

PROPUESTA DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL
INDUSTRIAL EN EL PROCESO DE ELABORACIÓN DE LA PANELA EN LA
EMPRESA DOÑA PANELA LTDA.

KEVIN STEVAN AMADOR BÁEZ
HAROLD RANGEL CALDERÓN

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2019

PROPUESTA DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL
INDUSTRIAL EN EL PROCESO DE ELABORACIÓN DE LA PANELA EN LA
EMPRESA DOÑA PANELA LTDA.

KEVIN STEVAN AMADOR BÁEZ
HAROLD RANGEL CALDERÓN

Proyecto Integral de grado para optar el título de:
INGENIERO QUÍMICO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2019

Nota De Aceptación

Ing. Alexander Jiménez Rodríguez

Ing. Oscar Libardo Lombana Charfuelán

Bogotá, D.C. octubre de 2019.

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos.

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Decano Facultad de Ingenierías

Ing. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI

Director del Programa de Ingeniería Química.

Ing. LEONARDO DE JESUS HERRERA GUTIERREZ

Las directivas de la Fundación 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 través de estos años de estudios, primero gracias a Dios, por darme la oportunidad de culminar este largo y arduo proceso académico, a pesar de todos los obstáculos que se presentaron en el camino, conté con su bendición en todo momento, alcanzando este logro, que representa un sueño cumplido y, es un peldaño en la escalera de sueños que día a día se van materializado. Agradecimientos infinitos a mi María E; que, con valentía, sacrificio, entrega y un amor incondicional, ha logrado formar al ser que soy hoy. Sin ella absolutamente nada hubiera sido posible. Faltan las palabras para demostrar mi gratitud y amor... por ti mamá. A mi tía Yolanda Rojas, a mis hermanos, en especial a mi hermano/papá Felipe; son personas con las cuales conté y cuento en todo momento y lugar, hicieron parte de este proceso y mi gratitud para ellos. A Laura Cortés, mi novia, le agradezco cada instante que estuvo conmigo en este proceso, ayudándome, orientándome, escuchándome y darme cada vez más energía para salir adelante. A Harold Rangel, mi compañero de tesis, gracias a por todo lo que convivimos y construimos en este proyecto, a pesar de cualquier y llegamos acá colega

Kevin Stevan Amador Báez.

Este proyecto es dedicado primeramente a Dios, quien fue el que permitió materializar lo que un día fue un sueño en una realidad, a mis padres Harold Rangel Hernández y Martha Lucia Calderón Gómez que siempre creyeron en mí, a pesar de todas las dificultades que se presentaron a lo largo de mi carrera y mi vida, e indudablemente a mis abuelos Eliseo Calderón Calderón, Margarita Gómez de Calderón y Cecilia Hernández Vda. De Rangel, que me apoyaron e incentivaron a cumplir mis metas, enseñándome que toda meta requiere un esfuerzo y alcanzarlo necesita de un sacrificio. El conocimiento aquí plasmado y el esfuerzo con el que se elaboró este documento es símbolo de agradecimiento a estas personas y siempre quedare en deuda por darme el privilegio de la educación. Finalmente, a mi compañero de tesis, Stevan Amador por ser paciente en todas las situaciones de adversidad, su conocimiento y dedicación aquí expresados fueron piezas claves para lograr este título.

Harold Rangel Calderón.

CONTENIDO	pág.
RESUMEN	18
INTRODUCCIÓN	19
OBJETIVOS	20
1 MARCO TEÓRICO	21
1.1 AGUAS RESIDUALES	21
1.2 CLASIFICACIÓN AGUAS RESIDUALES	21
1.3 TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES	22
1.3.1 Tratamientos Preliminares	22
1.3.2 Tratamientos Primarios	24
1.3.3 Tratamientos Secundarios y/o biológicos	28
1.3.4 Tratamientos Terciarios	31
1.4 MARCO LEGAL	31
2. DIAGNOSTICO	33
2.1 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA	33
2.1.1 Descripción del proceso productivo	34
2.2 BALANCE HIDRICO	42
2.2.1 Redes de agua	43
2.2.2 Consumo de agua	43
2.2.2.1 Cadena de custodia	45
2.2.2.2 Consumo en el área productiva	46
2.2.2.3 Consumo de agua residual doméstica	46
2.2.2.4 Consumo agua industrial	47
2.3 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL	49
3. SELECCIÓN DE LA PROPUESTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES A NIVEL LABORATORIO	53

3.1 MÉTODO DE SELECCIÓN	53
3.1.1 Coagulación y floculación	53
3.1.2 Electrocoagulación	55
3.1.3 Lodos activados sistema convencional	56
3.2 SELECCIÓN DEL TIPO DE TRATAMIENTO	58
3.2.1 Criterios de selección	59
3.2.1.1 Costos de implementación (C1)	59
3.2.1.2 Reducción de parámetros (C2)	59
3.2.1.3 Estabilidad del sistema de tratamiento (C3)	59
3.2.1.4 Mantenimiento y Control operativo del STAR (C4)	60
3.2.2 Matriz de pares	60
3.2.3 Relación de importancia del tipo de tratamiento respecto a los criterios de selección	61
3.2.4 Matriz de selección del tipo de tratamiento	62
4. ANALISIS DE LOS METODOS SELECCIONADOS	63
4.1 COAGULACION/ FLOCULACION	63
4.1.1 Variables que afectan la Coagulación / Floculación.	63
4.1.1.1 Coagulantes	63
4.1.1.2 pH	68
4.1.1.3 Turbiedad	68
4.1.1.4 Agitación	68
4.1.1.5 Dosificación de coagulante	68
4.1.2 Metodología	69
4.1.2.1 Test de jarras	71
4.1.2.2 Preparación de coagulante	73
4.1.2.3 Análisis de resultados	76
4.2 ELECTROCOAGULACION	76
4.2.1 pH	77
4.2.2 Electroodos	77
4.2.3 Tiempo de retención	78
4.2.4 Densidad de corriente	78

4.2.5 Conductividad	78
4.3 PARAMETROS DE OPERACIÓN ELECTROCOAGULACIÓN	79
4.3.1 Montaje a escala laboratorio	81
4.4 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	84
4.4.1 Diseño de experimentos	84
4.4.1.1 Fase experimental 1	85
4.4.1.2 Fase experimental 2	87
4.4.1.3 Fase experimental 3	90
5. DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS	97
5.1 TRAMPA DE GRASAS	97
5.1.1 Volumen de la trampa	98
5.1.2 Área superficial	99
5.1.3 Ancho de la trampa de grasas	99
5.2 DISEÑO DE REACTOR	100
5.2.1 Dimensiones de los reactores	103
5.2.1.1 Material del reactor	105
5.2.2 Dimensiones de los electrodos	105
5.2.2.1 Material de electrodos	108
5.2.2.2 Número de electrodos	109
5.2.3 Bombas	109
5.2.4 Filtro de carbón activado	110
6. ANALISIS FINANCIERO DE LOS COSTOS DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES SELECCIONADO	111
6.1 CÁLCULO DE INVERSION	111
6.1.1 Costos Directos	111
6.1.2 Costos indirectos	112
6.2 EGRESOS	113
6.2.1 Depreciación	113
6.2.2 Mano de obra	114
6.2.3 Calculo de energía requerida	114

6.3 MULTAS	115
6.4 RELACIÓN BENEFICIO – COSTO (B/C)	116
7. CONCLUSIONES	118
8. RECOMENDACIONES	119
REFERENCIAS	120
ANEXOS	125

LISTADO DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Objetivo de los procesos de pretratamiento.	23
Cuadro 2. Coagulantes más utilizados en tratamiento de aguas	26
Cuadro 3. Principales procesos de tratamiento biológico	30
Cuadro 4. Ventajas y desventajas del método de coagulación/ floculación	54
Cuadro 5. Ventajas y desventajas del proceso de Electrocoagulación	56
Cuadro 6. Ventajas y desventajas de lodos activados, sistema convencional	57
Cuadro 7. Propiedades de los coagulantes seleccionados	67
Cuadro 8. Condiciones estándar para el test de jarras	71
Cuadro 9. Índice de Willcomb	72
Cuadro 10. Características de electrodos	77
Cuadro 11. Dimensionamiento de celda y electrodos	80
Cuadro 12. Características fuente de alimentación	82

LISTADO DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos, artículo 12 de la resolución 0631 del 2015.	32
Tabla 2. Estado de madurez de la caña de azúcar.	35
Tabla 3. Tamaños y tipos de empaques.	39
Tabla 4. Caracterización agua residual del proceso de elaboración de panela.	50
Tabla 5. Escala de valores de matrices de priorización.	59
Tabla 6. Determinación de los factores de ponderación.	60
Tabla 7. Importancia (porcentual) de los criterios de selección.	61
Tabla 8. Tipo de tratamiento en relación con los criterios de selección.	61
Tabla 9. Matriz de selección del tipo de tratamiento.	62
Tabla 10. Determinación de factores de ponderación coagulantes.	64
Tabla 11. Importancia porcentual de los coagulantes seleccionados.	65
Tabla 12. Tipo de coagulante en relación con los criterios de selección.	65
Tabla 13. Matriz de selección de coagulantes.	66
Tabla 14. Parámetros iniciales del agua residual industrial.	71
Tabla 15. Coagulante Sulfato de aluminio.	73
Tabla 16. Coagulante Cloruro férrico.	74
Tabla 17. Coagulante policloruro de aluminio (PAC).	75
Tabla 18. Factores y niveles experimentación 1.	85
Tabla 19. Resultados fase experimental 1; intensidad de corriente 12 Voltios.	86
Tabla 20. Datos promedio fase experimental 1.	86
Tabla 21. Factores y niveles experimentación 2.	88
Tabla 22. Resultados fase experimental 2; intensidad de corriente 15 Voltios.	88
Tabla 23. Datos promedio fase experimental 2.	89
Tabla 24. Factores y niveles experimentación 3.	90
Tabla 25. Resultados fase experimental 3; intensidad de corriente 20 Voltios.	91
Tabla 26. Datos promedio fase experimental 3.	91
Tabla 27. Porcentajes de remoción de pH, Turbidez y DQO.	96
Tabla 28. Factores de diseño de la trampa de grasas.	98
Tabla 29. Dimensiones de electrodos.	107
Tabla 30. Cálculo costos directos.	112
Tabla 31. Cálculo costos indirectos.	112
Tabla 32. Depreciación de equipos.	113
Tabla 33. Cálculo mano de obra.	114

LISTADO DE ILUSTRACIONES

	pág.
Ilustración 1. Diagrama de flujo del proceso de aireación por pasos de lodo activado.	29
Ilustración 2. Diagrama de flujo del proceso de elaboración de la panela.	41
Ilustración 3. Diagrama de bloque del balance hídrico global.	42
Ilustración 4. Diagrama de Balance hídrico.	49
Ilustración 5. Proceso de Coagulación/Floculación.	54
Ilustración 6. Proceso de Electrocoagulación.	55
Ilustración 7. Esquema de la técnica de lodos activados sistema convencional.	57
Ilustración 8. Diagrama metodología del desarrollo experimental.	70
Ilustración 9. Proceso metodológico de electrocoagulación.	83
Ilustración 10. Diagrama de flujo sistema de tratamiento de agua residual.	97
Ilustración 11. Dimensionamiento de trampa de grasas	100
Ilustración 12. Proceso de electrocoagulación.	101
Ilustración 13. Diseño del reactor.	105
Ilustración 14. Dimensiones electrodo.	108
Ilustración 15. Flujo de caja libre.	116

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Caudal diario consumido.	46
Ecuación 2. Cálculo de caudal de agua residual doméstica.	47
Ecuación 3. Principio de conservación de la materia.	47
Ecuación 4. Cálculo de balance hídrico por caudales.	48
Ecuación 5. Factor de Ponderación.	60
Ecuación 6. Porcentaje de remoción de turbidez.	72
Ecuación 7. Número de ensayos fase experimental 1.	85
Ecuación 8. Volumen de trampa de grasas.	98
Ecuación 9. Área Superficial de la trampa de grasas.	99
Ecuación 10. Cálculo ancho trampa de grasas.	99
Ecuación 11. Volumen total de agua a tratar.	102
Ecuación 12. Volumen de reactor.	103
Ecuación 13. Relación nivel del agua-ancho.	105
Ecuación 14. Ancho de los electrodos.	106
Ecuación 15. Relación espacio bajo el borde inferior-nivel del agua.	106
Ecuación 16. Relación espacio sobre el borde - nivel del agua.	107
Ecuación 17. Altura de electrodos.	107
Ecuación 18. Cálculo del número de electrodos.	109
Ecuación 19. Cálculo depreciación.	113
Ecuación 20. Cálculo de energía requerida.	114
Ecuación 21. Cálculo relación Beneficio - Costo.	116

LISTADO DE GRAFICOS

	pág.
Gráfico 1. Consumo total de agua (m3) del 2017 y 2018.	44
Gráfico 2. Aforo in situ caja de inspección Doña Panela LTDA.	45
Gráfico 3. pH VS. Tiempo. Con intensidad de corriente de 12 V.	87
Gráfico 4. Turbidez VS Tiempo, con intensidad de corriente de 15 V.	89
Gráfico 5. DQO vs Tiempo, con intensidad de corriente de 20 V.	92
Gráfico 6. pH VS. Tiempo. Con intensidad de corriente de 12, 15 y 20 V.	93
Gráfico 7. Turbidez VS Tiempo, con intensidades de corriente de 12, 15 y 20 V.	94
Gráfico 8. DQO vs Tiempo, con intensidad de corriente de 12, 15 y 20 V.	95

GLOSARIO

AGUA RESIDUAL: residuo hídrico proveniente de actividades domésticas, comerciales y/o industriales. Se caracterizan por contener compuestos orgánicos, inorgánicos, residuos sólidos y agentes contaminantes.

ANODO: material que cuando es energizado al polo positivo de una fuente de poder. Cede electrones generando una reacción de oxidación, lo cual genera en el mismo un aumento de su estado de oxidación. La polaridad del ánodo depende de la conexión que se realice a la fuente. ¹

CATODO: material cuya conexión a la fuente de energía se encuentra en el polo negativo, recibiendo los iones cargados cedidos por el ánodo. La polaridad del cátodo depende del tipo de conexión que se realice a la fuente de poder.²

DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO: parámetro mediante el cual se permite calcular la cantidad de oxígeno consumida por los microorganismos en condiciones aerobias en un periodo de cinco (5) días a 20°C.³

DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO: parámetro mediante el cual se permite calcular la cantidad de oxígeno requerido para oxidar materia orgánica de una muestra de agua específica manteniendo condiciones controladas.⁴

FLOCS: consiste en la aglomeración de partículas coloides que fueron desestabilizadas en el proceso de coagulación, formando otras de mayor tamaño y peso molecular. ⁵

¹Wikiwand. [en línea]. [consultado el 01 octubre de 2019]. Disponible en: <http://www.wikiwand.com/es/%C3%81nodo>

² ITZIAR VARELA. ¿Qué son el ánodo y el cátodo? [en línea]. [consultado el 01 de octubre de 2019]. Disponible en: <https://www.lifeder.com/anodo-y-catodo/>

³ IDEAM. Demanda Bioquímica de oxígeno 5 días, incubación y electrometría. [en línea]. [consultado el 01 de octubre de 2019]. Disponible en: [http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Bioqu%C3%ADmica+de+Ox%C3%A](http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Bioqu%C3%ADmica+de+Ox%C3%A4Dgeno..pdf/ca6e1594-4217-4aa3-9627-d60e5c077df)

⁴ IDEAM. Demanda Química de oxígeno por reflujo cerrado y volumetría. [en línea]. [consultado el 01 de octubre de 2019]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Qu%C3%ADmica+de+Ox%C3%ADg eno.pdf/20030922-4f81-4e8f-841c-c124b9ab5ad>.

⁵ RESTREPO OSORNO. Hernán Alonso. Evaluación del proceso de coagulación – floculación de una planta de tratamiento de agua potable. [en línea]. [consultado el 01 de octubre de 2019]. Disponible en: http://www.bdigital.unal.edu.co/877/1/15372239_2009.pdf

ELECTROCOAGULACION: proceso de tratamiento de aguas residuales no convencional, el cual basa su principio de desestabilización de partículas haciendo uso de la corriente eléctrica para generar una oxidación del medio, con el objetivo de precipitar contaminantes disueltos en el agua a tratar.

RESUMEN

Durante el proceso de elaboración de la panela se alteran propiedades fisicoquímicas de los cuerpos de agua que son utilizados dentro de este, los cuales, presentan problemas ambientales, afectando el ecosistema en el que se vierten estas aguas residuales industriales, generando problemas legales a la compañía. Por tal razón, este proyecto tiene como finalidad plantear una propuesta de un sistema de tratamiento de agua residual industrial proveniente del proceso de elaboración de la panela, buscando disminuir las cargas contaminantes presentes en el efluente, generado por la empresa Doña Panela LTDA.

Para desarrollar esta propuesta, inicialmente se realizó un análisis fisicoquímico del agua proveniente del proceso de elaboración de la panela, por medio del cual, se caracterizó el estado del efluente. Seguido de esto, se plantearon tres alternativas de tratamiento: coagulación/floculación, electrocoagulación y lodos activados. Las cuales se evaluaron por medio de una matriz de selección de criterios y se escogieron las dos mejores alternativas: coagulación/floculación y electrocoagulación, respectivamente.

Mediante el desarrollo experimental a escala laboratorio del proceso de coagulación/floculación, se seleccionó el policloruro de aluminio (PAC) como mejor coagulante para este proceso, a una concentración del 10% y una dosificación del 200 ppm; mostrando reducción de turbidez y DQO en un 19.75% (67.45 NTU) y 11.25% (2210 mg/L) respectivamente. En cuanto al proceso de electrocoagulación, evaluado a escala laboratorio, se determinó que la combinación más eficiente de factores es: Tiempo de retención 30 minutos y, con intensidad de corriente constante de 15 Voltios, se obtuvo una remoción de las cargas contaminantes, donde la DQO presentó una reducción del 40,97% registrando el valor de 1619 mg/L y la turbidez se redujo 81.94 % registrando una cifra de 15,49 NTU. Para este proyecto se definió que el mejor proceso de remoción de contaminantes para el agua residual proveniente del proceso de elaboración de la panela es el de electrocoagulación.

Es importante resaltar que el sistema de electrocoagulación presentó reducciones de contaminantes significativas en cuanto a los parámetros iniciales evaluados. Sin embargo, al comparar los resultados obtenidos con la normatividad legal vigente (Resolución 0631 de 2015) no se logró dar el cumplimiento requerido a estos.

Palabras clave: Efluente, aguas residuales, coagulación/floculación, electrocoagulación, panela, DQO, turbidez, remoción

INTRODUCCIÓN

El proceso de producción de la panela se compone de las siguientes etapas: cultivo de caña de azúcar, recepción de materia prima, almacenamiento de materia prima, tamizado, pesaje de panela, mezclado, pasa mezcla, troquelado-moldeo, horneodeshidratado, enfriado, empaque, termoencogible, embalaje. Con consumo de agua aproximado de 6,5 m³/día-7,5 m³/día en jornada laboral de 8 horas. Este consumo se da en las siguientes etapas del proceso productivo: mezclado, troquelado-moldeo, enfriado y empaque; en esta última es donde se lleva a cabo el mayor consumo de agua, puesto que el agua es usada como servicio, para la limpieza de instalaciones, equipos y herramientas usadas durante el proceso de empaque. Como consecuencia, se alteran propiedades fisicoquímicas del efluente que sale por el proceso, como lo son: pH, temperatura, demanda biológica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos disueltos y turbidez. Al momento de verter el efluente sin un control y manejo previo al alcantarillado o al lugar en el que se desechen, puede ocasionar un impacto negativo ambiental en los ecosistemas cercanos y, además, tener inconvenientes con los entes de control. Este tipo de industria presenta incumplimientos en varios parámetros, conforme lo dice la ley, en este caso este tipo de efluentes se rigen por el Decreto 0631 de 2015.

Esta problemática se da por varios motivos. Los principales son: desperdicio y generación de efluentes con alta carga contaminante en el proceso de producción de la panela, uso de agua para limpieza de maquinaria, herramientas y áreas de trabajo, los residuos sólidos que se cuelan en el proceso (bagazo), el estado inapropiado de las tuberías, ya que aumenta la carga contaminante de los cuerpos de agua que son depositados en el alcantarillado público local o en una quebrada cercana. Todos estos inconvenientes hacen que no se realice una correcta disposición de las aguas residuales industriales, generando así problemas de carácter ambiental, financiero y legal para la compañía, todo esto basado en el Decreto 0631 de 2015, el cual dice cómo deben estar estos efluentes antes de ser depositados en el alcantarillado o en el lugar que escoja la empresa.

Esta propuesta tiene como finalidad disminuir la carga contaminante en los parámetros importantes de las aguas residuales industriales (DBO, DQO, pH, sólidos suspendidos totales, aceites y grasas) de la empresa DOÑA PANELA LTDA en la planta de producción, para de esta forma se logre el cumplimiento del Decreto 0631 de 2015.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una propuesta de un sistema de tratamiento de aguas en el proceso de elaboración de panela en la empresa DOÑA PANELA LTDA.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diagnosticar el estado actual de las aguas residuales del proceso de elaboración de la panela.
- Determinar el sistema de tratamiento de aguas residuales de manera experimental.
- Definir las especificaciones del sistema de tratamiento de aguas residuales seleccionado a nivel laboratorio.
- Realizar el análisis financiero de los costos del sistema de tratamiento de aguas residuales seleccionado.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 AGUAS RESIDUALES

Las aguas residuales son aquellos tipos de agua que han sido tratadas de alguna manera por el ser humano y, en consecuencia, trae efectos negativos en los cuerpos de agua manipulados.⁶ Estas aguas también conocidas como aguas negras o cloacales, generan un residuo el cual afecta al entorno de seres vivos que la rodea. Este tipo de aguas son controladas por el gobierno según las leyes locales vigentes. Para Colombia, estos vertimientos se rigen por la Resolución 0631 de 2015, que controla las propiedades fisicoquímicas alteradas en los cuerpos de agua, estos aspectos pueden ir desde pH, alcalinidad, grasas y aceites, Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), entre otros.

1.2 CLASIFICACIÓN AGUAS RESIDUALES

Las aguas residuales son clasificadas de la siguiente manera, según Romero⁷

- Aguas Residuales domésticas (ARD): líquidos provenientes de viviendas o residencias, edificios comerciales e institucionales.
- Aguas Residuales Municipales o Urbanas (ARU): son residuos líquidos transportados por el alcantarillado de una ciudad o población y tratados en una planta de tratamiento municipal.
- Aguas Residuales Industriales (ARI): residuos líquidos provenientes de las descargas de industrias de manufactura.
- Aguas Negras: residuos líquidos provenientes de inodoros, es decir, transportan excrementos humanos y orina.
- Aguas Grises: residuos líquidos provenientes de tinas, duchas, lavamanos y lavadoras.

Las aguas residuales industriales (ARI) son clasificadas de la siguiente manera según la Resolución 0631 de 2015⁸:

⁶ Arriols, Enrique. Qué son las aguas residuales y cómo se clasifican. Ecología verde [en línea], 6 de agosto de 2018 [consultado el 4 de marzo de 2019]. Disponible en internet: <https://www.ecologiaverde.com/que-son-las-aguas-residuales-y-como-se-clasifican-1436.html>

⁷ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Tratamiento De Aguas Residuales: Teoría y Principios De Diseño. 3 ed. Bogotá D.C.: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2008. p. 17

⁸ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 0631 (17, marzo, 2015). Por 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 y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C.: El ministerio, 2015. p. 62

- Aguas Residuales Domésticas (ARD): son las procedentes de los hogares, así como de las instalaciones donde se desarrollan actividades comerciales, industriales o de servicios y que correspondan a:
 1. Descargas de los retretes y registros sanitarios.
 2. Descarga de los sistemas de aseo personal (duchas y lavamanos), de las áreas de cocinas y cocinetas, de las pocetas de lavado de elementos de aseo y lavado de paredes y pisos y del lavado de ropa (No se incluyen las de los servicios de lavandería industrial).
- Aguas Residuales no Domésticas (ARnD): son las procedentes de actividades industriales, comerciales o de servicios distintas a las que constituyen aguas residuales domésticas (ARD).

1.3 TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES

Los tratamientos de aguas residuales industriales son métodos con los cuales se buscan la disminución y/o reducción de las cargas contaminantes físicas, químicas, biológicas y bioquímicas presentes en los cuerpos de agua manipulados durante el proceso productivo⁹. Estos métodos tienen la finalidad de evitar daños en los sistemas de alcantarillado público y demás abastecimientos de agua aledaños, daños a la agricultura y la afectación negativa de las tierras y no tener impacto ambiental negativo en el entorno ecológico.

1.3.1 Tratamientos Preliminares. Son aquellos que tienen como función principal retirar partículas de gran tamaño presentes en el efluente, que pueden ocasionar deficiencias en los tratamientos posteriores de tratamiento. Mediante procesos de acción física o mecánica para evitar el deterioro o avería de instalaciones y equipos. Además, con estos tratamientos preliminares, también conocidos como pretratamientos, se busca remover la mayor cantidad de residuos sólidos como: grasas, aceites, arcillas y partículas de gran tamaño que serían atrapadas en las mallas.¹⁰

En el cuadro 1 se muestra los procesos que se realizan en la etapa de pretratamientos y la funcionalidad de cada uno de ellos.

⁹Fibras y Normas de Colombia S.A.S. Aguas residuales: clasificación y características. Fibras & Normas de Colombia S.A.S. [en línea], 30 de noviembre de 2018 [consultado 14 de marzo de 2019]. Disponible en internet: <https://www.fibrasynormasdecolombia.com/terminos-definiciones/aguas-residuales-clasificacion-y-caracteristicas/>.

¹⁰ Ibid.

Cuadro 1. Objetivo de los procesos de pretratamiento.

PROCESO	OBJETIVO
Rejas o tamices	Eliminación de sólidos gruesos
Trituradores	Reducción de tamaño de partícula de sólidos
Desarenadores	Eliminación de arenas y gravilla
Desengrasadores	Eliminación de aceites y grasas
Preaeración	Control de olor y mejoramiento del comportamiento hidráulico

Fuente: ROJAS, Ricardo. Curso Internacional “Gestión Integral de Tratamiento de Aguas Residuales. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. 2002. P. 12.

