año 2018.

#### LOS AUTORES:

<b>Autor 1</b> <b>Nombres</b> Andrés Felipe <b>Documento de Identificación No</b> 1019112302	<b>Apellidos</b> Pérez Plata <b>Firma</b> 
<b>Autor 2</b> <b>Nombres</b> María Camila <b>Documento de Identificación No</b> 1010227052	<b>Apellidos</b> Rios Arredondo <b>Firma</b> 