- a) **Rejillas o Cribado:** Este método consiste en la retención de sólidos gruesos suspendidos presentes en el efluente. Este pretratamiento se lleva a por medio de rejas o rejillas metálicas ubicadas de manera paralela y equidistantes entre ellas. Estas rejillas pueden ser de limpieza manual (gruesas) o limpieza mecánica (finas).¹¹ Las cribas para las gruesas permiten el paso de sólidos entre los 50-100 mm; mientras que las finas tienen un rango de paso de 10-25mm¹².
- b) **Triturado:** También conocidos como diceladores tienen como funcionalidad el realizar cortes en trozos pequeños de los sólidos que pasen a través de él. Existen dos equipos para llevar a cabo esta operación unitaria: cortadores y moledores. El principio de estos equipos es un cilindro el cual tiene en su exterior unos peines giratorios que se mueven por canales y trituran los sólidos.¹³

¹¹Fibras y Normas de Colombia S.A.S. Aguas residuales: clasificación y características. Fibras & Normas de Colombia S.A.S. [en línea], 30 de noviembre de 2018 [consultado 14 de marzo de 2019]. Disponible en internet: <https://www.fibrasynormasdecolombia.com/terminos-definiciones/aguas-residuales-clasificacion-y-caracteristicas>.

¹² ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Tratamiento De Aguas Residuales: Teoría y Principios De Diseño., op. cit, p 287-290.

¹³ BAILÓN DÍAZ, Pedro. Estudio y dimensionamiento de la instalación de recogida y tratamiento de aguas negras en un buque. PDF, [en línea], [consultado 28 de marzo de 2019], p. 18. Disponible en internet:

https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/85541/112385_Estudio+y+dimensionamiento+de+la+instalaci%F3n+de+recogida+y+tratamiento+de+aguas+negras+en+un+buque.pdf;jsessionid=93A3EB2A26628ACB76FACB1C6AEB86C1?sequence=1.

- c) **Desarenado:** Estructuras que tienen como función principal la retención de partículas sólidas sedimentadas para evitar el deterioro físico de los equipos, canales, tuberías, válvulas y tanques ubicados en etapas posteriores dentro de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Estas estructuras tienen una gran ventaja en cuanto a su versatilidad, puesto que su diseño puede ser rectangular o circular; de flujo helicoidal u horizontal; de limpieza manual o mecánica al igual que los equipos de cribado; y si se desea aireado o no.¹⁴
- d) **Desengrasado:** En esta operación unitaria se da la eliminación de grasas y aceites por medio del uso de rejillas finas donde se retienen las grasas, aceites y material suspendido, bien sea de tipo animal o vegetal.¹⁵
- e) **Aireación:** Con este proceso se busca la eliminación de olores, esto se logra con la adición de oxígeno disuelto en el efluente, proveniente de los pretratamientos anteriores, brindando una cantidad óptima de oxígeno para el consumo de microorganismos en el tratamiento biológico aerobio, eliminando así: dióxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles, metano, amoníaco, entre otras sustancias.¹⁶

1.3.2 Tratamientos Primarios. Este tipo de procesos tienen como finalidad la remoción de gran cantidad de material sedimentable o suspendido de los efluentes, mediante métodos físicos y/o mecánicos. Con los tratamientos primarios se puede remover, además del material mencionado anteriormente, una gran cantidad de materia orgánica que se refleja en una disminución aproximada de entre el 50%-65% de los sólidos suspendidos y un 25%-40% de la DBO.¹⁷

- a) **Neutralización:** en este proceso lo que se hace es mezclar en un tanque de homogeneización las corrientes de aguas residuales industriales ácidas y alcalinas, con el propósito de disminuir las fluctuaciones en los caudales de dichas corrientes y ajustando su pH, generando así un caudal relativamente

¹⁴ Ibid., p. 20-21.

¹⁵ Ibid., p. 22.

¹⁶ LÓPEZ BARROSO, María Fernanda; MENDOZA ARIAS, Laura Carlota. Desarrollo de una propuesta de mejora para la planta de tratamiento de aguas residuales para la reducción de DQO y DBO en la fábrica de chocolates Triunfo S.A. Bogotá D. C.: Fundación Universidad de América, 2018., p. 33.

¹⁷ ALFONSO CORREA, Laura Alejandra; VARGAS GUERRERO, Lizethe Tatiana. Desarrollo de una propuesta de tratamiento de aguas residuales proveniente del proceso de producción de pulpas de fruta de la empresa Alimentos S.A.S. Bogotá D. C.: Fundación Universidad de América, 2018., p. 55.

constante con la mezcla de las corrientes, y también se busca aminorar las variaciones de DBO que se presenten en el efluente.¹⁸

- b) Coagulación:** la coagulación busca desestabilizar de manera química las partículas coloidales presentes en el cuerpo de agua, esto se logra mediante la adición de coagulantes.¹⁹ Para garantizar un buen manejo y resultado de este proceso es importante tener estos parámetros en cuenta: pH, concentración del coagulante, velocidad de agitación, temperatura del agua, entre otros²⁰. Este proceso es muy utilizado en la industria debido a sus costos relativamente bajos, en comparación con otros procesos. Cabe resaltar que, si no se da un buen uso del coagulante como de otros factores, se puede incurrir en errores en el proceso y generar gastos aún más elevados que el proceso mismo.

En el cuadro de 2, se muestran los tipos de coagulantes más utilizados en la actualidad.

¹⁸ LÓPEZ BARROO, María Fernanda; MENDOZA ARIAS, Laura Carlota. Desarrollo de una propuesta de mejora para la planta de tratamiento de aguas residuales para la reducción de DQO y DBO en la fábrica de chocolates Triunfo S.A, Op. cit., p. 33.

¹⁹ Fibras y Normas de Colombia S.A.S. Aguas residuales: clasificación y características. Op. cit., Disponible en internet: <https://www.fibrasynormasdecolombia.com/terminos-definiciones/aguas-residuales-clasificacion-y-caracteristicas>.

²⁰ PRIETO BERNAL, Winny Jimena; SOLER URIBE, Emily Andrea. Evaluación de una propuesta de un sistema de tratamiento para el agua residual industrial generada en una empresa de saborizantes. Bogotá D. C.: Fundación Universidad de América, 2018., p. 37.

Cuadro 2. Coagulantes más utilizados en tratamiento de aguas

Coagulante	Descripción	Rango pH
Sulfato de Aluminio	Se disuelve fácilmente en agua, dando paso a iones de carga positiva; ampliamente utilizado en la industria.	4,0 - 7,0
Sulfato Ferroso	Coagulante de tonalidad verde, el pH y la alcalinidad son muy bajos para reaccionar; es necesario la adición de cal para asegurar la coagulación.	> 8,5
Sulfato Férrico	Material anhidro; eficiente a valores de pH bajos, más no a valores altos de pH; el flóculo formado es más pesado que el flóculo formado con Sulfato de Aluminio	3,5 - 7,0
Cloruro de Hierro	Conocido comercialmente como Cloruro Férrico, se una en una solución al 40% ²¹ . Usado usualmente en tratamientos de aguas residuales.	3,5 - 6,5
Aluminato de Sodio	Muy útil en el tratamiento de aguas, reduciendo al máximo el uso de correctores de pH (cal, soda cáustica o carbonato de sodio)	5,0 - 9,0

Fuente: elaboración propia.

²¹ ADMINMGV. Tratamiento del agua. Tratamiento del agua. [en línea], 8 de junio de 2016 [consultado el 28 de marzo de 2019]. Disponible en internet: <http://www.tratamientodelagua.com.mx/coagulantes-para-tratamiento-de-agua/>.

- c) Coagulantes alternativos (PAC):** en los últimos años se ha dado paso en el tema del uso de coagulantes para el tratamiento de aguas residuales a otro tipo de coagulantes, que son diferentes a los utilizados ampliamente en la industria. Los PAC, son coagulantes inorgánicos prepolimerizados, con comportamientos distintos a los convencionales que generan ventajas dentro del proceso, como, por ejemplo: promover una baja producción de lodo, baja concentración de aluminio residual, versatilidad en su uso sin importar el valor de pH. Además, los PAC presentan flóculos en forma de esferas con un tamaño de 25mm, mientras que, con el sulfato de aluminio, de los más utilizados en la actualidad, presenta flóculos de tamaño de 25-100mm. Esta diferencia se ve reflejada en la turbiedad del efluente, con los PAC se produce una menor turbiedad en comparación con el sulfato de aluminio.²²
- d) Floculación:** es la etapa siguiente a la coagulación en el tratamiento de aguas. Su funcionamiento se basa en la agitación de la masa ya coagulada, por medio de esa agitación se da la aglomeración y crecimiento de los flóculos. De esta manera, se aumenta el peso molecular de los coloides y se sedimentan. Una vez el lodo formado se encuentra precipitado, se procede a remover los flóculos de manera más sencilla y efectiva.²³
- e) Sedimentación:** en este proceso se retiran las partículas más pesadas que están presentes en los cuerpos de agua tratados, son aquellas partículas que no pudieron ser retiradas en los procesos de coagulación y floculación. Este proceso tiene como principio la remoción de dichas partículas por la acción de la fuerza de gravedad. Los sólidos atrapados en este proceso son generalmente: arenas, limos y coloides²⁴. La sedimentación actúa en un período de retención propicio para garantizar la remoción de todos los sólidos provenientes de la coagulación y floculación
- f) Electrocoagulación:** es un proceso alternativo del tratamiento de aguas residuales. Busca eliminar contaminantes presentes en el agua de manera disuelta, suspendida o emulsificada. Este método hace uso de corriente eléctrica dentro del agua residual a través de placas, bien sean de: hierro,

²² COGOLLO FLORÉZ, Juan Miguel. Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxloruro de aluminio. PDF, [en línea], 05 de octubre de 2010, [consultado el 28 de marzo de 2019], p. 20. Disponible en internet: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25636/39133>.

²³ Fibras y Normas de Colombia S.A.S. Coagulación y floculación: definición, tipos y factores. Fibras & Normas de Colombia S.A.S. [en línea], [consultado 14 de marzo de 2019]. Disponible en internet: https://www.fibrasynormasdecolombia.com/terminos-definiciones/coagulacion-floculacion-definicion/#Que_es_la_Floculacion.

²⁴ COGOLLO FLORÉZ, Juan Miguel. Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxloruro de aluminio. Op. cit., p. 20.

aluminio, grafito, etc. Que están ubicadas de manera paralela y equidistantes. Con la corriente eléctrica presente, se desestabilizan los contaminantes generando así, agrupación de partículas menos coloidales y emulsificadas que se agrupan y forman una capa de espuma en la superficie, haciendo más sencillo retirarla de manera mecánica²⁵.

1.3.3 Tratamientos Secundarios y/o biológicos. También conocido como tratamiento biológico, tiene como objetivo la reducción de DBO y DQO, por medio de métodos que hacen uso de diferentes tipos de microorganismos. Con estos ecosistemas se logran rendimientos de hasta un 95%²⁶. Estos tratamientos actúan de la siguiente manera: Transforman las cargas contaminantes, ricas en concentraciones orgánicas en productos finales aceptables. Capturan sólidos coloidales no sedimentables a un flóculo biológico, también llamado biopelícula. Utilizan los contaminantes presentes en el agua como fuente de energía, generando así biomasa, dióxido de carbono y otros compuestos. A continuación, se hará una breve descripción de los tratamientos secundarios más utilizados.

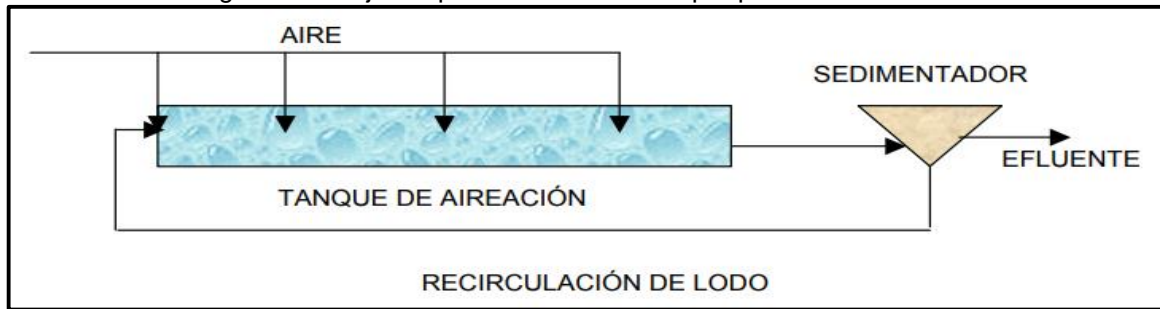
a) Lodos Activados: este proceso tiene como principio la remoción de DBO₅ y DQO, con la ayuda de microorganismos dentro de un reactor aireado y como sustrato para altas cargas de materia orgánica presentes en el agua residual a tratar. Actualmente, existen varios métodos de lodos activados, con determinadas características, que proporcionan mejoría en porcentajes de remoción. Sin embargo, todos mantienen el mismo principio. Algunos de estos ajustes se observan en el cuadro 3. A continuación, se expone mediante la ilustración 1, el diagrama de flujo de lodo activado²⁷.

²⁵ Arango Ruiz, Álvaro. La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales [en línea]. Revista Lasallista de Investigación, vol. 2, núm. 1, enero-junio, 2005, p 50. Corporación Universitaria Lasallista Antioquia, Colombia. [consultado 09 de septiembre de 2019]. Disponible en internet: <https://www.redalyc.org/pdf/695/69520109.pdf>.

²⁶ NUEVO, David. Tratamientos secundarios de depuración de aguas residuales. Tecpa. [en línea], 09 de noviembre de 2018, [consultado el 28 de marzo de 2019]. Disponible en internet: <https://www.tecpa.es/edar-tratamiento-secundario-depuracion-aguas/>.

²⁷ RAMOS VELANDIA, Cristian Camilo. Evaluación de un sistema de tratamiento de lodos activados para la remoción de carga orgánica en las aguas residuales domésticas generadas en el colegio San Viator. Bogotá D. C.: Fundación universidad de América, 2017., p. 28.

Ilustración 1. Diagrama de flujo del proceso de aireación por pasos de lodo activado.



Fuente: RIVERA OCAMPO, Nora Ximena, VALENCIA ÁNGEL, Norma Constanza. Estudio preliminar para el tratamiento de lixiviados en un reactor de lodos activados. Disponible en internet:

- b) Filtro biológico o filtro percolador:** consiste en un tanque que contiene un lecho fijo en su interior, puede estar hecho de material sintético o de piedras con diferentes formas. En este lecho se encuentran los microorganismos, una vez que pasa el agua residual por el tanque y después de determinado período de tiempo se empiezan a formar una capa bacteriana que luego, hidráulicamente, se desprende del lecho para pasar al tanque sedimentador y separar los líquidos de los sólidos²⁸.
- c) Filtro anaerobio de flujo ascendente:** el filtro anaerobio de flujo ascendente es un sistema para tratamiento de aguas residuales, bien sean domésticas y/o residuales. Su funcionamiento parte de una biopelícula fija para la remoción de materia orgánica en condiciones anaerobias o ausencia de oxígeno²⁹.

En el cuadro 3, se muestran algunos de los métodos más usados en tratamientos biológicos.

²⁸ Ibid., p. 32.

²⁹ SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: filtros anaerobios de flujo ascendente. PDF, [en línea], [consultado el 28 de marzo de 2019], p. 10. Disponible en internet: <http://www.mapasconagua.net/libros/sgapds-1-15-libro29.pdf>.

Cuadro 3. Principales procesos de tratamiento biológico

Tipo	Crecimiento	Proceso	Uso principal
Aerobios	Suspendido	Lodos activados	Remoción de DBO y nitrificación
		- convencional	
		- mezcla completa	
		- aireación escalonada	
		- estabilización y contacto	
		- oxígeno puro	
		- tasa alta	
		- aireación prolongada	
		- proceso Krauss	
		- zanjón de oxidación	
	Lagunas aireadas	Remoción de DBO y nitrificación	
	Digestión aerobia	Remoción de DBO y nitrificación	
	Lagunas aerobias	Remoción de DBO y nitrificación	
	Adherido	Filtros percoladores	Remoción de DBO y nitrificación
- tasa baja			
- tasa alta			
Torres biológicas		Remoción de DBO y nitrificación	
Unidades rotatorias de contacto biológico		Remoción de DBO y nitrificación	
Reactores de lecho fijo		Remoción de DBO y nitrificación	
Anóxicos	Suspendido	Bardenpho	Remoción de DBO, N y P
		Desnitrificación	Remoción de nitrógeno
	Adherido	Desnitrificación	Remoción de nitrógeno
Anaerobios	Suspendido	Digestión anaerobia	Remoción de DBO - estabilización
		Anaerobio de contacto	Remoción de DBO
	Híbrido	Lagunas anaerobias	Remoción de DBO - estabilización
		Manto de lodos-flujos Ascensional (PAMLA) o UASB	Remoción de DBO y SS

Cuadro 3. (Continuación)

TIPO	CRECIMIENTO	PROCESO	USO PRINCIPAL
Anaerobios	Adherido	Filtro anaerobio	Remoción de DBO - estabilización
		Lecho expandido	Remoción de DBO - estabilización

Fuente: ROMERO, R., Jairo Alberto. Tratamiento de aguas residuales., p. 227.

1.3.4 Tratamientos Terciarios. Este tratamiento tiene como finalidad la eliminación de agentes patógenos remanentes y también, someter las aguas provenientes de los tratamientos anteriores a desinfección. Este método es opcional y se hace cuando se va a reutilizar el agua tratada como, por ejemplo, en sistemas de riego de jardines o vegetación. Lo importante del uso de estos cuerpos de agua, es que no representen un peligro para la salud humana.³⁰

1.4 MARCO LEGAL

El vertimiento de las aguas residuales industriales provenientes del proceso productivo de la elaboración de la panela en el alcantarillado público, ríos, arroyos, quebradas, etc. sin un previo control genera, efectos negativos en dichos cuerpos hídricos, alterando sus propiedades fisicoquímicas, dando aspectos de color y olor indeseables. En consecuencia, la empresa puede ser acreedora de multas, sanciones y en casos más críticos, el cierre de la planta de producción.

El gobierno colombiano para darle control a dichos efluentes tiene en vigencia una serie de leyes, decretos y resoluciones. Las compañías que fabriquen algún producto que requiera el uso de agua dentro de su proceso, está en la obligación de cumplir con estas normas.

Doña panela LTDA. se encuentra registrada en la cámara de comercio como empresa con una actividad económica de fabricación de productos alimenticios, de esta forma, la Resolución 0631 establece para esta compañía desde su artículo 12, los parámetros fisicoquímicos que deben ser monitoreados, de igual manera, se establecen límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domesticas ARn-D a cuerpos superficiales de agua.

Estos criterios a tener en cuenta se registran en la Tabla 1:

³⁰ GARCÍA ASTILLERO, Adriana. Tipos de tratamiento de aguas residuales. Ecología verde. [en línea], 06 de agosto de 2018, [consultado el 28 de marzo de 2019]. Disponible en internet: <https://www.ecologiaverde.com/tipos-de-tratamiento-de-aguas-residuales-1448.html>.

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos, artículo 12 de la resolución 0631 del 2015.

Parámetros	Unidades	Valor Límite
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	600,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg/L O ₂	400,00
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	200,00
Sólidos Sedimentables (SSED)	mg/L	2,00
Grasas y Aceites	mg/L	20,00
Iones		
Cianuro Total (CN)	mg/L	0,50
Cloruros (Cl)	mg/L	250,00
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/L	250,00
Metales y Metaloides		
Cadmio (Cd)	mg/L	0,05
Cinc (Zn)	mg/L	3,00
Cobre (Cu)	mg/L	1,00
Cromo (Cr)	mg/L	0,50
Mercurio (Hg)	mg/L	0,01
Níquel (Ni)	mg/L	0,50
Plomo (Pb)	mg/L	0,20
Otros parámetros para análisis y reporte		
Acidez Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte
Dureza Cálcica	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte
Color Real (Medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436 nm, 525 nm y 620 nm)	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte
Temperatura	° C	< 40

Fuente: Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, Resolución 0631 de 2015, Artículo 12

2. DIAGNOSTICO

La empresa DOÑA PANELA LTDA. se encuentra situada en Chitaraque, Boyacá, Vereda Guayacán y Peña; lugar donde se localiza su planta, la cual se dedica a la producción de Panela y productos derivados como panela pulverizada, panela en sobre, panela en cubos y panela en bloque. Esta compañía cuenta con una línea de producción principal, de la cual surgen 4 líneas secundarias para la producción de cada uno de sus productos. El uso de agua más representativo se halla en la limpieza ya que se usa directamente en el lavado y en el aseo de los equipos. De este procedimiento se genera un residuo acuoso, el cual en su composición posee restos de panela y saborizantes, los cuales se vierten de manera directa en una fuente hídrica de Lenguaruco, una quebrada aledaña a la empresa.

En este capítulo se describe el proceso de elaboración de la panela; se muestran los resultados del análisis fisicoquímico del agua residual proveniente del proceso de elaboración de la panela. Este análisis es el punto de partida para llevar a cabo todo el desarrollo del proyecto, teniendo en cuenta los parámetros establecidos por la Resolución 0631 de 2015.

En consiguiente, los parámetros: Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y pH; no cumplen con la normatividad vigente para su vertimiento.

2.1 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

Doña panela LTDA, es una empresa que se dedica a la elaboración de panela. Se encuentra ubicada en el departamento de Boyacá, específicamente en el municipio de Chitaraque. Doña Panela LTDA produce alrededor de 150 toneladas de panela mensualmente, en diferentes líneas de producción, como lo son: panela orgánica, panela pulverizada, panela en cubos, sachet, a granel y café & panela. Su producción es semicontinua o por lotes, dependiendo de las condiciones cambiantes del mercado en cuanto oferta y demanda se refiere. Cabe resaltar que Doña Panela LTDA cuenta con un portafolio de productos de alta calidad y, son vendidos a nivel internacional, generando así mayor cantidad de producto y por lo tanto generando más empleos dentro de la agroindustria panelera.

La empresa se divide en varias partes: una de ellas es donde se realiza la siembra, cosecha y recolección de la caña de azúcar, de donde se obtiene el jugo de caña de azúcar, que es la materia prima principal del proceso productivo. En la zona de producción, que se encuentra contigua a las zonas de siembra de la caña de azúcar, se realiza todo el proceso productivo de elaboración de la panela, es donde se

mezcla, caliente, agita, y se obtiene como producto final la panela lista para ser llevada a la zona de almacenamiento. La zona de siembra se encuentra separada de la zona de producción. Se localizan a una distancia aproximada de 5 kilómetros, por lo que es necesario el uso de vehículos para transportar el producto hasta la zona de almacenamiento y empaquetamiento, respectivamente. Una vez clasificados los lotes de producción en la bodega por fecha de fabricación, se procede a llevarlos a la zona de empaquetamiento, donde se realizan las diferentes líneas de productos de la empresa Doña Panela LTDA.

2.1.1 Descripción del proceso productivo. El jugo de caña de azúcar se obtiene a partir de la separación entre el bagazo y el néctar. Dicha parte líquida contiene entre 15 y 20% de sólidos totales, de los cuales alrededor del 80% son azúcares solubles, principalmente sacarosa, es libre de contenido fibroso y bajo en proteína por lo que es una fuente básicamente energética³¹.

El proceso de producción de la panela se compone de las siguientes etapas:

a) Recolección y transporte: la recolección de la caña de azúcar es el primer paso para la elaboración de la panela. Se da la selección para el corte de caña de aquellas plantas que presenten el mayor contenido de sólidos solubles y sacarosa, para que se garanticen los mejores rendimientos en el proceso de extracción. El seleccionar una caña de azúcar que hayan sobrepasado o no hayan llegado a su estado óptimo de maduración, se verá reflejado negativamente en la panela en su etapa final, presentando propiedades organolépticas no deseadas. Para determinar el estado de maduración de la caña se realiza de la siguiente manera: según Funach y Ascapam³², con un refractómetro se toman muestras de jugo en el sexto o séptimo entrenudo del tercio superior (Brix terminal) y del tercio inferior (Brix basal) y se divide el Brix terminal sobre el Brix basal. Donde los grados Brix, son la concentración de sólidos solubles representados en azúcar³³.

³¹GONZÁLEZ, Nicolás; HERNÁNDEZ, Malaquías; JÍMENEZ, Román; OJEDA, Nadia. La caña de azúcar como alimento funcional. PDF, [en línea], agosto de 2014, [consultado el 28 de marzo de 2019], p. 33. Disponible en internet: <http://www.reibci.org/publicados/2014/agosto/3300112.pdf>.

³² FUNACH; ASCAPAM. Capacitación en obtención de nuevos productos derivados de la caña y el manejo adecuado de la agroindustria panelera, municipio de Mocoa. Ministerio de agricultura y desarrollo rural programa nacional de transferencia de tecnología agropecuaria Pronatta. PDF, [en línea]. 2002, [consultado el 28 de marzo de 2019], p. 2. Disponible en internet: http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/4775/1/2006102416333_Guia%20elaboracion%20de%20panela.pdf.

³³ BARONA, Alejandro. Proceso de elaboración de la panela. [en línea], 29 de enero de 2008, [consultado el 28 de marzo de 2019]. Disponible en internet: <http://gloriapatriciamera.blogspot.com/2008/01/proceso-de-elaboracion-de-panela.html>.

La tabla 2, muestra el estado de maduración óptimo de la caña de azúcar.

Tabla 2. Estado de madurez de la caña de azúcar.

Brix terminal/Brix basal	Estado de maduración
< 0.85	La caña está inmadura
0.85-1	La caña está madura
> 1	La caña está sobremadura

Fuente: elaboración propia.

El transporte de la caña seleccionada se realiza desde el lugar donde se hizo el corte hasta donde esté ubicado el trapiche y el almacenamiento del mismo, por lo general, la recámara de almacenamiento está ubicado contiguo al trapiche. La caña no debe estar almacenada por más de 72h, ya que después de este tiempo, da lugar al incremento de azúcares reductores, afectando el proceso de limpieza y obteniendo una panela con consistencia blanda (melcochuda)³⁴.

- b) Extracción:** esta operación se realiza en un molino el cual se compone de tres rodillos estriados, mediante los cuales se pasa el tallo de caña de azúcar para separar el néctar o guarapo del bagazo. Existen varios tipos de molinos, pero específicamente para esta industria que en su mayor proporción son empresas artesanales se manejan solo dos tipos:
- Molino vertical: se caracteriza ya que en la parte superior se encuentra un engranaje y su accionamiento se da por tracción animal (burros o caballos). El rodillo gira y genera una presión al tallo que ingresa contra otro rodillo. De esta manera se logra obtener el jugo de caña que luego será depositado en un recipiente.
 - Molino horizontal: consiste en un motor o turbina que contiene cilindros en su interior, donde se mueven y trituran la caña de azúcar. Estos motores pueden ser eléctricos o de combustión. En el caso de ser de combustión, deben ser aislados para que los gases que genera la reacción de combustión no contamine el proceso de fabricación de la panela.
- c) Limpieza:** una vez se obtiene el jugo de caña proveniente del proceso de extracción, por medio de un sistema de tuberías ubicado en la parte de abajo del trapiche, se dirige el jugo de caña a tanques de almacenamiento ubicados en otra zona del proceso, donde se llevan a cabo procesos posteriores que

³⁴ BARONA, Alejandro. Proceso de elaboración de la panela. Op. cit. Disponible en internet: <http://gloriapatriciamera.blogspot.com/2008/01/proceso-de-elaboracion-de-panela.html>.

serán explicados más adelante. El jugo de caña va a permanecer el menor tiempo posible, para evitar la proliferación de azúcares reductores. Cuando el jugo de caña pasa a la siguiente etapa estos tanques son limpiados, solamente con agua potable, para evitar que se generen acumulación de azúcares y garantizar unas buenas prácticas de manufactura durante el proceso. El proceso de limpieza se debe realizar antes de depositar el jugo de caña en dichos tanques.

- d) Clarificación:** en este proceso se lleva a cabo una separación de las impurezas del jugo de caña de azúcar. La primera separación se da por proceso de sedimentación, en la cual por gravedad las arenas, lodos y sólidos más pesados se almacenan en el fondo del recipiente con forma de V y en el intermedio del tanque residuos livianos y algunos residuos de bagazo, los cuales por su diferencia de densidades se mantienen en la superficie del líquido. Para retirar los sólidos suspendidos que quedan atrapados en el intermedio del jugo se adiciona baba de cadillo, cuya función es decantar el líquido, de esta manera el material particulado que flotan en la superficie del jugo de caña es retirado mediante un filtro manual, con forma redonda y cóncava en el fondo. Una vez el jugo de caña está libre de impurezas, se transporta a un nuevo tanque, mediante un recipiente con forma cóncava en su fondo, al cual se le realiza un recubrimiento en manteca para evitar que el dulce se adhiera a esta.
- e) Evaporación:** el proceso unitario de evaporación se lleva a cabo en los recipientes con forma de v en su fondo, en donde se vierte el jugo de caña. estos recipientes están ubicados encima de una estructura de concreto, que en su interior tiene una cavidad con forma de horno, el cual mantiene una temperatura constante para las etapas que requieren de calentamiento. La caña seca, resultado del proceso de extracción del jugo de caña, ya triturada, es utilizada como leña debido a su alta capacidad calorífica. Es de vital importancia garantizar que los recipientes mantengan una temperatura constante de: 55 °C - 60 °C; ya que de esta forma se da la evaporación del agua presente en el jugo de caña y solo quede el dulce, el cual es el utilizado para hacer la panela. Para este proceso de elaboración de la panela se cuentan con dos recipientes, donde llega el jugo de caña con impurezas, se somete el proceso de clarificación, retirando los sólidos livianos que se encuentran en la superficie de este y, una vez se tenga el jugo de caña sin impurezas presentes, se toma por medio de un recipiente portable en forma cucharón grande, el jugo de caña para verterlo en los demás recipientes (que contienen más jugo de caña libre de impurezas), para que con las temperatura mencionadas anteriormente, se evapore el resto de agua presente en todos los recipientes donde se está quedando solamente

un dulce concentrado de caña. Este proceso se realiza de manera continua durante toda la jornada de producción (Diariamente 8 horas), ya que el horno se mantiene caliente todo el tiempo con la adición de la caña seca. Si no se realiza el proceso de verter el jugo de caña limpio en todos los demás recipientes puede que alguna paila se quede sin guarapo, de ese modo, se empieza a evaporar todo el porcentaje de agua y se pierde el dulce.

- f) **Concentración:** el objetivo de esta parte del proceso es aumentar el contenido de azúcar presente en el jugo de 20 a 70 °Brix³⁵; esta unidad de medida hace referencia a la cantidad porcentual (presente en el jugo de caña) de sólidos (sacarosa, azúcares reductores, entre otros) solubles en agua³⁶. Este paso influye directamente en la consistencia final de la panela como producto terminado. Para determinar si el dulce presente en el recipiente ya está listo para ser retirado, se hace mediante el siguiente método: se extrae una muestra de dulce del recipiente y es enfriado otro molde con agua, de manera manual, se toma el dulce y se ejerce una ligera presión sobre éste, de manera que la muestra de dulce de caña posea las características propias de la panela, señalando así que ya está listo y puede ser retirado del recipiente en su totalidad. En caso de que el dulce de caña no presente las características deseadas, se debe prolongar el tiempo de retención en el recipiente con temperaturas de: 55°C - 60°C hasta que el dulce tenga la consistencia y viscosidad deseada, sometiendo otra muestra de dulce al método mencionado anteriormente.
- g) **Aireación:** este proceso, con el dulce ya en su punto de cristalización óptimo, con base en la etapa anterior, se vierte el dulce en un gran recipiente de forma rectangular de acero inoxidable, previamente humedecido con agua potable. Luego se agitan constantemente todo el jugo de caña de manera circular para garantizar la homogenización de todo el dulce de caña; con la finalidad de alterar la textura del dulce y que pierda su capacidad de adherencia. Cuando el dulce se deja por un breve periodo de tiempo en reposo (10-15min) dentro del recipiente, se empieza a adherir aire al dulce, proporcionándole volumen, por lo tanto, los cristales de sacarosa crecen y se generan partículas con gran porosidad. Cuando se enfría el dulce, se encuentra la consistencia, aspecto y características propias de la panela.

³⁵ HERNANDEZ CEJA, Jessica. Elaboración de panela blanca a partir de jugo de caña purificado con carbón activado de bagazo y ultrapurificación. Xalapa, Mexico. Universidad Veracruzana. (en línea), (consultado el 18 de septiembre de 2019). p. 17. Disponible en internet:<http://www.panelamonitor.org/media/docrepo/document/files/elaboracion-de-panela-blanca-a-partir-de-jugo-de-cana-purificado-con-carbon-activado-de-bagazo-y-ultrafiltracion.pdf>.

³⁶ Ibid., p. 25.

- h) Moldeo:** en esta operación es de gran importancia que la panela no esté seca por la aireación recibida en el proceso anterior, pues en determinado caso pierde suavidad para darle forma, y los moldes deben estar humedecidos para que no se adhieran al dulce de la panela, de esta manera la mezcla se deposita en el respectivo recipiente y se empiezan a formar las unidades de panela. Este proceso se debe realizar de manera rápida y cuidadosa, ya que la panela al estar expuesta al ambiente continúa secándose y solidificando. Una vez la unidad se ha solidificado el jugo de caña, se retira el molde y este es sumergido en agua para retirar el dulce que pueda haberse adherido a las paredes de este y, de esta manera, se limpia el recipiente para un nuevo proceso.
- i) Empaquetamiento:** la panela es un producto bastante sensible a su entorno, si no se almacena en un lugar fresco, en cuartos cerrados y que sea apilados en estibas para evitar el deterioro de los empaques por animales. Si no se garantiza un ambiente apropiado de almacenaje se pueden ver afectadas las propiedades organolépticas de la panela y, permitiendo la reproducción de microorganismos dentro del producto Doña Panela, al tener varias líneas de producción derivados de la panela se manejan diferentes tamaños y tipos de empaque. La tabla 3, muestra los productos que manejan actualmente Doña Panela LTDA:

Tabla 3. Tamaños y tipos de empaques.

Producto	Tamaños	Empaque
Saco	10 kg (352,74 Oz) 25 kg (881,85 Oz) 50 kg (1763,7 Oz)	
Caja	Display (x 48 cubos) Minidisplay (x24 cubos) Supernimi (x 12 cubos)	
Pulverizada	500 gr (17,6 Oz)	
Sobre	Bolsa (x100 sobres de 6g) Dispensador (x25sobres de 10 gr)	

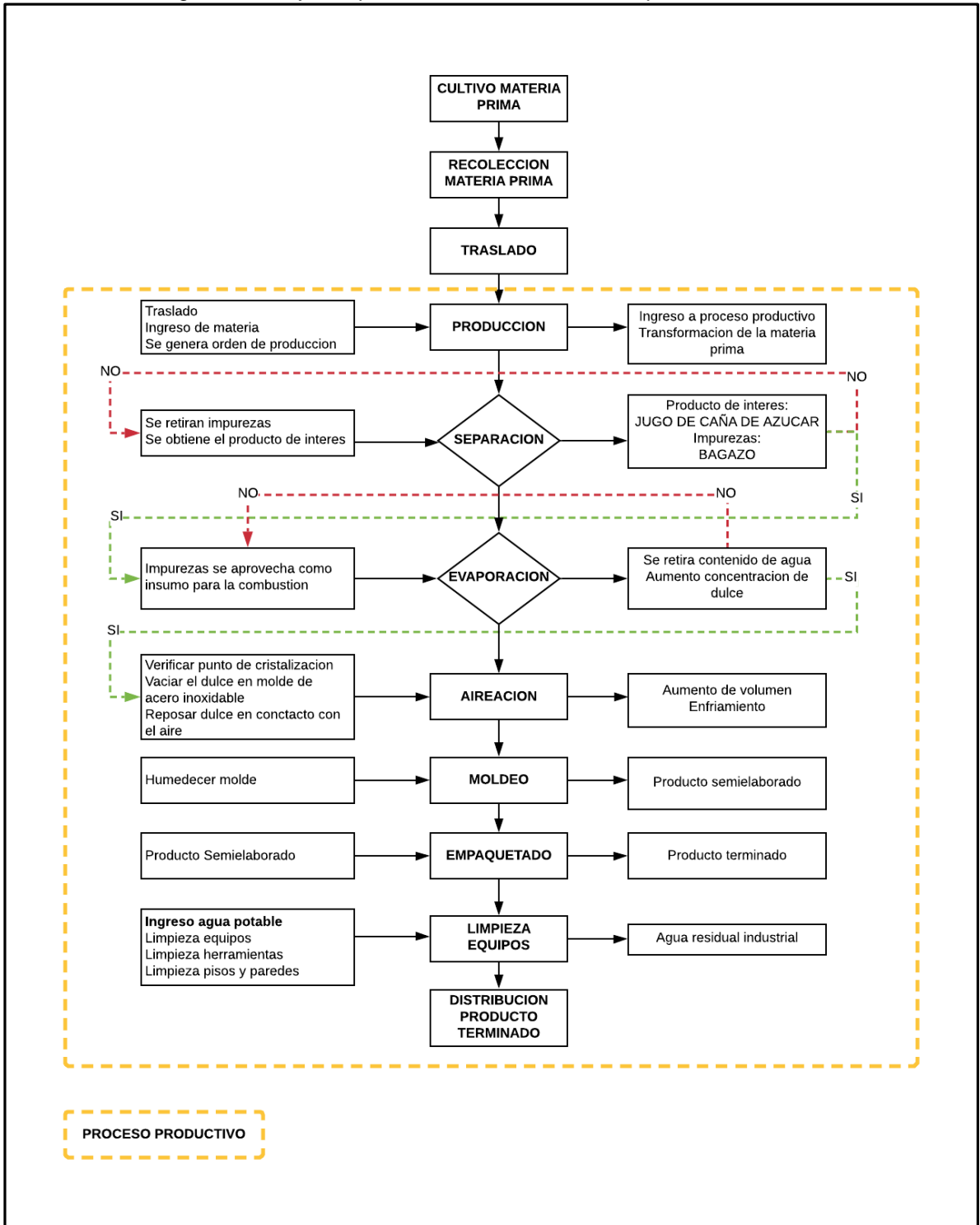
Fuente: elaboración propia.

- j) **Almacenamiento:** en esta parte del proceso, cabe resaltar que la construcción donde se almacena está diseñada en material resistente, que se puede limpiar y desinfectar, a su vez sus acabados evitan la acumulación de suciedad; por esta razón los pisos no son porosos, ni absorbentes, tampoco tienen grietas ni perforaciones. En el caso de los sifones, poseen rejillas que impiden el acceso a plagas. En cuanto a las áreas del trapiche existe una independencia total de las áreas de baños, y áreas comunes. Además, el personal que se encuentre en zonas de producción y empaquetamiento, debe llevar sus elementos de protección personal (EPP's) de manera correcta para garantizar buenas prácticas de manufactura. La ventilación y la iluminación está garantizada, para

que todos los trabajadores siempre estén en condiciones óptimas para llevar a cabo sus funciones, sin embargo, por las condiciones geográficas donde se localiza la empresa, en algunos casos la ventilación es natural por esta razón se hace uso de anjeos y para el caso de la iluminación artificial se protegen las lámparas con un acrílico incoloro, que permita el paso de luz sin interrupciones.

La ilustración 2, muestra el proceso de elaboración de la panela.

Ilustración 2. Diagrama de flujo del proceso de elaboración de la panela.

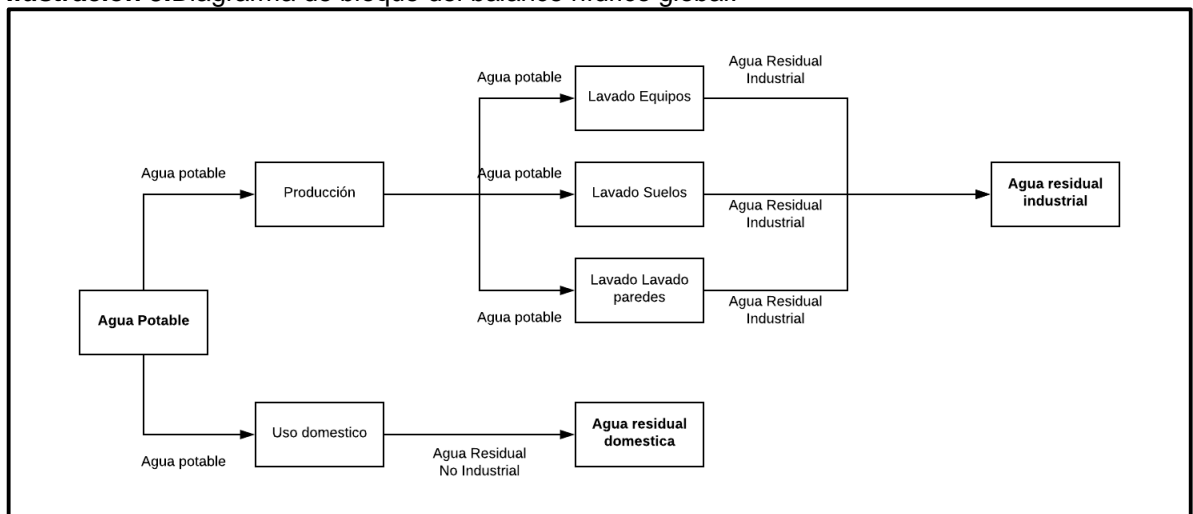


Fuente: elaboración propia.

2.2 BALANCE HIDRICO

Un balance hídrico es una herramienta basada en la ecuación de continuidad donde se consideran las entradas y salidas de agua que son necesarias en el proceso. Es decir, qué tanta agua potable es necesaria para llevar a cabo el proceso en relación con la generación de efluentes dentro del mismo. Para Doña Panela LTDA. en el proceso de elaboración de la panela, se tiene en cuenta para el balance hídrico del consumo de agua, tanto en el proceso productivo como en el uso doméstico. La ilustración 3, muestra el balance hídrico general del proceso de elaboración de la panela.

Ilustración 3.Diagrama de bloque del balance hídrico global.



Fuente: elaboración propia.

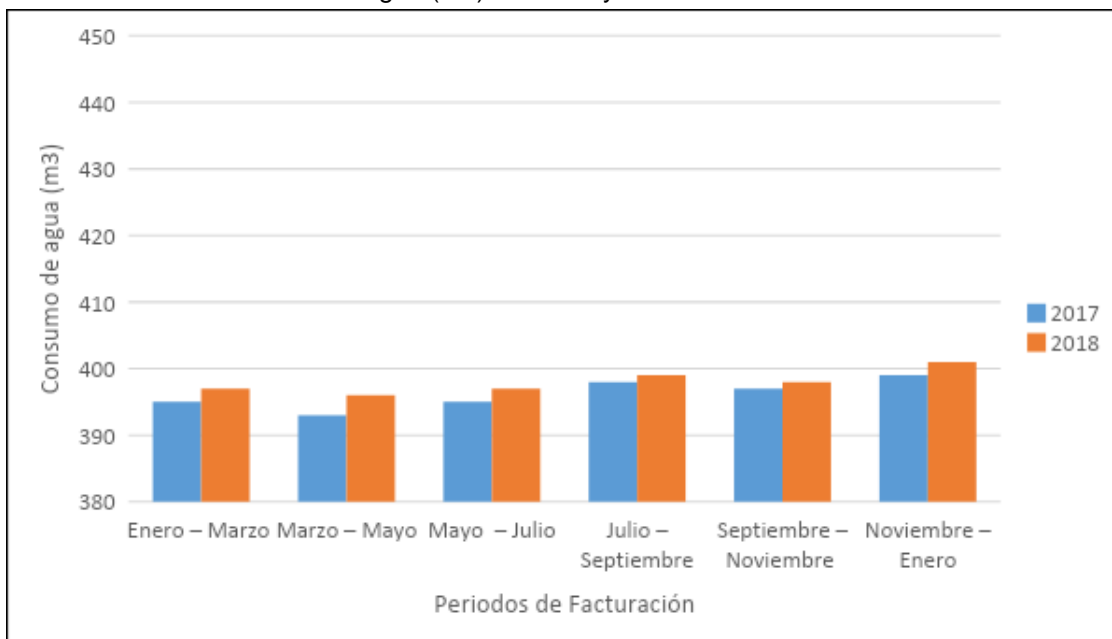
Doña Panela LTDA. no cuenta con un registro de balances hídricos realizados anteriormente, por lo tanto, se parte de los registros del consumo de agua proporcionados por la facturación de la empresa de acueducto local de los años 2017-2018 y el primer mes del 2019 (Presente año).

2.2.1 Redes de agua. Para la disposición de las aguas resultantes de Doña Panela LTDA., se cuenta con un sistema de tuberías de manera independiente para las aguas residuales industriales y para las aguas residuales domésticas, respectivamente. Para las primeras, se cuenta primero con una caja de inspección en algún punto especificado por la empresa para regular el control del vertimiento. Actualmente, no se tiene ningún tipo de control sobre los vertimientos generados en la zona de producción, como lo son las etapas de: concentración y aireación; en tanto la zona de empaquetamiento se da la generación de aguas residuales industriales en: limpieza de pisos, paredes, equipos y herramientas. Estos efluentes son vertidos en el río Lenguaruco, cuerpo hídrico cercano a la empresa. Para las aguas residuales domésticas, que son provenientes de la zona de baños y áreas comunes, se vierten en un pozo séptico, el cual separa los sólidos pesados en el fondo del pozo, creando así un lodo. Los sólidos livianos, grasas y aceites (si están presentes), crean en la superficie una capa, dando lugar al agua residual en el medio de dichas capas.

2.2.2 Consumo de agua. Recordando que la empresa Doña Panela LTDA., no cuenta con antecedentes de balances hídricos realizados en sus instalaciones, es clave determinar, de manera preliminar, cuánto es el consumo de agua dentro de la empresa. Para tener un acercamiento inicial al consumo de agua generado por la empresa Doña Panela LTDA, en el proceso de elaboración de la panela, teniendo en cuenta el agua utilizada en la zona de producción de la panela y de las zonas administrativas, donde también se hace uso del agua proveniente del acueducto local. Para ello, se parte, inicialmente, del consumo total que realizó la empresa desde enero del año 2017 hasta enero del presente año (2019), con ayuda de los recibos de facturación del acueducto de Chitaraque.

El gráfico 1, muestra los consumos totales de agua en los años 2017 y 2018, respectivamente:

Gráfico 1. Consumo total de agua (m³) del 2017 y 2018.



Fuente: elaboración propia.

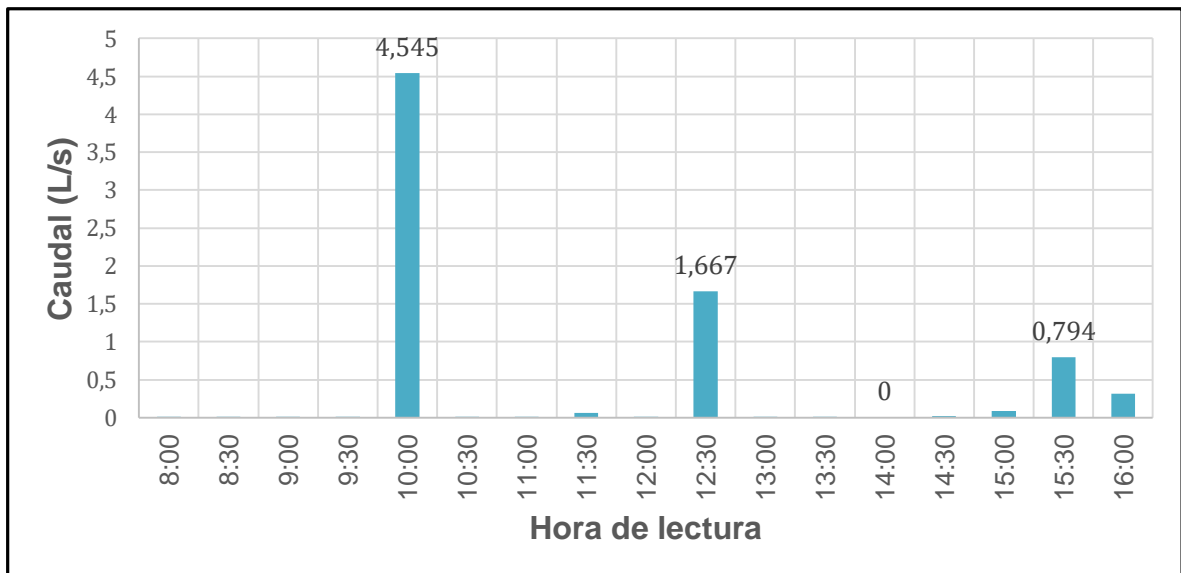
Con base en el gráfico 1, se determina que el período donde más se consume agua, comprendiendo los años 2017 y 2018, es en noviembre-enero de 2018 con una cantidad de 401m³. Dando lugar al pico máximo de consumo de agua para la zona de empaquetamiento, ya que es en esta parte del proceso donde se da la mayor cantidad de agua de entrada; y es utilizada especialmente para temas de limpieza de pisos, instalaciones, equipos, etc.

Sin embargo, el comportamiento de este consumo, tanto en el año 2017 como en el 2018, es de una variación mínima de consumo de agua potable necesaria durante el proceso productivo de elaboración de panela. El año 2017 muestra el pico más bajo y más alto en los periodos comprendidos entre marzo – mayo (393 m³) y noviembre – enero (399 m³), respectivamente. Para el año 2018 muestra el pico más bajo y más alto en los siguientes periodos: marzo – mayo (396 m³) y noviembre – enero (401 m³). Estos valores muestran una variación del 1,5% para el año 2017; en cuanto al 2018, se evidencia un valor de variación del 1,25%. Quiere decir, que el consumo de agua en la sección de empaquetamiento es independiente al proceso productivo de la panela en la empresa Doña Panela LTDA y que el agua que se genera como efluente es indiferente a la capacidad instalada que posea la empresa.

2.2.2.1 Cadena de custodia. Luego del análisis inicial con los registros del acueducto, en cuanto al consumo de agua por parte de Doña Panela LTDA; es vital importancia corroborar dichos consumos mediante métodos rigurosos y precisos, para generar menor incertidumbre en los datos obtenidos. Para ello, se lleva a cabo una medición del vertimiento in situ de la caja de inspección con una frecuencia de 30 minutos entre muestras con un rango de (8) horas desde las 08:00 - 16:00. La composición de la muestra se realizó de la mezcla de las alícuotas de las muestras puntuales tomadas durante la jornada de muestreo con la finalidad de analizar los parámetros críticos de calidad del agua mencionados anteriormente (ver anexo A). Dentro de la jornada laboral, se realizan tres descargas al día de agua residual con los siguientes horarios específicos: 09:30 - 10:30; 12:00:13:00; 15:00 - 16:00, proveniente de la zona de empaquetamiento de las diferentes líneas de producción que maneja Doña Panela LTDA.

La toma de muestra se realizó el día 08 de agosto de 2019, desde el momento de la toma de muestras hasta la llegada al laboratorio, se mantuvo una refrigeración de 4°C, protegiendo las muestras del sol, de la luz y de las posibles fuentes de contaminación. Las muestras fueron almacenadas en recipientes de vidrio oscuro y refrigeradas en una nevera de icopor con hielo.

Gráfico 2. Aforo in situ caja de inspección Doña Panela LTDA.



Fuente: elaboración propia.

La siguiente gráfica permite analizar el comportamiento de los vertimientos efectuados por Doña Panela LTDA, se concluye que el caudal presenta un aumento considerable en tres ocasiones puntuales al día, siendo el primer pico el más

representativo ya que la medida del caudal se incrementa hasta alcanzar los 4,5 L/s, producto de la limpieza de equipos para la puesta en marcha de la operación. El segundo pico representa el vertimiento producto de la limpieza de paredes y pisos. Al cierre de la jornada se evidencia el último pico donde se puede determinar que es el agua residual generada producto de la limpieza de herramientas y utensilios.

Con la ecuación 1, se determina la cantidad de agua consumida por día.

Ecuación 1. Caudal diario consumido.

$$QT = QA * FT$$

Donde:

QT = Caudal total del agua de consumo.

QA = Caudal suministrado por el acueducto.

FT = Factor de conversión.

$$QT = \frac{401m^3}{2 \text{ meses}} * \frac{1 \text{ mes}}{26 \text{ días}}$$

$$QT = 7,71 \frac{m^3}{\text{día}}$$

2.2.2.2 Consumo en el área productiva. En el proceso productivo de elaboración de la panela, no se hace uso de agua potable; por lo tanto, el consumo de agua potable en el área productiva es nulo.

2.2.2.3 Consumo de agua residual doméstica. En el proceso de elaboración de la panela en la compañía Doña Panela LTDA, genera aguas residuales industriales de dos tipos: una de ellas es el agua residual industrial doméstica, esta es proveniente de todos los usos que del recurso que no están involucrados en el proceso productivo de la panela. Es decir, son los residuos originados de las limpiezas de zonas administrativas, agua destinada para el uso y limpieza de baños, y uso en la cafetería. Doña Panela LTDA; cuenta con una nómina de 60 empleados que están distribuidos de la siguiente manera: 20 trabajadores en la zona de trapiche y 40 personas ubicadas en planta. Se trabaja seis días a la semana en una jornada continua de ocho horas.

Con base en la información obtenida de la Resolución 1391 de 2003³⁷, se realiza el cálculo del consumo de agua doméstica. La ecuación 2, muestra el cálculo del agua residual doméstica:

Ecuación 2. Cálculo de caudal de agua residual doméstica.

$$QRD = R * \frac{\text{Total de trabajadores}}{\text{días trabajados}}$$

Donde:

QRD = Caudal total de agua residual doméstica.

R = Coeficiente de Retorno³⁸.

Reemplazando valores en la ecuación 2:

$$QRD = 0,7 * \frac{60}{26}$$

$$QRD = 1,61 \frac{m^3}{día}$$

2.2.2.4 Consumo agua industrial. Para determinar la cantidad de agua residual industrial proveniente del proceso productivo de la panela, limpieza de equipos y de áreas de trabajo, se parte del balance hídrico mencionado anteriormente y partiendo del principio de conservación de la materia, por medio de la ecuación 3.

Ecuación 3. Principio de conservación de la materia.

$$\sum \text{Agua de entrada} = \sum \text{Agua de salida}$$

³⁷ COLOMBIA. DEPARTAMENTO TÉCNICO Y ADMINISTRATIVO DEL MEDIO AMBIENTE. Resolución 1391 (6 de octubre de 2003). Por la cual se establecen los formatos de solicitud de trámites administrativos ambientales y los formatos que apoyan el proceso de contratación. Bogotá D.C[en línea], [consultado el 15 de septiembre de 2019]. Disponible en internet: http://legal.legis.com.co/document/Index?obra=legcol&document=legcol_75992041e8fdf034e0430a010151f034.

³⁸ CRISTANCHO BELLO, Angie Juliet and NOY ORTIZ, Andrés Mauricio. Diseño conceptual de una planta de tratamiento de aguas residuales para Pelikan Colombia SAS. Fundación Universidad de América. Bogotá D. C. 2016. p 48.

Con base en el principio de conservación de la materia, se realiza el cálculo del caudal de agua residual a partir de las entradas y salidas del sistema que son: el consumo total de agua (entrada) y caudales de residuos domésticos e industriales (salidas); mediante la ecuación 4:

Ecuación 4. Cálculo de balance hídrico por caudales.

$$QT = QRI + QRD + QP$$

Donde:

QT = Balance hídrico por caudales.

QRI = Caudal total del agua residual industrial.

QRD = Caudal total de agua residual doméstica.

QP = Caudal total usado en el área productiva.

Entonces:

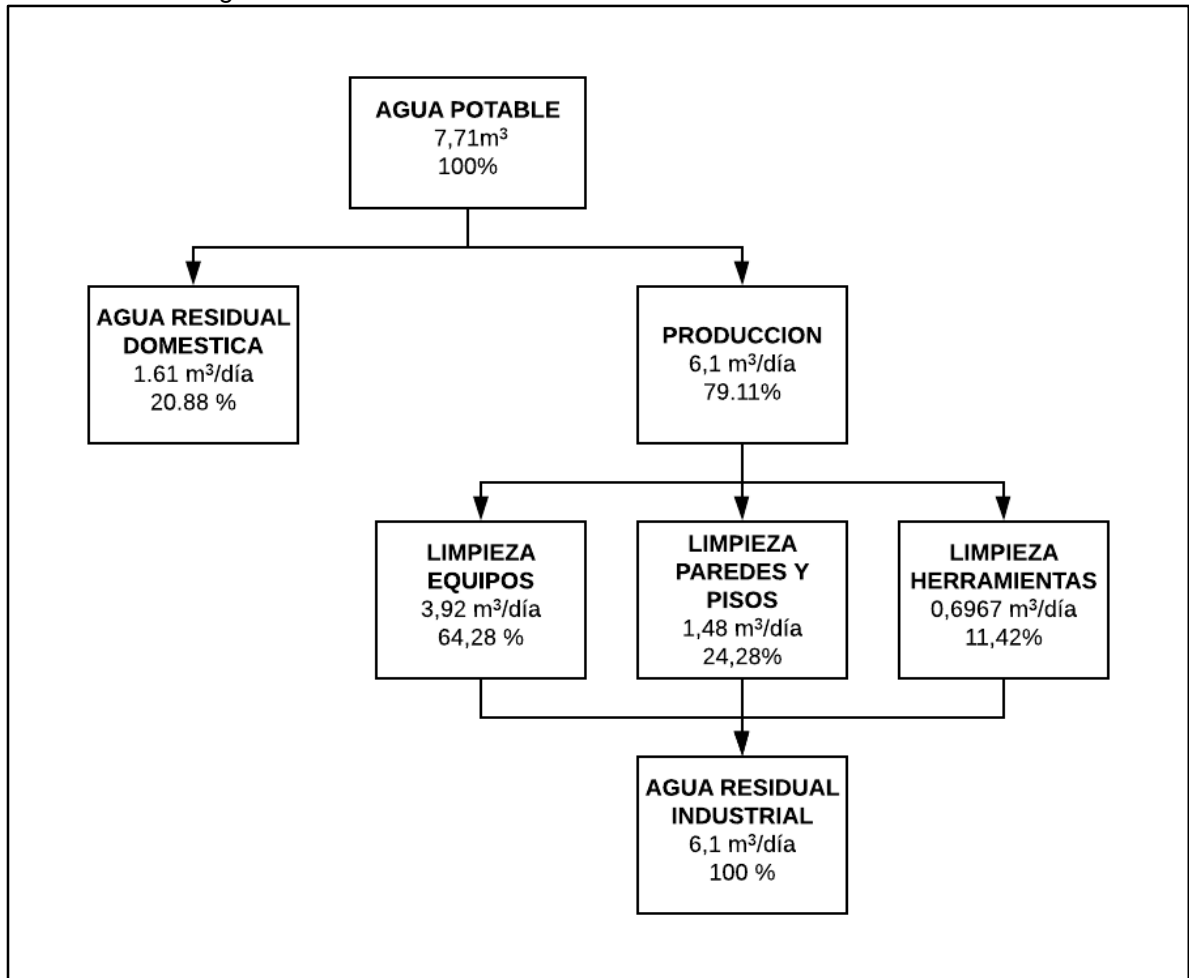
$$7.71 \frac{m^3}{día} = QRI + 1,61 \frac{m^3}{día}$$

$$QRI = 6,1 \frac{m^3}{día}$$

Con base en los resultados obtenidos del cálculo de caudales y consumo total de agua, se puede concluir que el caudal máximo aproximado de aguas residuales industriales es de 6,1 m³/día. Teniendo en cuenta de que este caudal comprende los períodos de facturación entre: enero 2018 – enero 2019. Es importante resaltar que el proceso de realización de cálculos se hizo mediante el aforo de la caja de inspección realizado el 8 de agosto del presente año. Mediante el cálculo del balance hídrico de las entradas y salidas de caudales del proceso se puede determinar que el caudal residual industrial es el que mayor consumo de agua potable genera. Es importante destacar, que este caudal proviene de la limpieza de equipos, herramientas, pisos y paredes de la zona de empaquetamiento. Estas limpiezas se realizan de manera periódica tres veces al día durante la jornada laboral.

La ilustración 4, muestra el balance hídrico del período de enero 2018 – enero 2019, del proceso de elaboración de la panela, mostrando las entradas y salidas de caudales durante dicho proceso.

Ilustración 4. Diagrama de Balance hídrico.



Fuente: elaboración propia.

2.3 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL

Con la finalidad de saber cuál es el estado actual del agua residual proveniente de la elaboración de la panela, la empresa Doña Panela LTDA; el 08 de agosto de 2019, realizó un análisis fisicoquímico del agua con la ayuda de los laboratorios Biopolab, ya que la empresa no cuenta con un sistema de tratamiento de aguas residuales implementado en su infraestructura. De manera adicional se suministra un antecedente de los análisis fisicoquímicos del agua residual registrados en el año 2012. (Ver anexo A)

La tabla 4, muestra los parámetros analizados y si cumplen o no con la Resolución 0631 de 2015, artículo 12 (sección de elaboración de productos alimenticios).

Tabla 4. Caracterización agua residual del proceso de elaboración de panela.

Parámetro	Unidades	Resultado	Res. 0631 de 2015	Cumple
pH		3,9 – 5,5	6 – 9	NO
DBO ₅	mg O ₂ /L	1758	600	NO
DQO	mg O ₂ /L	2633	400	NO
Sólidos	mg/L	46	200	SÍ
Suspendidos				
Totales (SST)				
Sólidos	mL/L	0,90	2	SÍ
Sedimentables (SSED)				
Grasas y Aceites	mg/L	11	20	SI
Ortofostatos	mg P- PO ₄ /L	12,16	Análisis y Reporte	-
Fósforo Total	mg P/L	4,54	Análisis y Reporte	-
Nitratos	mg NO ₃ ⁻ /L	165	Análisis y Reporte	-
Nitritos	mg NO ₂ ⁻ /L	0,114	Análisis y Reporte	-
Nitrógeno Amoniacal	mg NH ₃ ⁻ /L	<5,60	Análisis y Reporte	-
Nitrógeno Total	mg N/L	37,39	Análisis y Reporte	-
Cloruros	Mg Cl ⁻ /L	201,07	250	SÍ
Sulfatos	mg SO ₄ ²⁻ /L	111,49	250	SÍ
Cadmio	mg Cd/L	<0,0090	0,05	SÍ
Cinc	mg Zn/L	0,528	3	SÍ
Cobre	mg Cu/L	<0,058	1	SÍ
Cromo	mg Cr/L	0,054	0,5	SÍ
Níquel	mg Ni/L	0,078	0,5	SÍ
Plomo	mg Pb/L	<0,068	0,2	SÍ
Acidez Total	mg/L	1100	Análisis y Reporte	-
Alcalinidad Total	mg CaCO ₃ /L	76,01	Análisis y Reporte	-
Dureza Cálcica	mg CaCO ₃ /L	75,90	Análisis y Reporte	-
Dureza Total	mg CaCO ₃ /L	101,2	Análisis y Reporte	-
Color 436 nm	m ⁻¹	25,90	Análisis y Reporte	-
Color 525 nm	m ⁻¹	10,70	Análisis y Reporte	-
Color 620 nm	m ⁻¹	6,70	Análisis y Reporte	-
Temperatura	°C	25	40	SI

Fuente: elaboración propia.

Con base en los resultados obtenidos del análisis fisicoquímico del agua residual, realizado por los laboratorios Biopolab; se evidencia que, los parámetros críticos son: pH; DBO₅; DQO y color. Por lo tanto, mediante el desarrollo experimental (Ver capítulo 3) se muestra el porcentaje de remoción de cargas contaminantes partiendo de los parámetros mencionados anteriormente. En cuanto a los valores reportados de concentración para los metales analizados en la caracterización del agua residual industrial de la Planta de Producción de Doña Panela, los valores reportados para Cadmio, Zinc, Cobre, Mercurio, Cromo, Níquel y Plomo, son menores con respecto al valor establecido por el Artículo 12 de la Resolución 631 de 2015.

La DBO₅ y DQO, son los parámetros que reflejan los valores más críticos del efluente, puesto que la panela tiene como materia prima la caña de azúcar. Esta, como su nombre lo indica, es rica en azúcares, generando así, residuos de tipo orgánico presentes en el efluente como sólidos suspendidos y en su gran mayoría, como sólidos disueltos. Para el parámetro de pH, muestra unos valores de tendencia ácida, dando lugar a que el efluente al presentar alta carga orgánica, da paso a la posible generación de azúcares reductores, deteriorando aún más el efluente y dando un comportamiento de pH más ácido. La temperatura registrada, según el laboratorio Biopolab, encargado de llevar a cabo el proceso completo del análisis fisicoquímico del efluente, desde su recepción en la empresa Doña Panela LTDA, hasta sus resultados; notifica un valor de temperatura de 25 ° C. Este, en comparación con la Resolución 0631 de 2015, Artículo 12, muestra un valor límite de 40 ° C, dando lugar a que el efluente está dentro de los rangos legales establecidos. Sin embargo, es claro que la temperatura de salida del efluente que va a ser vertido muestra un valor alto, a pesar de cumplir con la normatividad ambiental vigente, se debe buscar alternativas con el sistema de tratamiento de aguas residuales, disminuir la temperatura del efluente para que su impacto sea menor. Para el color que presenta la muestra, hace referencia a la turbiedad que posee el efluente; este, muestra un color marrón verdoso oscuro, dando lugar a la presencia de altas cargas contaminantes de tipo orgánico y, además de residuos que provienen de las zonas de limpieza de pisos y equipos en las secciones de empaquetamiento. Según la Resolución 0631 de 2015 Artículo 12; este parámetro es registrado como "Análisis y Reporte". Con base en lo mencionado anteriormente, la turbiedad que muestra el efluente es un parámetro crítico, al igual que la DBO₅ y la DQO, y debe ser tratado de manera que muestre reducciones en su color (Turbidez) y no genere mayores impactos negativos ambientales en el entorno en donde se es vertido el efluente.

Los demás parámetros analizados por parte de los laboratorios Biopolab, no muestran valores que sobrepasen los límites impuestos por la Resolución 0631 de 2015, Artículo 12. Es decir, que el sistema de tratamiento debe garantizar que los valores reportados para estos parámetros se mantengan o muestren valores más bajos, para que las autoridades legales ambientales no generen algún tipo de sanción a la compañía, en cuestión al efluente vertido en los alrededores.

3. SELECCIÓN DE LA PROPUESTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES A NIVEL LABORATORIO

El propósito de este capítulo es la selección apropiada del tratamiento de aguas residuales, en el cual se considera la alternativa en la cual se extraigan en mayor medida los contaminantes (materia orgánica) que no cumplen directamente con la normatividad. Para la reducción de estos parámetros se realiza un balance entre las ventajas y las desventajas que ofrece la investigación de cada tratamiento. En este análisis se tienen en cuenta parámetros variables como el caudal del vertimiento, la dimensión del área requerida, costo del sistema en el momento de implementación, costo operacional y costos de mantenimiento.

3.1 MÉTODO DE SELECCIÓN

Con la finalidad de reducir los parámetros críticos y con base en las directrices legales para los diferentes factores que analizan y controlan los entes reguladores locales en las aguas provenientes de procesos industriales, se buscan alternativas de técnicas de tratamientos de aguas que garanticen la disminución de la alta carga contaminante orgánica y coloidal. En el caso de Doña Panela LTDA., al generar efluentes con características de aguas dulces y contaminantes orgánicos, se van a utilizar las técnicas de: Coagulación/ Floculación, Electrocoagulación y Lodos activados: sistema convencional.

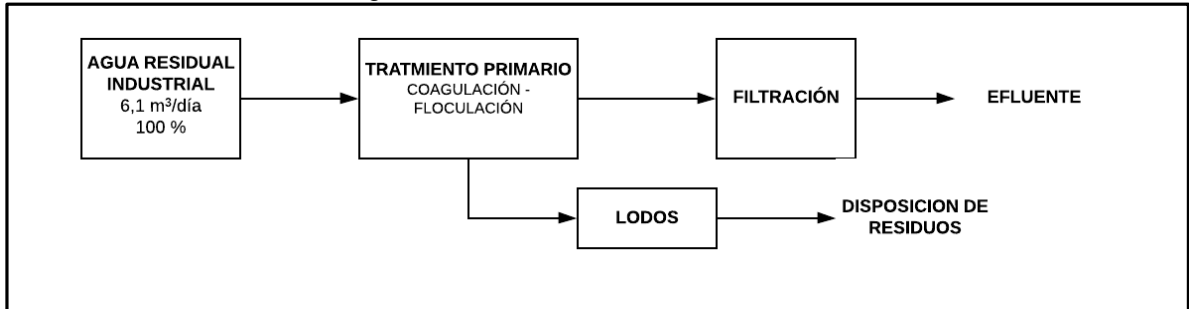
Las dos mejores opciones, según se seleccionen con la matriz de selección, serán evaluadas a nivel experimental, para evidenciar una variación de los parámetros a analizar en el desarrollo experimental.

3.1.1 Coagulación y floculación. Este método consiste en aglutinar las partículas en forma de pequeñas masas, con peso específico el cual es superior al del agua, estos reciben el nombre de flóculos o flocs. En este proceso se logra remover la turbidez orgánica e inorgánica, eliminar sustancias productoras de sabor u olor y logra algas y plancton en general.

Como su nombre lo indica consta de dos procesos fundamentales que permiten el tratamiento de aguas residuales. El primero es la coagulación, en esta la carga eléctrica del coloide es neutralizada anulando la repulsión que es causada por las fuerzas electrostáticas entre las partículas, permitiendo que se formen los flóculos y el segundo la floculación, que mediante la agitación lenta y moderada causa colisión entre partículas lo cual genera el engrosamiento del floculo, aumenta su peso específico y favorece la sedimentación de dichas partículas.

La ilustración 5, muestra el funcionamiento básico del sistema de coagulación/floculación:

Ilustración 5. Proceso de Coagulación/Floculación.



Fuente: elaboración propia.

El cuadro 4, muestra algunas de las ventajas y desventajas del método de coagulación / floculación:

Cuadro 4. Ventajas y desventajas del método de coagulación/ floculación.

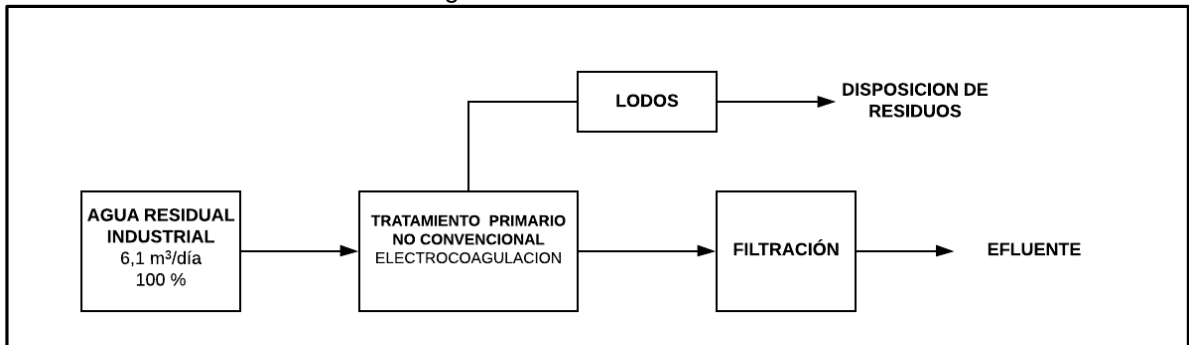
VENTAJAS	DESVENTAJAS
Alcanza porcentajes de remoción del DQO de 95%.	Mantenimiento constante del sistema de tratamiento.
Permite remover distintos tipos de sólidos de manera rápida y con bajos tiempos de retención.	Requiere el uso de productos químicos.
Favorece el proceso de filtración en etapas posteriores. El costo depende de la selección del producto químico que se vaya a usar.	Causa formación de lodo, debido compuestos tóxicos en la fase sólida. La eficiencia y funcionamiento depende del pH y de la agitación que se aplique en el proceso.

Fuente: elaboración propia.

3.1.2 Electrocoagulación. Este método no convencional de tratamiento de aguas residuales trabaja induciendo corriente eléctrica a través de electrodos los cuales, son el ánodo y cátodo, generando la liberación de iones metálicos y, favoreciendo la desestabilización de las partículas, permitiendo así, que estas se agrupen y aumenten su tamaño de partícula para luego ser removidas del efluente. Los electrodos más usados en la actualidad son el hierro y el aluminio, debido a su bajo costo de adquisición y alta eficiencia³⁹, estos también reciben el nombre de ánodos de sacrificio, se ubican en un arreglo paralelo entre sí. Mediante la corriente eléctrica se genera una fuerza electromotriz la cual desestabiliza a las partículas presentes en el efluente. De esta forma se generan un sólido con menos partículas coloidales, solubles o emulsificadas que en estado de equilibrio⁴⁰, forman un lodo de mucho menor peso en comparación con otros métodos, la suspensión del residuo facilita el retiro de sistema.

La ilustración 6, muestra el principio de funcionamiento del sistema de electrocoagulación:

Ilustración 6. Proceso de Electrocoagulación.



Fuente: elaboración propia.

El cuadro 5, muestra algunas de las ventajas y desventajas de este proceso.

³⁹RESTREPO MEJÍA Ana Patricia, ARANGO RUIZ Álvaro, GARCÉS GIRALDO Luis Fernando. La electrocoagulación: retos y oportunidades para el tratamiento de aguas. Electrocoagulación. Medellín, 2006. p. 63

⁴⁰ Arango Ruiz, Álvaro. La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Op. cit., p. 51.

Cuadro 5. Ventajas y desventajas del proceso de Electrocoagulación.

Ventajas	Desventajas
Muestra porcentajes de remoción de DQO superiores al 80%.	El coste del proceso se puede ver afectado en lugares donde sea costosa la electricidad.
Requiere de un sistema más simple al momento de puesta en marcha. No requiere bombas de alta presión y sistemas de control presurizados.	Es necesario el cambio, según se requiera, de los electrodos.
No se necesitan químicos para llevar a cabo el proceso .	Los electrodos pueden estar sujetos a pasivarse, es decir, a la formación de biopelículas que impide el intercambio iónico.
Destinado para lugares con poco espacio.	
Los lodos generados son más compactos y mucho más pequeños.	

Fuente: elaboración propia.

3.1.3 Lodos activados sistema convencional. Esta técnica parte de la remoción de carga orgánica presente en el agua a tratar, esto sucede gracias a los microorganismos que están presentes dentro del tanque de aireación, principalmente bacterias en suspensión, conocidas también como “licor mezclado”⁴¹.

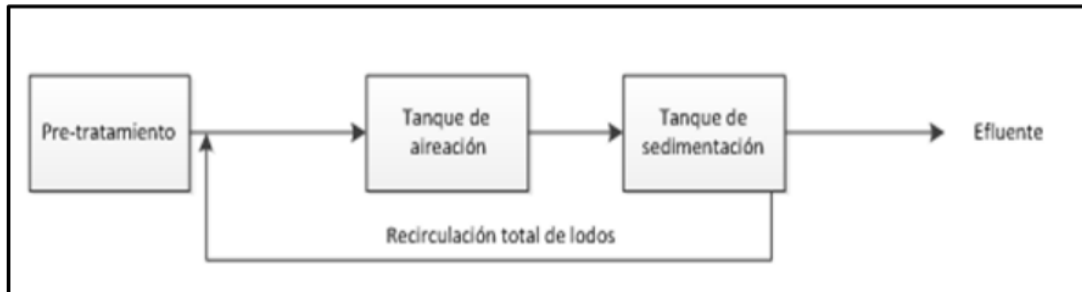
Para garantizar una etapa de proliferación óptima para los microorganismos es necesario controlar las condiciones aerobias, temperatura, pH y de material suspendido. Para ello se hace uso de sistemas de difusión o de aireación mecánica⁴². Además del tanque de aireación, esta técnica cuenta con un tanque sedimentador, en el cual se separan los sólidos de los líquidos provenientes de la capa bacterial retirada del tanque de aireación, un tanque de almacenamiento, un sistema de recirculación de lodos; con el objetivo de mantener una relación óptima de alimento/microorganismos (A/M) en el momento de que los microorganismos entran en la fase endógena, es decir, la fase en la cual se detiene su crecimiento y

⁴¹ RÁMIREZ CAMPEROS, Esperanza. Fundamentos teóricos de lodos activados y aireación extendida. PDF, [en línea], [consultado el 28 de marzo de 2019], p. 2-3. Disponible en internet: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018834/MEMORIAS2004/Capitulo1/1Fundamentosdelprocesodelodosactivados.pdf>.

⁴² Ibid., p. 3.

empiezan a consumir su propio protoplasma⁴³. A continuación, se muestra la ilustración 7. el diagrama de lodos activados de sistema convencional.

Ilustración 7. Esquema de la técnica de lodos activados sistema convencional.



Fuente: ROMERO. Op. cit., p. 287-290.

El en cuadro 4, se muestran las ventajas y desventajas de esta técnica.

Cuadro 6. Ventajas y desventajas de lodos activados, sistema convencional.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p>Flexibilidad de operación a través de un control racional de la biomasa presente en el proceso.</p> <p>Posee eficiencias de remoción de contaminantes alrededor del 85-95%.</p> <p>Funcionamiento altamente sencillo.</p> <p>Eliminación de olores No requiere de sedimentación primaria. Los lodos generados son altamente mineralizados, por lo tanto, no es necesario de un tratamiento posterior.</p>	<p>Se necesita un control permanente, tanto operativo como de análisis de laboratorio.</p> <p>Se requiere de una amplia cantidad de espacio para la instalación de los tanques de sedimentación y aireación.</p> <p>Puede presentar taponamiento, disminuyendo la eficiencia de remoción de contaminantes.</p>

Fuente: elaboración propia.

⁴³ RAMOS VELANDIA, Cristian Camilo. Evaluación de un sistema de tratamiento de lodos activados para la remoción de carga orgánica en las aguas residuales domésticas generadas en el colegio San Viator. Op. cit., p. 46.

3.2 SELECCIÓN DEL TIPO DE TRATAMIENTO

Con base en las alternativas de tratamiento propuestas y, las necesidades que presenta la empresa Doña Panela LTDA., en la reducción de cargas contaminantes en los efluentes procedentes del proceso productivo de la panela, se va a determinar cuáles son las dos mejores técnicas comparándolas entre sí. se realizó una matriz de priorización que, según Llamazares⁴⁴, es un método basado en la ponderación de ciertos criterios evaluados en una serie de opciones o posibilidades que pueden brindar la mejor solución. Para llevar a cabo este desarrollo, es importante tener en cuenta los siguientes pasos:

- Establecer los criterios que serán evaluados en cada alternativa, permitiendo así, una comparación entre cada una de ellas y observar cual es más adecuada.
- Asignar un valor de tipo cuantitativo a los criterios por medio del método de priorización (ver tabla 4), y determinar el criterio de mayor relevancia a la hora de seleccionar una alternativa.
- Comparar cada una de las alternativas en función de los criterios de selección establecidos por medio del factor de ponderación.
- Realizar una matriz de selección, en la cual se recopile la información obtenida de las matrices hechas en los pasos anteriores y, por medio de una suma ponderada seleccionar el mejor tipo de tratamiento para este tipo de industria.

Es importante resaltar que los criterios de evaluación son establecidos dependiendo de la finalidad que se quiera dentro del proyecto en el cual se esté desarrollando este método, es decir, que no serán los mismos criterios ni la misma cantidad, razón por la cual es importante realizar una muy buena delimitación al momento de seleccionar los criterios y su importancia dentro del proyecto.

A continuación, se muestra la tabla 5, de escala de valores del método matrices de priorización.

⁴⁴ LLAMAZARES REDONDO, Francisco. Los métodos de decisión multicriterio y su aplicación al análisis del desarrollo local. 2011, p. 60.

Tabla 5. Escala de valores de matrices de priorización.

Definición	Clasificación
Más importante	5
Importante	4
Neutro	3
Poco importante	2
Menos importante	1

Fuente: elaboración propia.

3.2.1 Criterios de selección. Una vez hecha la tabla de priorización, se procede a identificar los criterios que son críticos en el proyecto y mediante una matriz de pares se compararán todos estos entre sí para definir cuál es el de mayor importancia a la hora de tomar una decisión de los dos tipos de tratamiento a usar. Con base en información proporcionada por la empresa se establecieron los siguientes criterios, nombrados de mayor a menor relevancia.

3.2.1.1 Costos de implementación (C1). Se estableció este criterio como el de mayor importancia puesto que la empresa no cuenta con una solvencia económica lo suficientemente grande como para implementar un STAR completa, lo que busca es una propuesta que se ajuste a su presupuesto y a la disponibilidad de espacio con la que cuentan y, por supuesto, que cumplan con las características propias de un diseño de este tipo, que es la reducción de cargas contaminantes en los efluentes de su proceso productivo.

3.2.1.2 Reducción de parámetros (C2). Este criterio es el segundo más importante, puesto que la finalidad de esta propuesta es reducir carga contaminante del efluente proveniente del proceso productivo de la panela. Para esto, se tiene como punto de referencia las normas legales ambientales, regidos por la Resolución 0631 de 2015, la cual hace referencia al límite de los parámetros y cantidades permitidas para un agua residual industrial.

3.2.1.3 Estabilidad del sistema de tratamiento (C3). La estabilidad del sistema de tratamiento es otro criterio a tener en cuenta para la selección de la mejor opción del tipo de tratamiento a usar, puesto que este debe garantizar un buen desempeño cuando se presente alguna fluctuación durante el proceso. Es decir, que su desempeño tienda a ser lo más regular posible.

3.2.1.4 Mantenimiento y Control operativo del STAR (C4). Este criterio es importante tenerlo en cuenta, ya que cualquier equipo utilizado dentro del tipo de tratamiento en cualquiera de las opciones a evaluar, requerirá de inspecciones para asegurar su buen funcionamiento y que no se generen fugas, averías, etc. El no realizar un mantenimiento a las instalaciones puede generar desde malos olores hasta una falla dentro del STAR que obligue a una suspensión en la utilización de la misma.

3.2.2 Matriz de pares. Con base en la información descrita en el numeral 3.2 y con los criterios de selección establecidos, se parte para realizar una matriz de pares (ver tabla 5) que tiene como objetivo determinar cuantitativamente cuál es el orden de los criterios según su importancia (ver tabla 7).

La tabla 6, muestra los factores de ponderación:

Tabla 6. Determinación de los factores de ponderación.

	c1	c2	c3	c4	suma (α)	FP
c1	-	4	4	5	13	0,36
c2	2	-	4	4	10	0,28
c3	2	2	-	3	7	0,19
c4	1	2	3	-	6	0,17
TOTAL					36	

Fuente: elaboración propia.

Para determinar el factor de ponderación (FP), se realiza por medio la ecuación 5:

Ecuación 5. Factor de Ponderación.

$$FP_i = \frac{\alpha_i}{Total}$$

Donde:

FP_i= Factor de ponderación.

α_i= Suma del criterio de selección.

Una vez completa la matriz de pares, se procede a determinar porcentualmente cuál es el criterio de selección más importante. Los resultados se muestran en la tabla 7:

Tabla 7. Importancia (porcentual) de los criterios de selección.

Criterio	Porcentaje de importancia
c1	36%
c2	28%
c3	19%
c4	17%
	100%

Fuente: elaboración propia.

De la tabla anterior se determina que el criterio de selección más importante es costos de implementación (c1), seguido de reducción de parámetros (c2), Estabilidad del sistema de tratamiento (c3), y por último mantenimiento y control operativo de la STAR (c4).

3.2.3 Relación de importancia del tipo de tratamiento respecto a los criterios de selección. Esta relación tiene como finalidad indicar un nuevo factor de ponderación para saber cuál es el mejor tipo de tratamiento con respecto a cada uno de los criterios de selección establecidos en la sección 3.2.1. Con base en las matrices anteriores (ver tabla 7, 8 y 9) se realiza la siguiente matriz de pares (ver tabla 10) la cual reúne los factores de ponderación de cada alternativa en relación con los criterios de selección.

La tabla 8, muestra la relación entre criterios de selección y el tipo de tratamiento. La solución de esta matriz para el cálculo del factor de ponderación de cada uno de los tipos de tratamiento, se encuentran en el anexo F.

Tabla 8. Tipo de tratamiento en relación con los criterios de selección.

	Reducción de parámetros	Costos de implementación	Estabilidad del sistema de tratamiento	Mantenimiento del STAR y control operativo
Alternativa 1	0,38	0,5	0,5	0,22
Alternativa 2	0,38	0,33	0,28	0,39
Alternativa 3	0,25	0,17	0,22	0,39
TOTAL				1

Fuente: elaboración propia.

3.2.4 Matriz de selección del tipo de tratamiento. Con esta matriz de selección se busca la determinación del mejor tipo de tratamiento con base en los factores de ponderación obtenidos de las matrices anteriores y en relación con los criterios de selección, mediante la suma ponderada de los mismos. La tabla 9, muestra la suma ponderada de los tipos de tratamiento en relación con los factores de ponderación obtenidos para cada criterio de selección.

Tabla 9. Matriz de selección del tipo de tratamiento.

	C1	C2	C3	C4	
	(FP * FP')	(FP * FP')	(FP * FP')	(FP * FP')	Suma total
Alternativa 1	0,1354	0,0617	0,0972	0,0833	0,3777
Alternativa 2	0,1354	0,108	0,0648	0,0463	0,3546
Alternativa 3	0,0903	0,108	0,0324	0,037	0,2677
TOTAL					1

Fuente: elaboración propia.

A partir de los resultados obtenidos de la matriz de selección del tipo de tratamiento, se puede concluir que las dos mejores alternativas para llevar a cabo el desarrollo experimental a escala laboratorio son las alternativas número 1 y número 2; evidenciando un valor del factor de ponderación de 0,3777 y 0,3546, respectivamente. Lo cual indica que los tratamientos a usar son: Coagulación/Floculación y Electrocoagulación. Debido a que ambos procesos muestran una ventaja en el criterio de selección de costos de implementación (c1) para su puesta en marcha, se procede a llevarlos a cabo a escala laboratorio para determinar cuál de los dos presenta un mayor porcentaje de remoción (c2) y de esta forma realizar el dimensionamiento de equipos y análisis financiero con la que mejores resultados presente de ambas alternativas.

La alternativa número 3, que corresponde al tratamiento de tipo de tipo secundario, lodos activados: sistema convencional. No se lleva a cabo, con base en el resultado de la matriz de selección, a pesar de presentar mejores porcentajes de remoción de cargas contaminantes. esto se debe a que el criterio de mayor importancia es: costos de implementación (C1), debido a la capacidad financiera que posee la empresa hasta la fecha.

4. ANALISIS DE LOS METODOS SELECCIONADOS

Este capítulo parte de los resultados obtenidos en el capítulo 3. Se procede a realizar un estudio, de las variables que van a ser controladas y analizadas en las alternativas seleccionadas, para garantizar un correcto desempeño de las mismas. En este caso, los métodos que se ejecutaron en el desarrollo experimental son Coagulación/ Floculación y Electrocoagulación.

4.1 COAGULACION/ FLOCULACION

Se realizó un análisis y verificación de los resultados obtenidos bajo esta técnica. El desarrollo experimental se llevó a cabo en los laboratorios de la Universidad de América. Se determinaron los reactivos utilizados junto a los equipos con los cuales se realizaron estos experimentos. A su vez, se estableció una metodología donde se describe cómo se ejecutaron los respectivos ensayos del laboratorio. Lo anterior, se hizo con el fin de generar resultados que pudieran ser analizados, de tal manera que se tomó una decisión en cuanto a la selección del coagulante con mayor efectividad, eligiendo la concentración y dosificación adecuada para el tratamiento de la muestra de agua producto del proceso de elaboración de la panela de la empresa Doña Panela Ltda.

4.1.1 Variables que afectan la Coagulación / Floculación. Dentro del proceso de Coagulación/ Floculación, es clave determinar cuáles son las variables dentro del proceso que influyen en el rendimiento de este, como se mencionó en el capítulo 2, referente a las ventajas y desventajas del método en cuestión. Lo anterior, con la finalidad de controlarlas, mediante la variación de la dosificación y la concentración, con el objetivo de obtener las proporciones con los más altos porcentajes de remoción de la carga contaminante presente en el efluente.

4.1.1.1 Coagulantes. La elección de los coagulantes a usar en el tratamiento de coagulación/floculación, es de vital importancia para aumentar la eficiencia del tratamiento en la remoción de cargas contaminantes. Según Cogollo florez⁴⁵, los coagulantes más utilizados en la industria de tratamiento de aguas residuales son las sales de aluminio y hierro: para determinar los coagulantes a usar en el desarrollo experimental se hace uso de una matriz de selección, donde se evalúan los siguientes coagulantes:

⁴⁵ COGOLLO FLOREZ., Op cit.

- Alternativa 1: sulfato de aluminio.
- Alternativa 2: aluminato de sodio.
- Alternativa 3: sulfato ferroso.
- Alternativa 4: cloruro férrico.
- Alternativa 5: policloruro de aluminio.

La metodología de esta matriz de selección se realiza, siguiendo la misma metodología empleada en el proceso de selección e alternativa. Dicho esto, se procede a dar a conocer los parámetros de selección de los coagulantes.

- **C1: Rango de pH:** El pH es el parámetro clave para determinar los tipos de coagulantes a usar, puesto que el método de test de jarras depende de: los tiempos de agitación y del pH en el cual se lleva a cabo el proceso.
- **C2: Costos del coagulante:** Los coagulantes presentan fluctuaciones en sus precios dependiendo de la demanda de estos. Los coagulantes que son muy usados en la industria presentan precios competitivos en el mercado, mientras que los que aún no son comerciales en gran medida, son más costosos.
- **C3: Disponibilidad en el mercado:** La demanda de coagulantes depende de los resultados que presenten estos en los diferentes sistemas usados en la industria de tratamiento de aguas residuales. Además, no todos los coagulantes se encuentran con la misma facilidad, reduciendo así el conocimiento de estos.

Partiendo de la escala de valores de priorización del capítulo 3 (Ver tabla 7), se da la construcción de la matriz de determinación de los factores de ponderación, donde se evalúa cada uno de los criterios de selección, para determinar cuál de estos tiene mayor relevancia.

La tabla 10, muestra la determinación de los factores de ponderación.

Tabla 10. Determinación de factores de ponderación coagulantes.

	c1	c2	c3	suma (α)	FP
c1	-	4	5	9	0,56
c2	2	-	2	4	0,25
c3	1	2	-	3	0,19
TOTAL				16	

Fuente: elaboración propia.

Una vez completa la matriz de pares, se procede a determinar de manera porcentual, cuál es el parámetro que tiene mayor importancia entre sí. Los resultados en la tabla 11:

Tabla 11. Importancia porcentual de los coagulantes seleccionados.

Criterio	Porcentaje de importancia
c1	56%
c2	25%
c3	19%
c4	100%

Fuente: elaboración propia.

La tabla 11, muestra al parámetro que representa que mayor importancia posee, es el criterio número 1, rango de pH (c1), seguido del costo de coagulante (c2), y por último el criterio número 3: Disponibilidad de coagulante (c3).

La relación de importancia del tipo de coagulantes respecto a los criterios de selección se evidencia en la tabla 12, que se muestra a continuación:

Tabla 12. Tipo de coagulante en relación con los criterios de selección.

	Rango pH	Costos de coagulante	Disponibilidad en el mercado
A 1 Sulfato de aluminio	0,22	0,28	0,27
A 2 Aluminato de sodio	0,12	0,13	0,10
A 3 Sulfato ferroso	0,18	0,12	0,10
A 4 Cloruro ferrico	0,18	0,27	0,27
A 5 Policloruro de aluminio	0,30	0,20	0,27
TOTAL			1,00

Fuente: elaboración propia.

Una vez completa la tabla 12, se realiza la elaboración de la matriz de selección del tipo de coagulante. Con esta matriz de selección se busca la determinación de los tres mejores coagulantes para ser evaluados a escala laboratorio mediante el test de jarras.

La tabla 13, muestra la suma ponderada de los tipos de coagulantes evaluados en las diferentes etapas de la matriz de selección, en relación con los factores de ponderación obtenidos para cada criterio de selección.

Tabla 13. Matriz de selección de coagulantes.

	C1	C2	C3	
	(FP * FP')	(FP * FP')	(FP * FP')	Suma total
Alternativa 1	0,1213	0,0708	0,0507	0,2428
Alternativa 2	0,0653	0,0333	0,0190	0,1177
Alternativa 3	0,1027	0,0292	0,0190	0,1508
Alternativa 4	0,1027	0,0667	0,0507	0,2200
Alternativa 5	0,1680	0,0500	0,0507	0,2687
TOTAL				1,0000

Fuente: Elaboración propia.

Partiendo de los resultados de la tabla 13, se hizo selección de las siguientes alternativas: alternativa 1, alternativa 3 y alternativa 5; haciendo referencia a los coagulantes: sulfato de aluminio (0,24228), cloruro férrico (0,2200) y policloruro de aluminio (PAC) (2687), respectivamente. Los valores obtenidos mediante el desarrollo de matriz de selección, muestra estos tipos de coagulantes como lo más óptimos para proporcionar mejores resultados de remoción de carga contaminante presente en el agua residual industrial proveniente del proceso de elaboración de la panela; debido a su versatilidad de pH, precios de fácil acceso y de gran disponibilidad en el mercado⁴⁶.

En el cuadro 7, se muestran los coagulantes utilizados en el desarrollo experimental y sus propiedades:

⁴⁶ COGOLLO FLOREZ., Op cit.

Cuadro 7. Propiedades de los coagulantes seleccionados.

REACTIVO	DEFINICION	CARACTERISTICAS
<p>POLICLORURO DE ALUMINIO (PAC)</p>	<p>Hidroxocloruro de aluminio (PAC) Se encuentra en solución acuosa, se desempeña efectivamente como coagulante inorgánico usado en tratamiento de agua potable como residual.</p>	<p>Densidad: 1,35 g/mL a 25 °C. Estado Físico: Líquido Ambar, Transparente. Olor: Característico. Punto de ebullición: 100°C a 760 mmHg Punto de fusión: <-3°C pH 1% 4,6+/-0,5 Viscosidad: 60cP a 25 °C Soluble en agua.</p>
<p>SULFATO DE ALUMINIO (Al₂(SO₄)₃)</p>	<p>Es una sal utilizada comúnmente como coagulante para el tratamiento de agua potable y aguas residuales domésticas e industriales.</p>	<p>Color: Blanco. Estado Físico: Granular o polvo. Moderadamente corrosivo cuando se disuelve en agua. Olor: Ninguno</p>
<p>CLORURO FERRICO (ClFe₃)</p>	<p>Es un compuesto químico que pertenece al grupo de los haluros metálicos, frecuentemente usado como coagulante en el tratamiento de aguas residuales y potabilización del agua.</p>	<p>Densidad: 2,9 g/cm³ Punto. de fusión: 37 °C Solubilidad en agua, 92 g/100 mL a 20 °C.</p>

Fuente: elaboración propia.

4.1.1.2 pH. El control del pH dentro del proceso es de vital importancia, puesto que los coagulantes seleccionados brindan mejores resultados a un pH específico (Ver cuadro 2), y el no favorecer el pH óptimo para cada uno de los coagulantes, puede generar un funcionamiento deficiente del proceso. Además, trabajar con niveles de pH muy ácidos o muy alcalinos hace que sea necesario el uso de una mayor dosificación de coagulante para obtener resultados aceptables dentro del proceso, aumentando la cantidad de lodos generados y los costos de la PTAR.

4.1.1.3 Turbiedad. La concentración de coagulante se verá en aumento con una alta turbidez del agua residual industrial. Cabe aclarar que a valores de turbiedad muy altos, la dosificación del coagulante es menor, puesto que se espera una mayor probabilidad de colisión entre coloides. Sin embargo, a valores de turbiedad muy bajos, es necesario una gran cantidad de coagulante, ya que no hay tanta probabilidad de colisión entre coloides⁴⁷.

4.1.1.4 Agitación. Una agitación de la mezcla de manera uniforme y controlada en un período de tiempo determinado se hace con el propósito de homogenizar el agua residual con el coagulante usado. El tiempo de residencia y la intensidad de agitación son claves para un buen resultado de la disminución de turbiedad⁴⁸.

4.1.1.5 Dosificación de coagulante. El proceso de Coagulación/ Floculación se lleva a cabo a escala laboratorio por medio de un test de jarras, el cual se basa en determinar la cantidad óptima de coagulante necesario para desestabilizar las partículas dentro de la mezcla y de esta forma generar los flocs. A dosis bajas de coagulante no se desestabiliza lo suficiente los coloides, por lo tanto, no se da la formación de flocs. Por otra parte, una alta dosis de coagulante presenta un efecto invertido, cambiando las cargas de los coloides y formando flocs de muy bajo peso molecular lo que dificulta su aglomeración y la sedimentación es muy lenta⁴⁹.

⁴⁷ FUQUENE, Diana Marcela; YATE, Andrea Viviana. Ensayo de jarras para el control del proceso de coagulación en el tratamiento de aguas residuales industriales. [en línea]. Bogotá, Colombia [consultado el 19 de septiembre de 2019]. Disponible en internet: file:///C:/Users/Stevan/Downloads/2771-8143-1-SM.pdf.

⁴⁸ FUQUENE, Diana Marcela; YATE, Andrea Viviana. Ensayo de jarras para el control del proceso de coagulación en el tratamiento de aguas residuales industriales. Op., cit., p. 4.

⁴⁹ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Tratamiento De Aguas Residuales: Teoría y Principios De Diseño., op. cit, p 327.

4.1.2 Metodología. Según Tovar y Rodríguez⁵⁰ el diseño metodológico parte de la medición de las siguientes variables: turbidez, la cual es un valor representativo en unidades (NTU) que indica la presencia de carga coloidal orgánica o inorgánica⁵¹, es decir, mediante el haz de luz que impacta el cuerpo de agua permite conocer que tanta luz se refleja a través de él. El pH, es una variable crítica en el proceso de test de jarras, puesto que los coagulantes presentan mayores rendimientos en determinados intervalos de pH, distintos para cada uno de ellos. A su vez, la selección del coagulante y el agua residual a tratar influyen directamente en esta variable⁵². La temperatura, es una variable que afecta el rendimiento de la coagulación, ya que a mayor temperatura se ralentiza la velocidad de reacción del coagulante y, a temperaturas muy bajas, el coagulante tiende a aumentar su viscosidad, lo cual dificulta la formación de flocs⁵³.

Cada puesto del equipo del test de jarras se destina para evaluar la variación de la concentración en un rango conocido y dosificación según corresponda a la mejor alternativa.

La metodología de coagulación/floculación se lleva a cabo a partir de la Norma Técnica Colombiana (NTC 3903)⁵⁴ efectúa una desestabilización, mediante una agitación a 120 rpm durante 1 minuto. Luego, mediante la floculación se genera la aglomeración de flocs, aumentando su peso molecular y generando la sedimentación. Este proceso se da a una agitación de 40 rpm durante un periodo de 15 minutos. Posteriormente, se deja 30 minutos sedimentar para promover la generación de flóculos de gran peso molecular.

Basados en la bibliografía Standard Methods⁵⁵, se realiza el procedimiento de lectura de los parámetros: DQO, Turbidez y pH; de esta forma, los resultados obtenidos se generan con la menor tasa de error.

⁵⁰ TOVAR, Julia Amanda y RODRIGUEZ, Jayerth. Manual de laboratorio de química industrial inorgánica experimental. Bogotá D.C.: Fundación universidad de américa, 2012. p. 54-57.

⁵¹ MARCÓ, Leandro, et al. La turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadas a partir de fuentes superficiales. Propuestas a propósito del estudio del sistema de potabilización y distribución en la ciudad de Concepción del Uruguay (Entre Ríos, Argentina). En: REVISTA DE HIGIENE Y SANIDAD AMBIENTAL. vol. 4, p. 72-82.

⁵² RODRÍGUEZ RAMÍREZ, Carol Luciana and ZAPATA JÁUREGUI, Cristina. Influencia del pH, concentración de coagulante a base de aluminio y floculante en la remoción de sulfuros, sólidos suspendidos, demanda química y biológica de oxígeno de efluentes de rivera en curtiembres. Universidad Nacional de Trujillo, 2015. p. 46.

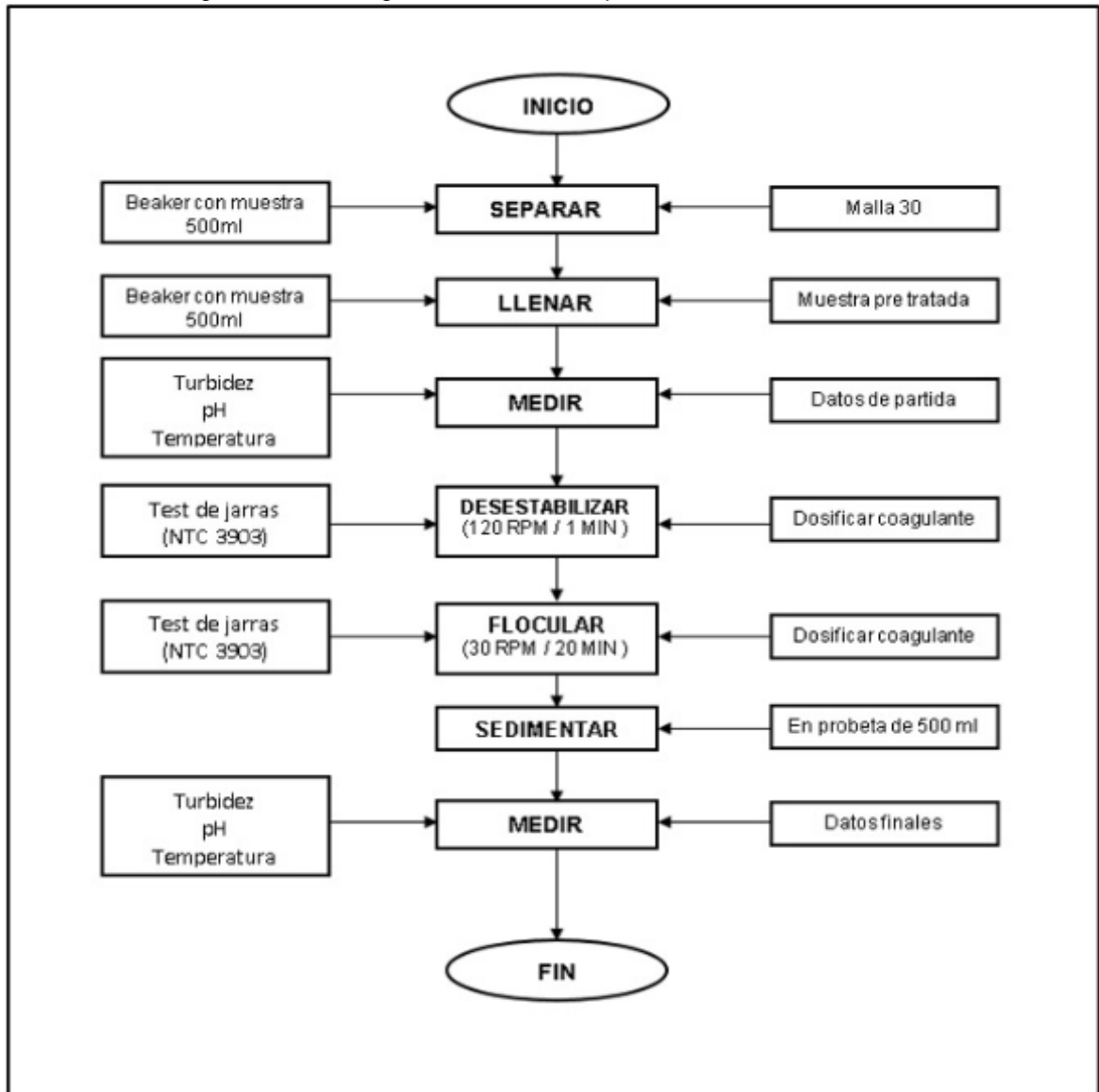
⁵³ LORENZO ACOSTA, Yaniris. Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación. En: ICIDCA.SOBRE LOS DERIVADOS DE LA CAÑA DE AZÚCAR. vol. 40, no. 2, p. 10-18.

⁵⁴

⁵⁵ AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENT FEDERATION. Standard Methods for the examination of water and wastewater. 23rd edition. Washington DC. 2017. p 5220: Chemical Oxygen Demand (COD).

La ilustración 8, muestra la metodología aplicada en el desarrollo experimental del sistema de coagulación / floculación.

Ilustración 8. Diagrama metodología del desarrollo experimental.



Fuente: elaboración propia.

En la tabla 14, se evidencian los valores de entrada de las variables más importantes en el diseño experimental.

Tabla 14. Parámetros iniciales del agua residual industrial.

AGUA RESIDUAL	
PARÁMETRO	VALOR
pH	4,5
Temperatura (°C)	17
Turbidez (NTU)	85,04
Sólidos suspendidos totales (ppm)	46
DQO (mg O ₂ /L)	2633
DBO (mg O ₂ /L)	1758

Fuente: elaboración propia.

4.1.2.1 Test de jarras. Con base en los factores clave que se deben tener en cuenta para lograr un adecuado desempeño del proceso, se realizó el test de jarras bajo los criterios de la Norma Técnica Colombiana 3903 “Método De Jarras En La Coagulación Y Floculación Del Agua”, la cual determina los pasos para la evaluación de los parámetros fisicoquímicos del agua, cuya finalidad es la remoción de cargas contaminantes presentes en el agua a tratar. El cuadro 8, muestra los parámetros a tener en cuenta en el proceso de coagulación / floculación:

Cuadro 8. Condiciones estándar para el test de jarras.

PARÁMETROS		VALOR
Mezcla rápida	Velocidad de agitación	120 rpm
	Tiempo de agitación	1 min
Mezcla lenta	Velocidad de agitación	30 rpm
	Tiempo de agitación	20 min
Sedimentación	Tiempo de sedimentación	30 min

Fuente: Norma técnica Colombia 3903 “Método De Jarras En La Coagulación Y Floculación Del Agua”

Una manera física de evidenciar que el coagulante está haciendo efecto dentro del proceso, es mediante la clarificación del agua residual. Para tener una evaluación más clara de la turbidez, se hace uso del índice de Willcomb. Mediante una tabla de tipo cualitativo se determinó qué cantidad de flocs se observa presente en la mezcla, como se evidencia en el cuadro 9:

Cuadro 9. Índice de Willcomb.

NUMERO DE ÍNDICE	DESCRIPCION
0	Ningún signo de aglutinamiento.
2	Floc muy pequeño, casi imperceptible.
4	Floc que sedimenta muy lentamente o no sedimenta.
6	Floc de tamaño relativamente grande, esponjoso, que sedimenta con lentitud.
8	Floc de sedimentación fácil aunque deja algo de turbiedad en el agua.
10	Floc de muy buena sedimentación que deja agua cristalina.

Fuente: GALVIS GONZALEZ, Nubia Janneth. Ensayos de tratabilidad del agua, una herramienta concluyente para el diseño de plantas de potabilización. Universidad de Manizales, 2014., p. 56.

Aunque el índice de Willcomb determina de manera cualitativa la cantidad de flocs presentes en la muestra de agua residual, no es suficiente para considerar que el coagulante está actuando de manera óptima o no. Por lo tanto, se deben tener valores cuantitativos para evidenciar de manera precisa la disminución de la turbidez presente en la muestra de agua residual. Esto se hace midiendo la turbidez del agua residual antes de ser sometida al proceso de tratamiento. Luego, se mide la turbidez del agua saliente del proceso. Para tener un valor de tipo cuantitativo, se mide el porcentaje de remoción de turbidez mediante la ecuación 6:

Ecuación 6. Porcentaje de remoción de turbidez.

$$\%Remoción\ de\ turbidez = \left(\frac{turbidez\ inicial - turbidez\ final}{turbidez\ inicial} \right) * 100$$

4.1.2.2 Preparación de coagulante. Se alistó, previo para este desarrollo experimental, soluciones de: sulfato de aluminio, cloruro férrico y policloruro de aluminio (PAC) al 10, 5 y 2%⁵⁶ v/v para cada uno de los coagulantes. El procedimiento para llegar a las concentraciones mencionadas se realizó de la siguiente manera. En un balón aforado de 100 ml, se agregó 90 ml agua destilada y se aforó hasta el límite del balón con el coagulante sulfato de aluminio. De esta forma, se tiene la concentración del 10%. Se repite el proceso con los demás coagulantes. Para las concentraciones de 5% y 2%, se realiza de la misma manera que la concentración del 10%; variando la cantidad de agua destilada con la cual se afora el balón. Es decir, para concentraciones de 5%, se agregan 95 ml de agua destilada y luego se afora hasta 100 ml con el coagulante de interés. Se repite el mismo procedimiento teniendo en cuenta la concentración final deseada y la pureza del compuesto

Estos compuestos se realizaron partiendo de una solución madre de concentración 10%. Para la preparación de las otras concentraciones de 2 y 5%, se llevaron a cabo diluciones de la solución al 10%. Se realizaron en un balón aforado de 100 ml, donde se adiciona 5 ml de la solución madre y se afora a 100 ml con agua destilada. De igual manera, se hizo con la solución para concentración de 2%, adicionando 2 ml de la solución madre al balón y luego se aforó a 100 ml con agua destilada. Este procedimiento se repite para cada uno de los coagulantes.

Siguiendo el procedimiento descrito en la Ilustración 7, se realizó el test de jarras para los coagulantes seleccionados. La tabla 15, muestra los resultados de cada concentración utilizada con el coagulante sulfato de aluminio.

Tabla 15. Coagulante Sulfato de aluminio.

PARAMETRO	JARRA 1	JARRA 2	JARRA 3
pH	7.04	7.01	7.07
Concentración coagulante (%)	2	5	10
Dosificación coagulante (ppm)	260	300	380
Turbidez (NTU)	80,37	78,16	78,18
% Remoción de turbidez	5,49	8,03	9,08
DQO (mg/L)	2585	2470	2403
% Remoción de DQO	1,82%	6,19%	8,74%

Fuente: elaboración propia.

⁵⁶ CERON PEREZ, Vicky Alexandra. estudio para la determinación y dosificación óptima de coagulantes en el proceso de clarificación de aguas crudas en la potabilización de aguas de la empresa empoobando e.sp. San Juan de Pasto. Universidad de Nariño, 2016., p. 55.

Los resultados para el coagulante de sulfato de aluminio usado en este ensayo, con concentración de 2, 5 y 10%, equivalentes a (20000 mg/L, 50000 mg/L, 100000 mg/L), mostraron una disminución de 9,08% a una concentración de 10% de coagulante, lo que demostró mayor remoción de turbidez. En cuanto a las concentraciones de 2 y 5%, exhibe remociones de turbidez de 5,49% y 8,03%, respectivamente. Estos resultados se obtuvieron una vez el pH llegó a 7, para lograr al final del ejercicio un residuo líquido con pH neutro a verter. En cuanto al porcentaje de remoción de la DQO, se puede observar que la mejor concentración de coagulante que genera mayor remoción es la de 10%, arrojando un resultado del 8,74%. Así mismo, se evidenció la presencia de sólidos solubles y flocs, los cuales por su reducido tamaño no llegaron a sedimentarse. Mostrando un valor según el índice de Willcomb de 4.

La tabla 16, muestra los resultados obtenidos con el coagulante de cloruro férrico.

Tabla 16. Coagulante Cloruro férrico.

PARAMETRO	JARRA 1	JARRA 2	JARRA 3
pH	7,01	6,92	7,04
Concentración coagulante	2	5	10
Dosificación coagulante (ppm)	450	410	540
Turbidez (NTU)	81,66	83,16	82,21
% Remoción de turbidez	3,97	2,21	3,33
DQO (mg/L)	2499	2354	2413
% Remoción de DQO	5,09	10,6	8,36

Fuente: elaboración propia.

El coagulante de cloruro férrico se evaluó en concentraciones de 2, 5 y 10% en relación v/v, que equivalen a (20000 mg/L, 50000 mg/L, 100000 mg/L), respectivamente. Una vez que se agregó el coagulante y llevó a la agitación lenta de 15 minutos, se dejó sedimentar por 30min para realizar la lectura de la turbiedad. Con base en los resultados obtenidos presentados en la tabla, se observó que la concentración de cloruro férrico que muestra mejor porcentaje de remoción de turbidez es la de 2%, con una dosificación de coagulante de 450 ppm; mientras que las concentraciones de 5 y 10% muestran resultados de 2,21 y 3,33%, respectivamente. La concentración de coagulante del 5%, muestra el mayor porcentaje de remoción de la DQO, con un valor de 10,6%; lo cual sugiere que para el caso particular del cloruro férrico tiene mejor desempeño a concentraciones bajas. Es importante destacar, que el cloruro férrico tiene como desventaja el aumento de la turbidez, debido a su color oscuro, cuando entra en contacto con el agua y comienza a desestabilizar los coloides, lo que puede alterar en ocasiones, el color del efluente.

Según el índice de Willcomb, este tipo de muestras se clasificaron con un valor de 4, donde el floc se sedimenta muy lentamente o no sedimenta y queda suspendido en la solución.

La tabla 17, muestra los resultados obtenidos con el coagulante de policloruro de aluminio:

Tabla 17. Coagulante policloruro de aluminio (PAC).

PARAMETRO	JARRA 1	JARRA 2	JARRA 3
pH	7,1	7,06	7,0
Concentración coagulante	2	5	10
Dosificación coagulante (ppm)	110	170	200
Turbidez (NTU)	74,67	70,49	67,45
% Remoción de turbidez	11,16	16,33	19,75
DQO (mg/L)	2244	2280	2210
% Remoción DQO	14,77	13,41	16,07

Fuente: elaboración propia.

El policloruro de aluminio (PAC) utilizado a concentraciones de 2, 5 y 10% en relación v/v, que es equivalentes a (20000 mg/L, 50000 mg/L, 100000 mg/L), muestra que a una cantidad de coagulante de concentración y dosificación de 10% y 200 ppm, respectivamente. El policloruro de aluminio a la concentración de 10%, muestra el mayor porcentaje de remoción de la DQO de todos los coagulantes evaluados en las concentraciones usadas en el desarrollo experimental. De la misma manera, la dosificación de este es menor en comparación con las dosificaciones usadas en los demás coagulantes, reduciendo costos de operación y disminuyendo la cantidad de lodos producidos en el proceso. El policloruro de aluminio a la concentración del 10%, proporciona los mejores porcentajes de remoción de turbidez, se redujo la turbidez un 19,75%, mientras que las concentraciones de 2 y 5%, muestran una remoción de 11,16% y 16,33%, respectivamente. Según el índice de Willcomb, la jarra 3 muestra un valor de 6, donde el floc se sedimenta, pero con lentitud. Además, el floc muestra un tamaño ligeramente más grande con respecto a los demás flocs formados por los coagulantes restantes.

4.1.2.3 Análisis de resultados. Con base en los resultados anteriores, se puede concluir que el mejor coagulante es el policloruro de aluminio (PAC), a una dosificación y concentración de 200 ppm y 10 %, respectivamente. Puesto que la remoción mejor reportada fue con estas condiciones en comparación de todas las pruebas realizadas con todos los coagulantes seleccionados. cabe resaltar, que el PAC, es un polímero que proporciona, según la bibliografía, mejores resultados en comparación con los coagulantes convencionales. Es importante tener en cuenta que a otros valores puede verse afectado su rendimiento. El índice de Willcomb es una gran herramienta para determinar de manera visual, cómo se evidencia el cambio del agua residual industrial tratada con la presencia del coagulante y con la agitación recomendada según la bibliografía. En concreto, para el mejor resultado obtenido, el PAC a una concentración de 10 %, muestra un valor de la escala de Willcomb de 6, es decir, que el coagulante genera desestabilizar los coloides presentes y promueve la generación de flocs, que, no son de gran peso molecular, lo cual refleja la ralentización de la sedimentación.

Es clave indicar que a pesar que el método de coagulación/floculación presentó reducciones de cargas contaminantes presentes en el agua residual proveniente del proceso de elaboración de la panela, sin embargo, no son los esperados, como se ha mencionado anteriormente, ya que no cumple con los valores límite de vertimientos de los parámetros críticos evaluados según la Resolución 0631 de 2015. Es preciso hacer uso de un sistema de tratamiento de agua residual diferente que proporcione la disminución en los valores límite de los parámetros críticos del agua residual industrial del proceso de elaboración de la panela, presentando así cumplimiento con la normatividad legal vigente.

4.2 ELECTROCOAGULACION

Dentro del proceso de electrocoagulación, es clave determinar cuáles son las variables dentro del proceso que influyen en el rendimiento de este, como se mencionó en el capítulo 2, referente a las ventajas y desventajas del método en cuestión. Lo anterior, con la finalidad de controlarlas, mediante la variación de la dosificación y la concentración, con el objetivo de obtener las proporciones con los más altos porcentajes de remoción de la carga contaminante presente en el efluente.

Con la finalidad de que el proceso se ejecute con la menor cantidad de errores posibles, se validaron los factores que intervienen en el método mencionado:

4.2.1 pH. Es una variable que determina la eficiencia del proceso a partir de la corriente eléctrica, favoreciendo la generación de especies iónicas e hidrógenos, donde el electrodo libera iones de metal en el medio acuoso. El pH inicial del agua a tratar indica cómo se van a favorecer las reacciones, bien sea de producción de iones de metal o de hidrógenos⁵⁷. Un pH inicial de carácter ácido favorece la creación de hidrógenos en el cátodo, dando lugar a la liberación de H⁺ en la reacción, por lo tanto, sube el pH. Mientras que el pH inicial sea de carácter alcalino, el ánodo favorece en la reacción la creación de hidróxidos que se unen a otros iones, disminuyendo el pH. El método de electrocoagulación funciona también como un regulador de pH⁵⁸.

Según la literatura, las mejores condiciones de pH para la electrocoagulación deben ser casi neutras. Al llevar el pH a neutro o cercano, puede elevar los costos energéticos del proceso. Con niveles de pH no controlados, se pueden ver afectaciones en la generación de hidrógenos e iones, disminuyendo el rendimiento del proceso.

4.2.2 Electroodos. El material que se use para la fabricación de las placas influye directamente en la efectividad del proceso. Según Cogollo Flores⁵⁹, los metales más usados en el proceso de electrocoagulación son el hierro y aluminio, puesto que muestran porcentajes de remoción. Además, son de fácil acceso y económicos en comparación con otros metales que usualmente no son tan usados. El cuadro 10, muestra algunas de las características de los electrodos usados:

Cuadro 10. Características de electrodos.

Hierro		Aluminio	
Baja resistencia a la corrosión		Alta resistencia a la corrosión	
Conductividad eléctrica	1,53x10 ⁷ m/s	Conductividad eléctrica	3,78x10 ⁷ m/s
Resistividad	8,90x10 ⁸ Ω*m	Resistividad	2,82x10 ⁸ Ω*m
Costo (COP)	2800 c/u	Costo(COP)	4500 c/u

Fuente: Conductividad térmica. Citado el 12 de septiembre de 2019. Disponible en: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Tables/thrcn.html>.

La distancia entre los electrodos determina cuan efectiva es la caída de potencial del sistema acuoso con respecto al área superficial de las placas. A distancias

⁵⁷ PRIETO GARCÍA Francisco, CALLEJAS HERNÁNDEZ Judith, REYES CRUZ Víctor Esteban, MARMOLEJO SANTILLÁN Yolanda, PRIETO MÉNDEZ Judith. Electrodisolución de electrodos de aluminio durante la electrocoagulación de un lacto suero ácido. vol.81 no.187.2014. p.58

⁵⁸ *Ibíd.*, P. 58.

⁵⁹ COGOLLO FLOREZ., Op cit.

cortas entre electrodos, disminuye el consumo energético y favorece la producción de burbujas, creando un flujo turbulento, que da lugar a una alta transferencia de masa y velocidad de reacción de los contaminantes presentes en el agua y los electrodos⁶⁰.

Para el diseño del sistema, según la bibliografía consultada, se optó por dejar un espacio entre electrodos de 2 cm, para que con dicha distancia entre estos se favorezca la velocidad de reacción.

4.2.3 Tiempo de retención. El tiempo es una variable que afecta en gran medida el porcentaje de remoción alcanzado, debido a que si es mayor el tiempo de retención hidráulico en el sistema se favorece la formación de flóculos, mientras que si es un período corto de retención, la cantidad de flóculos formados es menor. Sin embargo, es importante destacar que, a mayor cantidad de carga contaminante presente en el agua, mayor será el tiempo de retención para que se den la formación de flóculos.

4.2.4 Densidad de corriente. La densidad de corriente es un factor que afecta el método de electrocoagulación. La densidad de corriente se puede ver como la relación entre la corriente y el área de superficie del electrodo⁶¹, entre mayor sea el área de contacto de la placa, mayor será el intercambio iónico dentro de la celda.

4.2.5 Conductividad. Cuando la conductividad aumenta dentro de la celda, aumenta la densidad de corriente. “Cuando se mantiene constante el voltaje alimentado a la celda de electrocoagulación y adicionalmente el incremento de la conductividad, y manteniendo la densidad de corriente constante, se produce una disminución del voltaje aplicado”⁶². En ocasiones se hace uso de NaCl o CaCl²⁺ para favorecer la conductividad⁶³.

⁶⁰HAKIZIMANA, Jean Nepo, et al. Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. vol. 404, p. 8.

⁶¹ MELO HERNANDEZ, Anyi Paola; SACRISTAN YEPES, Laura Juliana. Evaluación de la remoción de nitratos por electrocoagulación. Bogotá D. C.; Universidad de América. 2018., p 50.

⁶² BAYRAMOGLU, Mahmut, *et al.* Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater. En: Separation and Purification Technology. 2004. Vol.37. p. 117-125.

⁶³ PEREZ PRADO, José Luís; RODRIGUEZ FLORES, Richard Edgar. Remoción de DQO y DBO del lactosuero ácido mediante en una celda de electrocoagulación. [en línea], 2018. Huancayo, Perú. [consultado el 23 de septiembre de 2019]. Disponible en internet: http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/5168/T010_20085567_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

4.3 PARAMETROS DE OPERACIÓN ELECTROCOAGULACIÓN

Los parámetros de operación son las variables a controlar durante todo el proceso, para de esta manera permitir el mejor desempeño del mismo. Para el desarrollo del proceso de electrocoagulación a escala laboratorio se realizó la selección de parámetros según Arango Ruiz⁶⁴. Las variables a controlar durante el proceso son las siguientes:

- Distancia entre electrodos: la distancia que se manejó para obtener una alta velocidad de reacción y mejor remoción de contaminantes es de 2 cm.
- El área de los electrodos, como se mencionó anteriormente, favorece la velocidad de reacción a medida que el área superficial de contactos de los electrodos es mayor. Es importante destacar que entre más grande sea el electrodo mayor será el consumo de energía necesario para llevar a cabo la reacción.
- Para la selección de los electrodos, basados en la bibliografía, se usó aluminio y hierro, como ánodo y cátodo, respectivamente. Estos últimos, son de fácil obtención en el mercado. El aluminio y hierro muestran la mejor eficiencia y son menos costosos en comparación con los demás electrodos usados en la electrocoagulación.
- Para el diseño de la celda, se consultó bibliográficamente y se tomó las dimensiones de la celda propuesta por Hernández y Sacristán⁶⁵. Donde se evidencia un diseño de celda con las siguientes dimensiones (ver cuadro 10). Se manejó este dimensionamiento de la celda debido a la cantidad limitada de agua residual industrial proveniente del proceso de elaboración de la panela de Doña Panela LTDA, puesto que la empresa no se encuentra ubicada en Bogotá, esto dificultó la obtención del agua residual para las sesiones experimentales. Sin embargo, con las dimensiones de la celda es posible conseguir muestras de agua suficientes para análisis posteriores.

⁶⁴ ARANGO RUIZ., Op., cit.

⁶⁵ MELO HERNANDEZ, Anyi Paola; SACRISTAN YEPES, Laura Juliana. Op., cit., p 58.

El cuadro 11 muestra las dimensiones del reactor y de los electrodos utilizados a escala laboratorio:

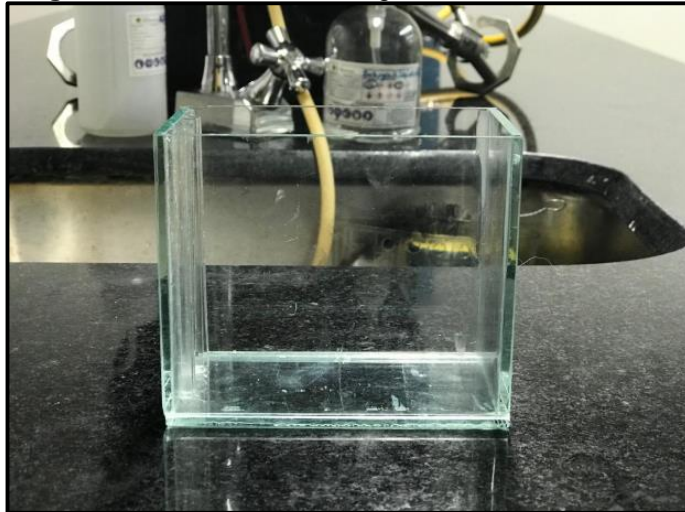
Cuadro 11. Dimensionamiento de celda y electrodos.

Material	Vidrio
Dimensiones de la celda	Longitud: 12 cm Alto: 9,8 cm Ancho: 6,8 cm
Dimensiones de electrodos	Longitud: 12 cm Alto: 9,8 cm Espesor: 0,3 cm
Distancia entre electrodos	2 cm

Fuente: elaboración propia.

Con base en el dimensionamiento de la celda y electrodos, la imagen 1, muestra la celda utilizada en escala laboratorio.

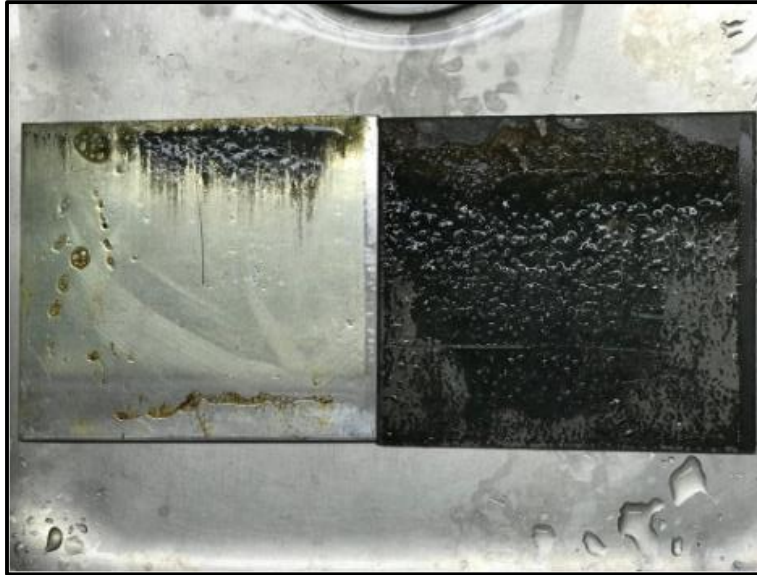
Imagen 1. Celda de electrocoagulación.



Fuente: elaboración propia.

El diseño de las placas se ve en la imagen 2:

Imagen 2. Electrodo de aluminio y hierro.



Fuente: elaboración propia.

4.3.1 Montaje a escala laboratorio. Para llevar a cabo la puesta en marcha a escala laboratorio, se hizo uso de una fuente de alimentación, la cual suministra de manera controlada la intensidad de corriente necesaria en las diferentes corridas, las cuales se explican más adelante. La imagen 3, muestra la fuente de alimentación utilizada a escala laboratorio.

Imagen 3. Fuente de alimentación.



Fuente: elaboración propia.

Esta fuente de alimentación fue conectada a cada uno de los electrodos mediante cables de pinza de caimán, los cuales se sujetaban de los electrodos en la parte superior de estos, sin que estuvieran en contacto con el agua, de esta forma, se garantizaba la intensidad de corriente en la celda. De acuerdo a lo consultado en la bibliografía, los electrodos van conectados de la siguiente manera: El cátodo (hierro), que es el destino de los cationes de la disolución, es conectado en el polo negativo de la fuente de alimentación. Mientras que el ánodo (aluminio), que es el destino de los aniones de la disolución, es conectado en el polo positivo de la fuente de alimentación.

La fuente de alimentación es de la referencia Erasmus DC Power Supply EF-030, y cuenta con las siguientes características que se muestran en el cuadro 12

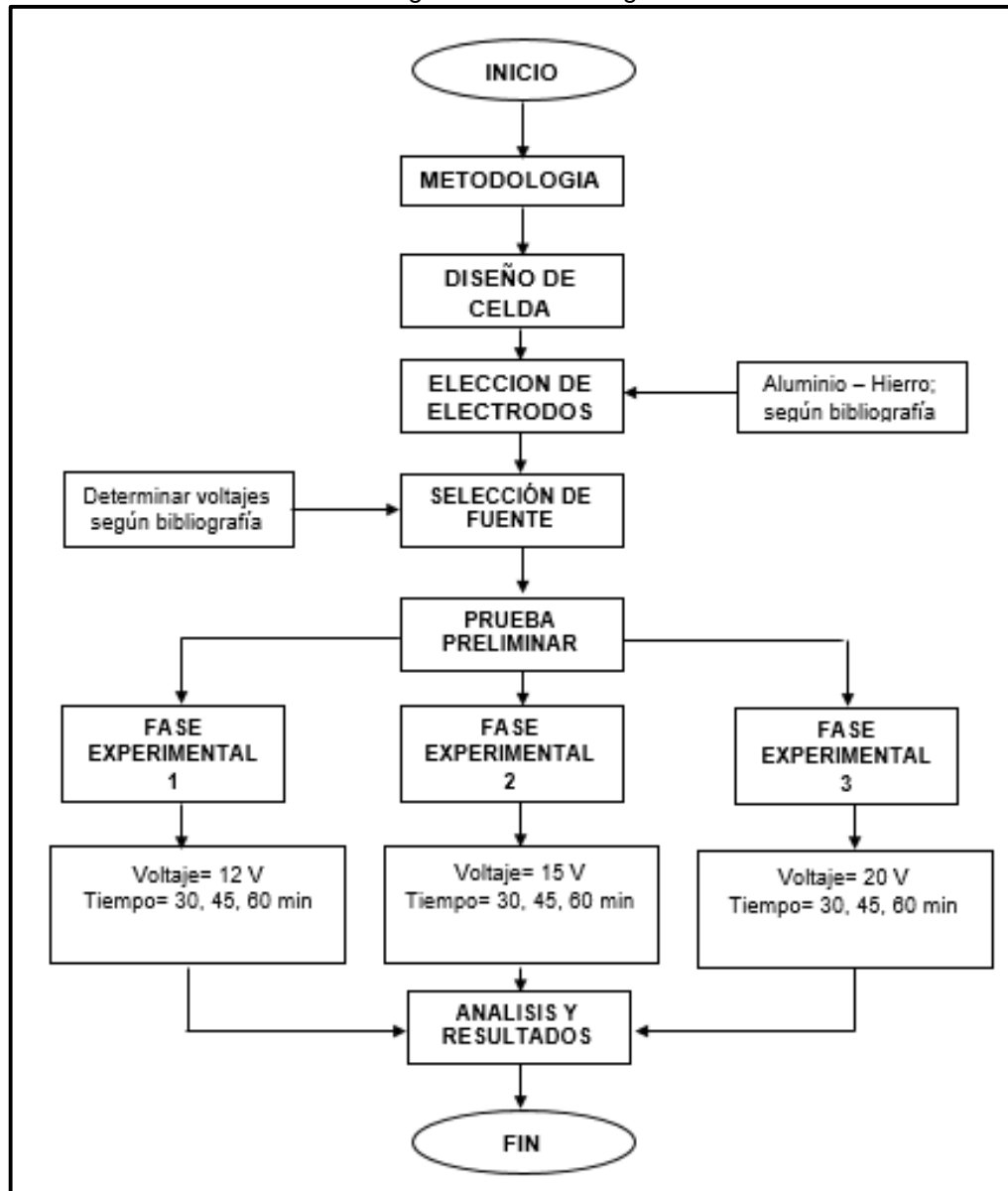
Cuadro 12. Características fuente de alimentación.

Indicador	Pantalla LED de tres dígitos
Tensión de salida	2 x 0... 30 V DC
Corriente de salida	2 X 5 mA ... 3 A
Potencia de salida	90 W
Frecuencia de funcionamiento	50 Hz / 60 Hz

Fuente: elaboración propia.

La ilustración 8, muestra la metodología llevada a cabo para el método de electrocoagulación a escala laboratorio.

Ilustración 9. Proceso metodológico de electrocoagulación.



Fuente: elaboración propia.

Para llevar a cabo el proceso de electrocoagulación a escala laboratorio, fue necesario tener una metodología clara al momento de poner en marcha el mismo, con el propósito de reducir los errores que pueden ocurrir durante el desarrollo experimental. Como se aprecia en la ilustración 6, el desarrollo experimental se llevó a cabo de la siguiente manera: manteniendo durante toda la práctica los mismos electrodos de aluminio y hierro, debido a que, según la bibliografía consultada, son la combinación que mejor porcentaje de remoción de carga contaminante muestra. Ahora bien, con la selección de electrodos y el dimensionamiento de la celda (ver

numeral 4.3) y la fuente de alimentación, se dio paso a la prueba preliminar que se divide en 3 ensayos, los cuales son descritas a continuación:

Una vez se hayan realizado cada una de las corridas, variando el tiempo de retención y la intensidad de corriente según corresponda, la corrida que evidencie los mejores resultados en cuanto a porcentaje de remoción de carga contaminante (DQO), fue con la que se realizó un triplicado, con la finalidad de corroborar los datos obtenidos en la primera fase del proceso para de esta forma tener mayor concordancia con los datos.

4.4 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El desarrollo experimental del proceso de electrocoagulación se explica de la siguiente manera:

4.4.1 Diseño de experimentos. En el desarrollo experimental del proceso de electrocoagulación, se realizó un diseño de experimentos, el cual tiene como finalidad, mediante el análisis estadístico de cada ensayo y réplica, identificar la influencia de los efectos de los factores establecidos en el desarrollo experimental sobre la variable respuesta⁶⁶.

El modelo factorial usado en el desarrollo experimental es de la forma: $A \times B$; donde A , hace referencia al número de niveles de un factor a y B , al número de niveles de un factor b . Este tipo de modelos se usan cuando el número de niveles no es igual al número de factores⁶⁷. Para el desarrollo experimental se tienen los siguientes factores, seguido del número de niveles de cada uno de los factores, distribuidos en cada una de las fases experimentales.

⁶⁶INTRODUCCION AL DISEÑO DE EXPERIMENTOS. [en línea]. [consultado el 25 de septiembre de 2019]., p. 1. Disponible en internet: <http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/jmmarin/esp/Disenno/IntroDE.pdf>

⁶⁷ Psikipedia. Diseño factorial. [en línea]. [consultado el 25 de septiembre de 2019]. Disponible en internet: <https://psikipedia.com/libro/39-libro/fundamentos-de-investigacion-en-psicologia/1533-diseno-factorial>.

4.4.1.1 Fase experimental 1. Esta primera parte se llevó a cabo controlando dos factores dentro de la experimentación, los cuales son: intensidad de corriente, que en esta primera fase es de 12 V⁶⁸ de manera continua; el otro factor es el tiempo de retención, donde se manejaron tiempos de: 30, 45 y 60 minutos⁶⁹, respectivamente, para las corridas. Con base en estos factores de variación, se determinó cuál es el mejor resultado en cuanto al porcentaje de remoción de carga contaminante (DQO). Se realizó duplicado de cada una de las corridas para tener mayor consistencia en los datos.

La tabla 18, muestra os factores a variar, ya que son las variables independientes del desarrollo experimental y a los niveles en los que se trabajaron los mismos.

Tabla 18. Factores y niveles experimentación 1.

FACTOR	NIVEL
Tiempo de retención	30 minutos
	45 minutos
	60 minutos
Intensidad de corriente	12 Voltios

Fuente: elaboración propia.

Para determinar el número de ensayos correspondientes a la fase experimental 1, se determina mediante la ecuación 7:

Ecuación 7. Número de ensayos fase experimental 1⁷⁰.

$$n (a * b) = \text{Número total de ensayos.}$$

Donde:

a = Número de niveles del primer factor.

b = Número de niveles del segundo factor.

n = Número de repeticiones.

Con base en la tabla 18, se tiene que el primer factor, el cual es el tiempo de retención, tiene tres (3) niveles; el segundo factor, intensidad de corriente, tienen un (1) nivel. Por tanto, reemplazando los valores en la ecuación 7:

$$2 (3 * 1) = 6$$

⁶⁸ KOPARAL, A. y ÖGUTVEREN, Bakir. Removal of nitrate from water by electroreduction and electrocoagulation. En: Journal of Hazardous Materials. vol. 89, no. 1, p. 91

⁶⁹ Ibid., p 89-91.

⁷⁰ Diseños factoriales. [en línea]. [consultado el 25 de septiembre de 2019]. Disponible en internet: https://issuu.com/clauidiasantiesteban12/docs/cap__tulo_5_dise__os_factoriales_2_.

El número de ensayos necesarios en la fase de experimentación 1 es de 6. Los resultados de dicha experimentación, se muestran en la tabla 19:

Tabla 19. Resultados fase experimental 1; intensidad de corriente 12 Voltios.

Parámetros	T=30 min		T=45 min		T=60 min	
	1	2	3	4	5	6
pH	5,13	5,09	5,61	5,63	5,88	5,85
Temperatura (°C)	15,4	15,4	15,5	15,4	15,4	15,4
DQO mg / L						
O ₂	1925	1951	1902	1891	1692	1679
Turbiedad (NTU)	30,3	32,1	34,54	33,87	27,56	29,04

Fuente: elaboración propia.

La tabla 20, muestra los resultados promedio de cada una de las corridas realizadas en la fase experimental 1:

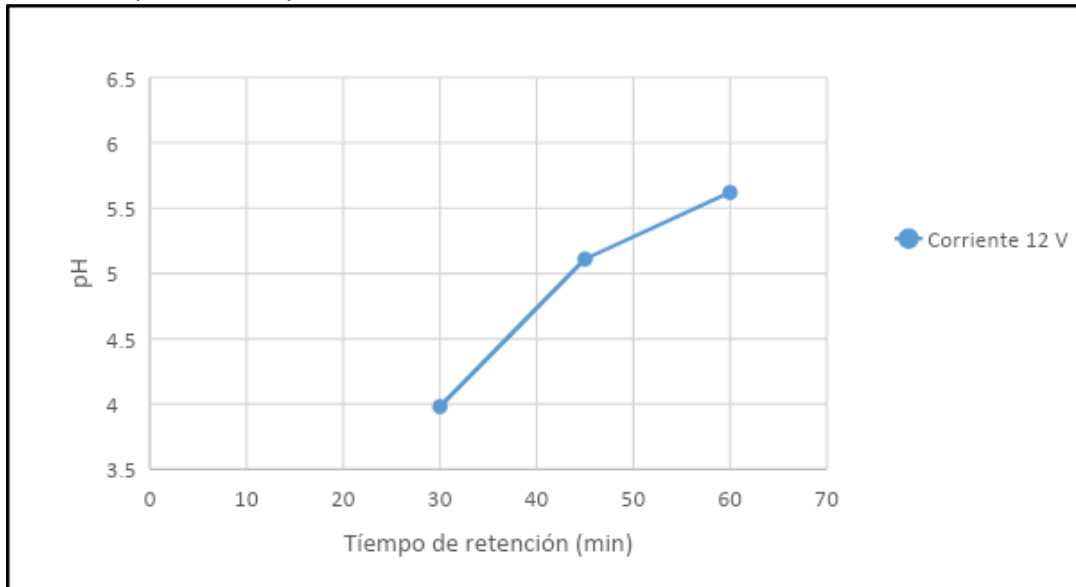
Tabla 20. Datos promedio fase experimental 1.

Parámetros	T=30 min	T=45 min	T=60 min
	C= 12 V		
pH	5,11	5,62	5,87
Temperatura			
a	15,4	15,5	15,4
DQO	1938	1897	1686
Turbiedad	31,2	34,21	28,3

Fuente: elaboración propia.

La gráfica 3, muestra la variación de pH vs el tiempo, respecto a las intensidades de corriente evaluadas.

Gráfico 3. pH VS. Tiempo. Con intensidad de corriente de 12 V.1



Fuente: elaboración propia.

De la tabla de resultados de la fase experimental 1 (ver tabla18), con una intensidad de corriente constante de 12 Voltios, se puede concluir que la corrida que mejores porcentajes de remoción de carga contaminante (DQO) presentó es la corrida 6; con un tiempo de retención de 60 minutos. Esto quiere decir que, en dicho tiempo de retención, es el que presenta mayor porcentaje de remoción de la DQO de 38,33% (1686 ppm), reduciendo así de manera significativa las cargas contaminantes presentes en el efluente, ya que se alcanza una velocidad de reacción más rápida en la formación de lodos en la superficie de la solución, en comparación con los tiempos de 30 y 45 minutos. Sin embargo, el parámetro de pH no presenta una alta eficiencia, ya que presenta un valor final de 5,87. Esto se da por la liberación de los ánodos de sacrificio, interfiriendo en la estabilización del pH lo largo de los diferentes tiempos de retención evaluados.

4.4.1.2 Fase experimental 2. Para esta segunda parte se manejó una intensidad de corriente de 15 Voltios⁷¹ y tiempos de retención de 30, 45 y 60 minutos⁷², respectivamente. Se realizó el mismo análisis de la fase experimental 1, que se basó en determinar cuál es la mejor combinación de factores para obtener la mayor remoción de las cargas contaminantes (DQO) presentes en el agua.

⁷¹ KOPARAL, A. y ÖGUTVEREN, Bakir. Removal of nitrate from water by electroreduction and electrocoagulation. En: Journal of Hazardous Materials. vol. 89, no. 1, p. 91

⁷² Ibid., p 89-91.

A continuación, la tabla 21 muestra los factores a variar, ya que son las variables independientes del desarrollo experimental y los niveles en los que se trabajaron los mismos.

Tabla 21. Factores y niveles experimentación 2.

FACTOR	NIVEL
Tiempo de retención	30 minutos
	45 minutos
	60 minutos
Intensidad de corriente	15 Voltios

Fuente: elaboración propia.

Trayendo a colación la ecuación 7, se da el cálculo del número de ensayos para la fase experimental 2. Reemplazando los valores de la tabla 21, del número de niveles de cada factor en la ecuación 7, se obtiene lo siguiente:

$$2 (3 * 1) = 6$$

El número de ensayos necesarios en la fase de experimentación 2 es de 6. Los resultados de dicha experimentación, se muestran en la tabla 22:

Tabla 22. Resultados fase experimental 2; intensidad de corriente 15 Voltios.

Parámetros	T=30 min		T=45 min		T=60 min	
	7	8	9	10	11	12
pH	6,4	6,38	6,46	6,32	6,6	6,68
Temperatura (°C)	15,4	15,5	15,5	15,5	15,4	15,4
DQO mg / L						
O ₂	1619	1673	1650	1708	1635	1638
Turbiedad (NTU)	15,49	15,2	19,85	19,02	19,91	19,65

Fuente: elaboración propia.

La tabla 23, muestra los resultados promedio de cada una de las corridas realizadas en la fase experimental 2:

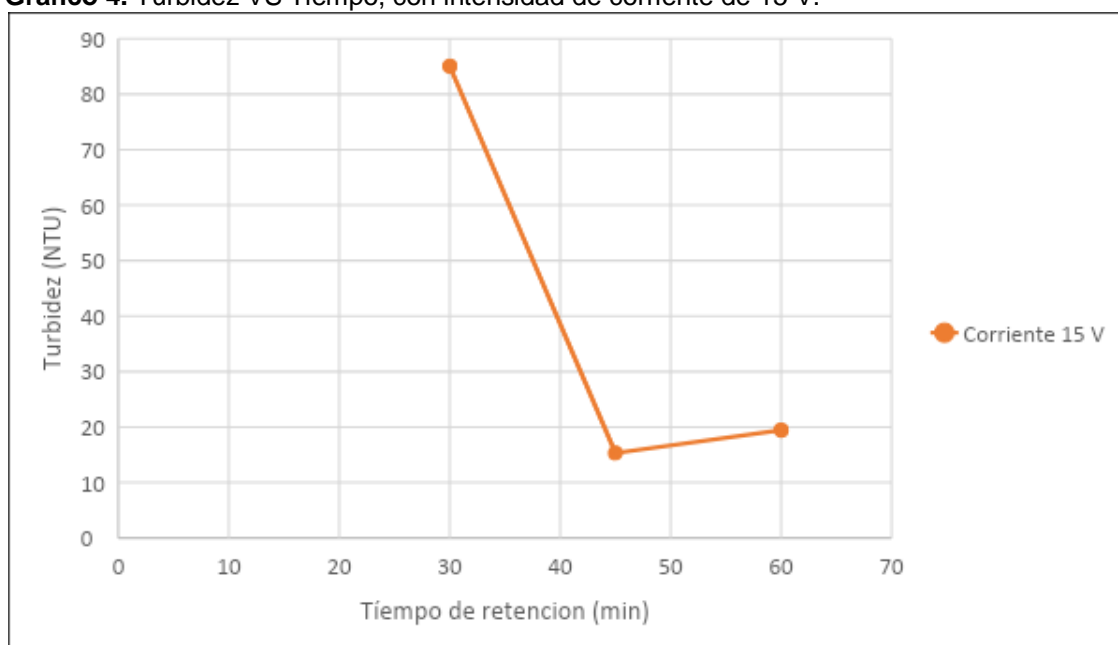
Tabla 23. Datos promedio fase experimental 2.

Parámetros	T=30 min	T=45 min	T=60 min
	C= 15 V		
pH	6,39	6,39	6,64
Temperatura	15,4	15,5	15,4
DQO	1646	1679	1637
Turbiedad	15,35	19,44	19,78

Fuente: elaboración propia.

A continuación, mediante el gráfico 4, muestra la variación de la turbidez vs el tiempo, con una intensidad de corriente constante de 15 V.

Gráfico 4. Turbidez VS Tiempo, con intensidad de corriente de 15 V.



Fuente: elaboración propia.

Las corridas 11 y 12 muestran valores de DQO de 1637 ppm; revelando porcentajes de remoción de 40,97%. Se puede evidenciar que el mejor tiempo de remoción de cargas contaminantes es el de 60 minutos, al igual que en la fase experimental 1. Lo mencionado, indica que, en períodos prolongados, con una intensidad de corriente de 15 Voltios, mejora la remoción de contaminantes. Sin embargo, a un tiempo de 30 minutos, en las corridas 7 y 8, se muestra un valor de la DQO de 1646 ppm, siendo ligeramente mayor en comparación con la DQO registrada a 60 minutos. Quiere decir, que se podrían disminuir costos energéticos si se utiliza un tiempo de retención de 30 minutos, llevando el tiempo de la electrocoagulación a la mitad, y proporcionando resultados igualmente eficientes. Además, con este tiempo

de retención, se prolonga el tiempo de vida útil de los electrodos, al ser sometidos a menor tiempo de retención dentro del reactor, disminuyendo costos de cambio de electrodos.

Para el parámetro de turbidez, las corridas 7 y 8, muestran un valor promedio menor de 15,35 NTU. Donde se muestra una reducción de 81,94%, mostrando de mejor manera, que el tiempo de retención de 30 minutos y una intensidad de corriente de 15 Voltios, presenta los resultados más eficientes de remoción de turbiedad y la DQO. Para la mejora de parámetro de turbidez, es posible el uso de un filtro de carbón activado luego de la etapa de electrocoagulación.

4.4.1.3 Fase experimental 3. Para la tercera fase experimental, se manejó la intensidad de corriente más alta de la toda práctica, la cual fue de 20 Voltios⁷³ y con tiempos de retención de 30, 45 y 60 minutos⁷⁴, respectivamente. Se realizó el mismo análisis de la fase experimental 1 y 2, que se basó en determinar cuál es la mejor combinación de factores para obtener la mayor remoción de las cargas contaminantes (DQO) presentes en el agua.

La tabla 24, muestra los factores a variar, ya que son las variables independientes del desarrollo experimental y a los niveles en los que se trabajaron los mismos:

Tabla 24. Factores y niveles experimentación 3.

FACTOR	NIVEL
Tiempo de retención	30 minutos
	45 minutos
	60 minutos
Intensidad de corriente	20 Voltios

Fuente: elaboración propia.

Realizando la misma metodología usada en la fase experimental 1, para determinar el número de ensayos en la fase experimental 3, se parte de los datos de la tabla 22, del número de cada factor en la ecuación 7; Se obtiene lo siguiente:

$$2 (3 * 1) = 6$$

El número total de ensayos en la fase experimental 3 es de 6. Los resultados de la experimentación anteriormente mencionada, se muestran en la tabla 25:

⁷³ KOPARAL, A. y ÖGUTVEREN, Bakir. Removal of nitrate from water by electroreduction and electrocoagulation. En: Journal of Hazardous Materials. vol. 89, no. 1, p. 91

⁷⁴ Ibid., p. 89 – 91.

Tabla 25. Resultados fase experimental 3; intensidad de corriente 20 Voltios.

Parámetros	T=30 min		T=45 min		T=60 min	
	13	14	15	16	17	18
pH	6,33	6,4	6,56	6,49	6,46	6,52
Temperatura (°C)	15,5	15,4	15,5	15,5	15,5	15,5
DQO mg / L						
O ₂	1616	1680	1623	1648	1572	1611
Turbiedad (NTU)	38,44	39,03	11,34	12,04	14,03	13,05

Fuente: elaboración propia.

La tabla 26, muestra los resultados promedio de cada una de las corridas realizadas en la fase experimental 3:

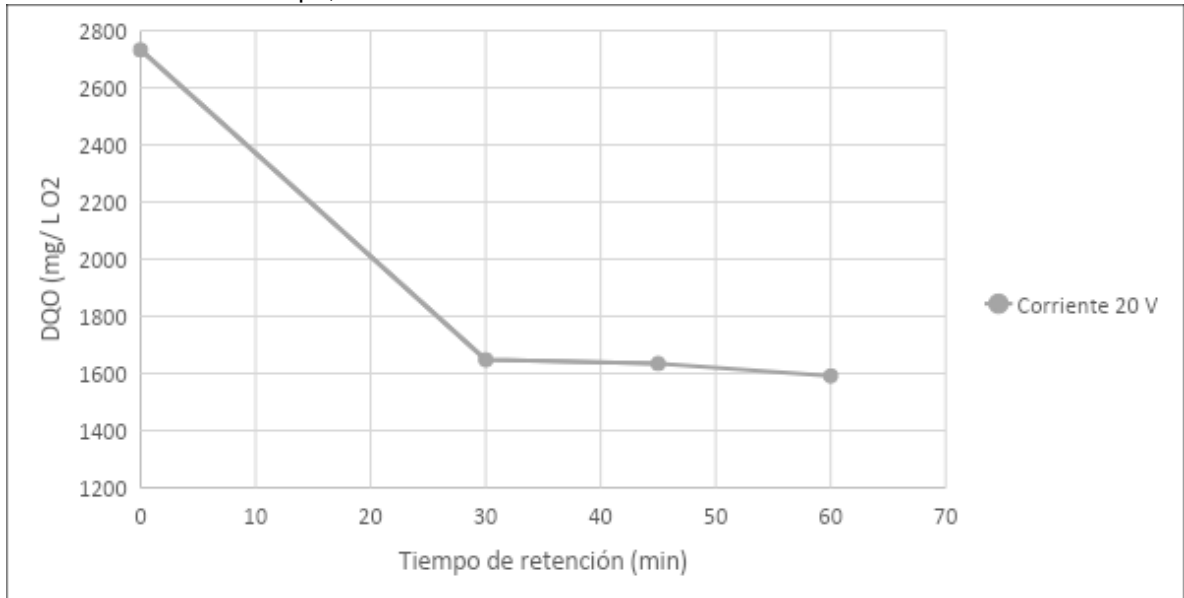
Tabla 26. Datos promedio fase experimental 3.

Parámetros	T=30 min	T=45 min	T=60 min
	C= 20 V		
pH	6,37	6,53	6,49
Temperatura			
a	15,5	15,5	15,5
DQO	1648	1636	1592
Turbiedad	38,74	11,69	13,54

Fuente: elaboración propia.

A continuación, mediante el gráfico 5, se muestra la variación de la DQO vs el tiempo, con una intensidad de corriente constante de 20 V.

Gráfico 5. DQO vs Tiempo, con intensidad de corriente de 20 V.



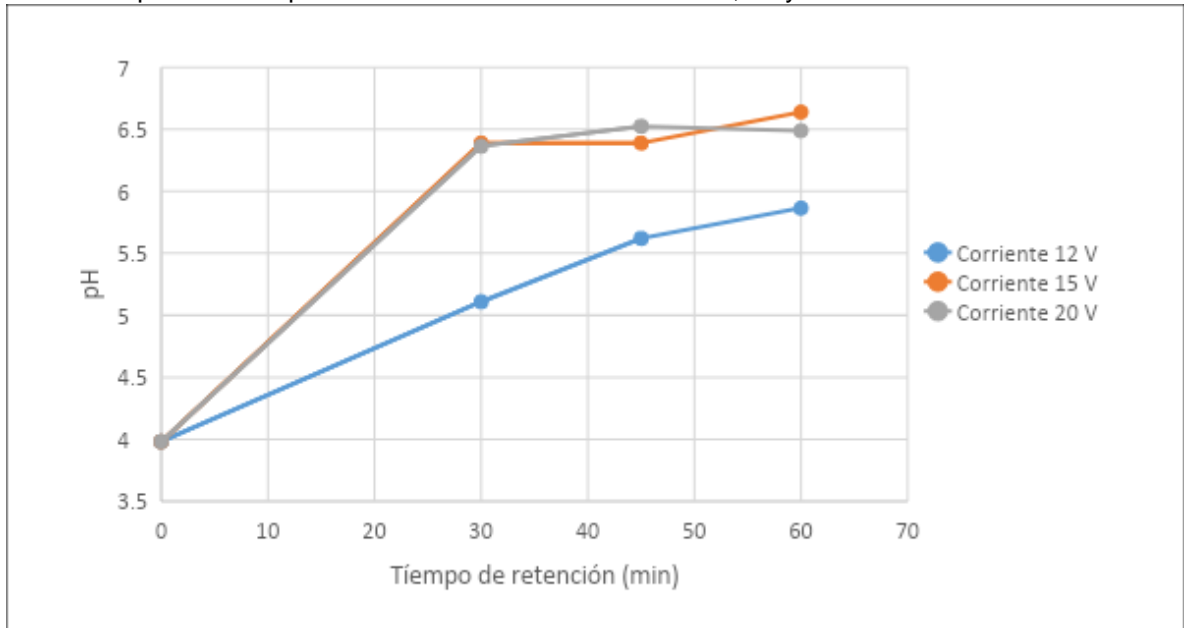
Fuente: elaboración propia.

Los mejores resultados de remoción de DQO son las corridas 17 y 18, con valor promedio de 1592 ppm, con un porcentaje de remoción de contaminantes de 42,59 %. A diferencia de las fases experimentales 1 y 2, la tercera muestra la mejor remoción en un tiempo de retención de 60 minutos y con la intensidad de corriente más alta (20 Voltios), esto muestra que a altas intensidades de corriente y períodos prolongados se puede encontrar una disminución de las cargas contaminantes presentes en el agua residual, además de una notable mejoría en el pH. Sin embargo, a altas intensidades de corriente y tiempos largos, llevando estos resultados a escala piloto o puesta en marcha del tratamiento, incrementaría de manera significativa los costos de operación, dependiendo de qué tan costosa sea la electricidad en el lugar en donde se vaya a implementar el proceso, equipos, etc.

Con base en los resultados obtenidos en las fases experimentales desarrolladas, se muestra una comparación de cómo se ven afectados los parámetros de: pH, turbidez y demanda química de oxígeno (DQO); al variar de manera controlada la intensidad de corriente y el tiempo de retención de cada una de las corridas.

El gráfico 6, muestra la relación entre pH vs Intensidad de corriente.

Gráfico 6. pH VS. Tiempo. Con intensidad de corriente de 12, 15 y 20 V.

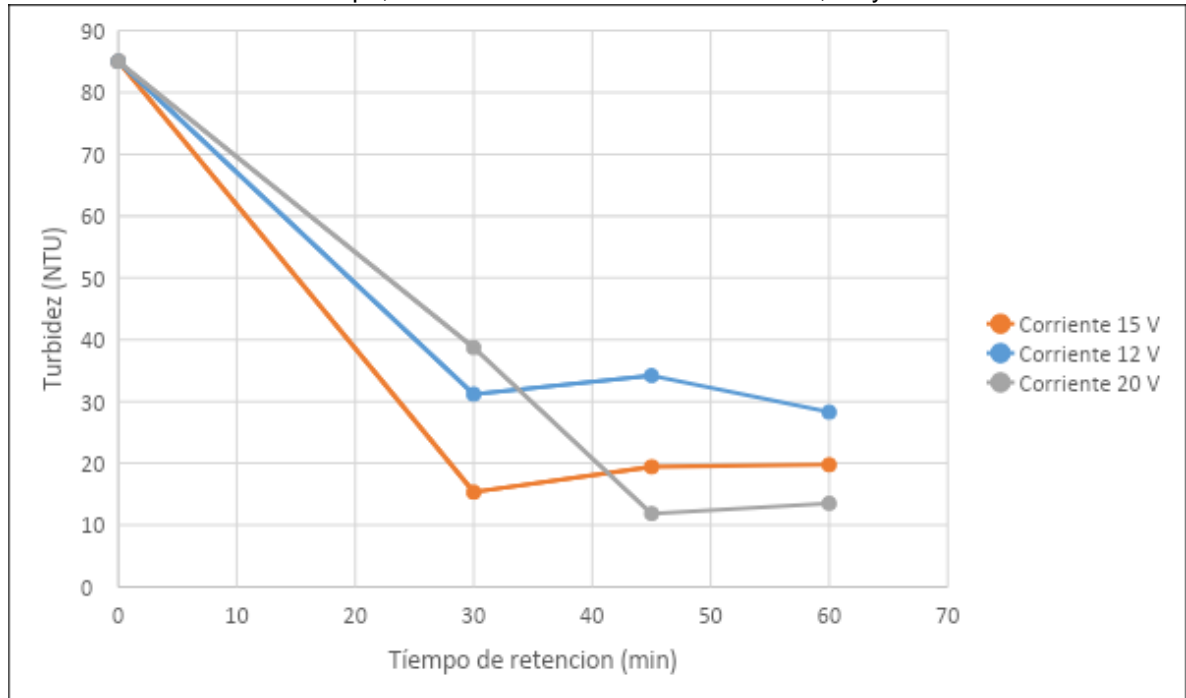


Fuente: elaboración propia.

Como se puede ver en la gráfica 6, la variable de pH muestra un acercamiento a un valor de 7, lo cual es positivo, puesto que la normatividad legal vigente tiene valores límite de pH entre: 6-9. El comportamiento de las corrientes de 12 y 15 Voltios, se debe a que el proceso, durante el intercambio iónico entre los electrodos y el efluente, en intervalos de tiempo relativamente breves, el sistema tiende al equilibrio, de esta forma el pH se desplaza hacia la neutralidad mejorando sus valores los tiempos. Para la intensidad de corriente de 12 Voltios se obtuvieron los siguientes valores de pH: 30 minutos, 5,11; 45 minutos 5, 62. Para la intensidad de corriente de 15 Voltios muestra los siguientes resultados: 30 minutos, 6,39; 45 minutos, 6,39. En la corriente de 20 Voltios, también genera valores óptimos de pH; sin embargo, en el tiempo de 60 minutos disminuye dicho valor, esto se debe a que el efluente tuvo un tiempo de retención muy largo, por lo cual la eficiencia del tratamiento llega al punto en el cual, los electrodos liberan partículas que no son absorbidas por los coloides, generando residuos de iones metálicos.

El gráfico 7, muestra la relación de turbidez vs tiempo de retención.

Gráfico 7. Turbidez VS Tiempo, con intensidades de corriente de 12, 15 y 20 V.

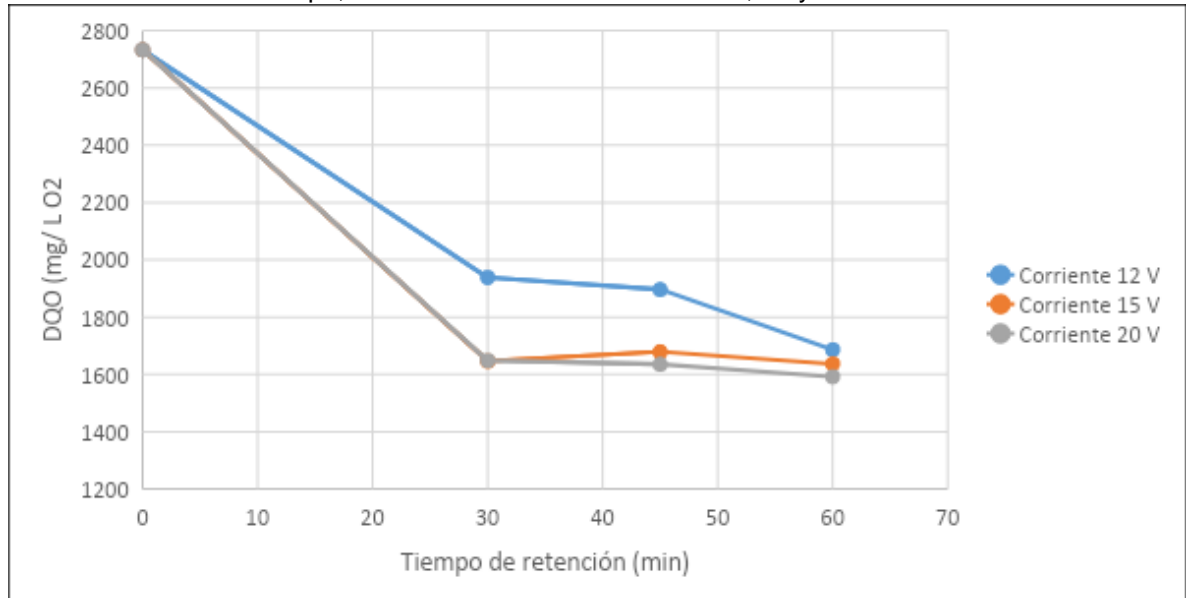


Fuente: elaboración propia.

Todas las fases experimentales que se ejecutaron, mostraron porcentajes de disminución de turbidez significativos; evidenciando que el resultado más eficiente, en cuanto a este parámetro, fue la fase experimental 3, con una intensidad de corriente de 20 V, mostrando el menor valor de turbiedad en el tiempo de retención de 45 minutos: 11,87 (reducción de 86,04%). Para las corrientes de 12 y 15 Voltios, se evidencia luego de 30 minutos, un aumento en la turbidez y su comportamiento tiende a estabilizarse. Esto puede darse, debido a que en tiempos de retención relativamente cortos y una intensidad de corriente media-baja, la turbiedad disminuye considerablemente ya que la velocidad de reacción aumenta, generando la formación de lodos rápidamente. Cuando se mantienen los valores de intensidad de corriente anteriormente mencionados, la velocidad de reacción se ve afectada, ya que los iones metálicos que sacrifica el electrodo de hierro, no promueven la formación de lodos y quedan suspendidos en el efluente, aumentando, nuevamente, la turbidez del medio acuoso.

El gráfico 8, muestra la relación de la DQO vs tiempo de retención.

Gráfico 8. DQO vs Tiempo, con intensidad de corriente de 12, 15 y 20 V.



Fuente: elaboración propia.

El parámetro de la DQO, mostró una disminución con todas las intensidades de corriente usadas. Además, como se puede observar en la gráfica, en un tiempo de retención de 60 minutos, todas las fases experimentales evidenciaron valores muy cercanos entre sí; dando lugar a que a cualquier intensidad de corriente y con un tiempo de retención de 60 minutos, todas las alternativas serían una buena opción para la disminución de la DQO. Cabe aclarar, que la corriente de 12 V, no muestra resultados convenientes de pH, por lo tanto, presenta menor eficiencia en comparación con las intensidades de corriente de 15 y 20 Voltios. Para las intensidades de corriente mencionadas, se puede evidenciar un comportamiento similar en cuanto al porcentaje de reducción de la DQO en el efluente. Dando lugar a que, en tiempos de retención cortos y con intensidades de corriente de tipo media-alta, como lo son las corrientes de 15 y 20 Voltios, se favorece la reducción de cargas contaminantes presentes en el efluente, ya que, la velocidad de reacción del intercambio de iones metálicos de los electrodos de hierro y aluminio, junto con los coloides presentes en el medio acuoso, aumenta, dando la rápida generación de lodos en la superficie del reactor, puesto que por medio de la electrocoagulación se dan lodos mucho más livianos y compactos.

El resultado de remoción de la DQO en intensidades de corriente de 15 Voltios es del 39,77%; en tanto para la corriente de 20 Voltios, muestra una reducción del 41,77%. Por tanto, la diferencia es mínima en cuanto al porcentaje de remoción, se recomienda el uso del sistema a una intensidad de corriente de 15 V y tiempo de retención de 30 minutos. Al trabajar el sistema en periodos cortos, evidencia una disminución en el consumo energético y una prolongación del tiempo de vida útil de

los electrodos; mostrando ventajas en el entorno económico en el presupuesto de funcionamiento y mantenimiento para la empresa Doña Panela LTDA.

La tabla 27, muestra los porcentajes de reducción de los parámetros, para cada una de las intensidades de corriente y los tiempos de retención evaluados.

Tabla 27. Porcentajes de remoción de pH, Turbidez y DQO.

Parámetro	T=30	T=45	T=60	T=30	T=45	T=60	T=30	T=45	T=60
	min	min	min	min	min	min	min	min	min
	C= 12 V			C= 15 V			C= 20 V		
Turbidez	63,31	59,78	66,72	81,96	77,15	76,74	54,45	86,04	84,08
DQO	29,09	30,61	38,33	39,77	38,57	40,12	39,70	40,16	41,77

Fuente: elaboración propia.

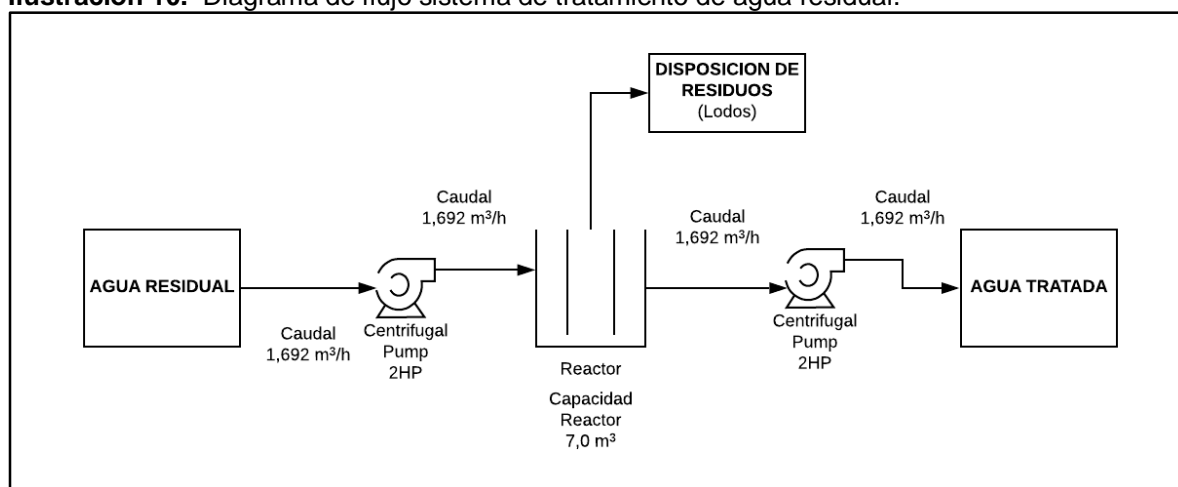
Para concluir, es importante destacar que la alternativa de electrocoagulación, como tratamiento solución al efluente generado en el proceso de elaboración de la panela en la empresa Doña Panela LTDA, muestra porcentajes de remoción de cargas contaminantes de turbidez y en DQO de: 81,96% y 39,77%, respectivamente. Sin embargo, estos valores alcanzados durante el desarrollo experimental, no cumplen con la normatividad legal vigente, según la Resolución 0631 de 2015, Artículo 12. Por lo tanto, es preciso hacer uso de un sistema de tratamiento diferente, para dar cumplimiento a los parámetros evaluados durante la práctica experimental, respecto a los valores límite permitidos por la ley, según la Resolución 0631 de 2015, Artículo 12.

5. DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS

Mediante este capítulo se busca dimensionar a escala industrial los materiales que se requieren para llevar a cabo el tratamiento de agua residual de la empresa Doña Panela Ltda. mediante la electrocoagulación, se determinaran los factores de diseño tales como material del reactor, tamaño del reactor, el material y tamaño del electrodo.

La ilustración 10, muestra el diseño del sistema de tratamiento de agua residual industrial:

Ilustración 10. Diagrama de flujo sistema de tratamiento de agua residual.



Fuente: elaboración propia.

5.1 TRAMPA DE GRASAS

Se planteó como pretratamiento para el agua residual industrial proveniente del proceso de elaboración de la panela, una trampa de grasas con la finalidad de remover material, tanto grasas como aceites, y mejorar la eficiencia de las etapas posteriores. Esta etapa es alimentada con el caudal proveniente de la limpieza de las zonas de empaquetamiento y limpieza de equipos.

La función de esta trampa es retener la mayor cantidad de grasa y aceite, para luego por diferencia de densidades el agua clarificada salga por medio de una descarga. Cabe resaltar, que el diseño de la misma no consta de partes mecánicas, de modo que no interfiere en el proceso de electrocoagulación. Su ubicación se determina de acuerdo a la localización del reactor, entre más cercano se situé, menor será la posibilidad de obstrucción y de acumulación.

Los parámetros de diseño según las RAS 2000, establecen que el tanque debe tener 0,25m² de área por cada L/s, respetando la relación ancho – longitud en un rango de proporción desde 1:4 hasta 1:18⁷⁵. La tabla 28, muestra los factores a tener en cuenta en el diseño de una trampa de grasas.

Tabla 28. Factores de diseño de la trampa de grasas.

Caudal	0,47 L/s
Relación Ancho - Longitud	1:4 hasta 1:18
Área (m ²)	0,25 m ² por cada Litro por segundo del caudal.

Fuente: elaboración propia.

5.1.1 Volumen de la trampa. Para determinar el volumen de la trampa de grasas, se hace uso de la ecuación 8.

Ecuación 8. Volumen de trampa de grasas⁷⁶.

$$V = Tr * Q$$

Donde:

V = Volumen de la trampa

Q = Caudal de diseño

Tr = Tiempo de retención

El tiempo de retención para el agua residual industrial en la trampa de grasas, se estimó en un intervalo de 15 a 30 minutos⁷⁷.

Reemplazando los datos en la ecuación 8:

$$V = 1800 \text{ seg} * 0.47 \frac{L}{s}$$

$$V = 0,846 \text{ m}^3$$

⁷⁵ REGLAMENTO TÉCNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO RAS - 2000. Tratamiento de aguas residuales; (Nov, 2000)

⁷⁶ SIERRA, Deily y ALBARRACIN, Carolina. Diseño e implementación de una unidad piloto de tratamiento biológico no convencional para los vertimientos generados en el matadero de Macanal (Corpochivor). Bogotá D.C 2005.

⁷⁷ ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Oc., cit., p 528.

5.1.2 Área superficial. El cálculo del área superficial de la trampa de grasas está determinado por la ecuación 9:

Ecuación 9. Área Superficial de la trampa de grasas.

$$As = \frac{V}{He}$$

Donde:

As = Área superficial (m^2).

He = Altura efectiva (m).

Se asume la altura efectiva, de modo que el área superficial tenga una relación ancho – longitud de 1:2⁷⁸; de esta forma las dimensiones son congruentes.

Reemplazando valores en la ecuación 9:

$$As = \frac{0.846 \text{ m}^3}{0,78 \text{ m}}$$

$$As = 1,08 \text{ m}^2$$

5.1.3 Ancho de la trampa de grasas. Para determinar el ancho de la trampa de grasas, se hace uso de la ecuación 10:

Ecuación 10. Cálculo ancho trampa de grasas.

$$l = \sqrt{As * 2}$$

Donde:

l = Largo de la trampa de grasas (m).

As = Área superficial (m^2).

Reemplazando los valores en la ecuación 10:

$$l = 1,4728 \text{ m}$$

⁷⁸ LEE, C. C. and LIN, Shun Dar. Handbook of environmental engineering calculations. McGraw Hill, 2007.p.4

$$As = \frac{l}{2} * l$$

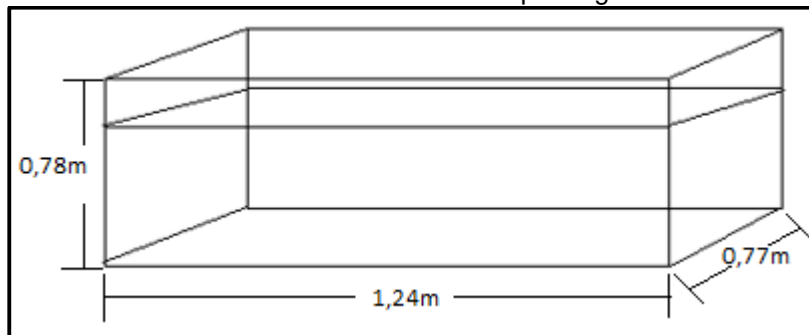
$$Ancho = 1,0845 \text{ m}$$

$$As = 1,4728 \text{ m} * 0,7364 \text{ m}$$

$$As = 1,0846 \text{ m}$$

La ilustración 11, muestra el dimensionamiento de la trampa de grasas:

Ilustración 11. Dimensionamiento de trampa de grasas



Fuente: elaboración propia.

5.2 DISEÑO DE REACTOR

Para el diseño de un reactor de electrocoagulación es de gran importancia tener claras sus características de diseño, verificar que ventajas aporta en el proceso y cuales desventajas disminuyen la eficiencia en el mismo. Por esta razón se analizan el reactor Batch⁷⁹ y el reactor tubular, el primero se caracteriza por tener una concentración C_A equivalente en todo su volumen, adicionalmente, se pueden implementar abiertos o cerrados con caudal volumétrico igual en la entrada y la salida.⁸⁰ El tiempo de residencia de estos reactores está determinado por el tipo de reacción y la eficiencia de la remoción, el dimensionamiento de la celda que se desea implementar para la electrocoagulación se determina dependiendo de la

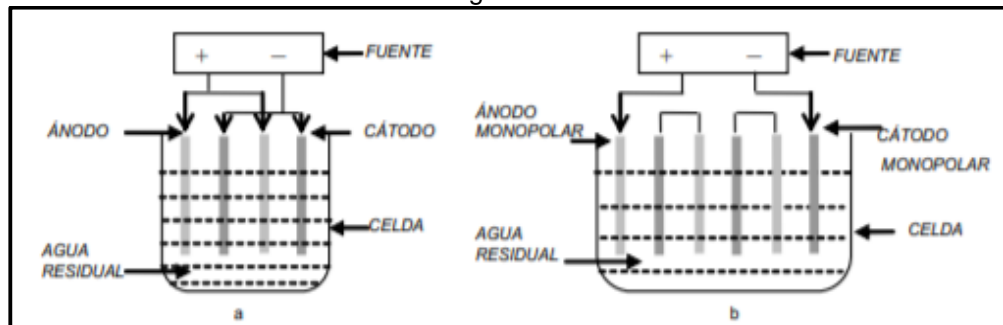
⁷⁹ 98 COURET. F, COSTA LOPEZ. J. Introducción a la ingeniería electroquímica. Barcelona. Reverté, S.A, 1992. p 95.

⁸⁰ Ibid., p. 95.

cantidad de carga contaminada a remover, el voltaje que se desea usar y el porcentaje de remoción que se desea alcanzar⁸¹.

El segundo, se caracteriza por su forma cilíndrica, generalmente se opera de forma horizontal, a través de él transita un flujo continuo que cuenta con una velocidad constante y el mismo tiempo de residencia. La concentración de material removido en la electrocoagulación varía de forma continua en la entrada y salida del reactor. Este reactor tiene flujo transitorio. En la ilustración 12, se observa un montaje de un sistema de electrocoagulación de flujo continuo.⁸²

Ilustración 12. Proceso de electrocoagulación.



Fuente: ARANGO RUÍZ, Álvaro. La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Revista Lasallista de Investigación. Enero-junio, 2005, vol. 2, no. 1, p. 70

Los parámetros de selección del reactor que se tienen en cuenta son las propiedades del sistema, los costos de implementación, la operación y finalmente el mantenimiento.

De acuerdo a lo anterior, el agua residual generada por Doña Panela Ltda. y los recursos a disposición se descarta el uso de un reactor tubular, ya que según la operación de la empresa no sería necesario un tratamiento continuo del agua, además, el costo energético es más alto al compararlo con un reactor Batch, el cual permite tener mejor control de la operación. En este tratamiento es importante tener en cuenta que se generan ciertos residuos los cuales deben ser retirados a medida que se opere el sistema, estos residuos son lodos sedimentables y sólidos flotantes; es aquí donde el mantenimiento juega un papel fundamental ya que aumenta los costos operativos y de no hacerse disminuye la eficiencia al sistema, de esta manera si se realizara un tratamiento del agua residual con un flujo continuo se debería programar necesariamente un mantenimiento preventivo el cual generaría

⁸¹ HERNANDEZ FLOREZ, Johan Sebastian; MEJIA ROA, Stephany. Evaluación del sistema de electrocoagulación para disminuir la carga de contaminante a escala laboratorio. Fundación Universidad América. Bogotá. 2019. p 97.

⁸² Ibid., p. 98.

paradas en el sistema y aumento de tiempos improductivos por acumulación de agua.

Por consiguiente, el reactor para el proceso de electrocoagulación en la empresa Doña Panela que se debe implementar es un sistema Batch o de flujo estacionario, el cual se dimensionara bajo dos electrodos cuya área superficial logre reducir las cargas contaminantes en el medio acuoso. No se tiene presente un sistema de agitación debido a que en el diseño experimental no se contó como alternativa.

De acuerdo a la cantidad de agua residual generada por la empresa Doña Panela en el capítulo 2, se planea implementar un panel solar (Ver anexo D y E) que garantice energizar el sistema de electrocoagulación utilizando la energía lumínica con el fin de reducir el consumo de electricidad y, de esta forma, aprovechar los recursos renovables de la zona y disminuir los costos variables de la PTAR.

De acuerdo a lo mencionado, se planea implementar un reactor con el objetivo de tratar la totalidad del caudal de vertimiento para operarlos según sea requerido por la empresa Doña Panela. Así mismo, se logra obtener un mejor control de la operación en el tratamiento, ya que la descarga de agua residual, al no ser continua y estar seccionadas en tres descargas a lo largo del día, genera tiempos muertos; por esta razón, y teniendo en cuenta el mantenimiento que se debe realizar, se dimensiona el reactor que debe tratar 7 m³ de agua al día. Este dimensionamiento se realizó teniendo en cuenta un factor de crecimiento del proceso productivo del 15%⁸³.

El tiempo de electrocoagulación se eligió debido a que en el capítulo anterior se obtuvieron mejores resultados para el proceso de electrocoagulación a 15 V y 30 minutos.

Como se mencionó en el capítulo 2, la empresa Doña Panela LTDA cuenta con un volumen de 6,1 m³ de vertimiento que se debe tratar, Por lo tanto, se propone emplear un (1) reactor, para determinar el volumen de este

La ecuación 11, muestra el cálculo del volumen de agua a tratar:

Ecuación 11. Volumen total de agua a tratar.

$$V_{\text{agua a tratar}} = 6,1\text{m}^3$$

⁸³ FOGLER H. Scott. Elementos de ingeniería de las reacciones químicas. Tercera edición. [en línea] [Consultado el 23 de septiembre de 2019] p. 55 <https://books.google.com.co/books?id=tEZ1yPBnxBkC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>

Los reactores para el método de electrocoagulación son seleccionados para tratar el agua de manera eficiente este proyecto está planteado y diseñado para usar un solo reactor, por lo cual, implementar más reactores serían innecesarios y económicamente inviable.

5.2.1 Dimensiones de los reactores: Teniendo en cuenta las dimensiones del reactor usado experimentalmente se plantea un diseño de fácil operación y limpieza, eficiente y económico.

Para determinar las dimensiones del reactor es necesario determinar la relación longitud-ancho y altura-ancho del reactor utilizado experimentalmente.

Relación entre la longitud (L) y ancho (A) del reactor experimental⁸⁴.

$$\frac{L}{A} = \frac{12 \text{ m}}{6,8 \text{ m}}$$

$$L = 1,76A$$

Relación entre la altura (H) y el ancho (A) del reactor experimental⁸⁵.

$$\frac{H}{A} = \frac{9,8 \text{ m}}{6,8 \text{ m}}$$

$$H = 1,44A$$

Para el cálculo de las dimensiones del reactor es necesario usar la ecuación 11:

Ecuación 12. Volumen de reactor⁸⁶.

$$V = L * H * A$$

⁸⁴ GUANOLUIZA LLIVE, Luis Ernesto. Dimensionamiento de un sistema de electrocoagulación aplicado al tratamiento de aguas residuales domésticas, con o sin irradiación de electrones acelerado. Trabajo de grado ingeniería química. Quito. Escuela Politécnica Nacional. Facultad de ingeniería química y agroindustria.2013., p 130.

⁸⁵ *Ibíd.*, p 131.

⁸⁶ *Ibíd.*, p 130.

Reemplazando las ecuaciones obtenidas mediante las relaciones y despejando se obtiene.

$$7 \text{ m}^3 = 1,76A * 1,44A * A$$

$$A = 1,4030m$$

Utilizando el valor obtenido en la ecuación 7 se reemplaza en la ecuación 8 y se determina el ancho y la altura del reactor.

$$L = 1,76A$$

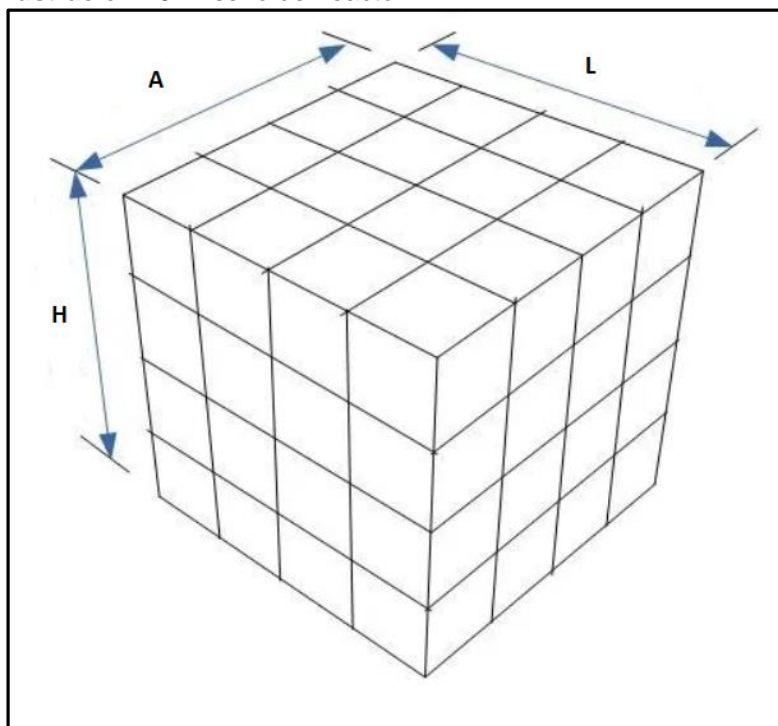
$$L = 2,47 \text{ m}$$

$$H = 1,44A$$

$$H = 2,02 \text{ m}$$

La ilustración 12, muestra el dimensionamiento del diseño del reactor:

Ilustración 13. Diseño del reactor.



Fuente: elaboración propia.

5.2.1.1 Material del reactor. Basados en la demanda del material y su costo⁸⁷ se recomienda el uso de polimetilmetacrilato (PMMA) el cual es un material fabricado en plástico con características similares al cristal o el vidrio, entre ellas esta su dureza, resistencia a la intemperie, alta resistencia a los impactos y buen aislante térmico. Se seleccionó este material por las anteriores características mencionadas que presenta frente a otros plásticos. Por último, este material es producto de referencias bibliográficas investigativas en procesos de electrocoagulación.

5.2.2 Dimensiones de los electrodos: Teniendo en cuenta el diseño del reactor experimental, la ecuación 13, muestra los cálculos para determinar las dimensiones del electrodo.

Ecuación 13. Relación nivel del agua-ancho⁸⁸.

$$\frac{h}{A} = \frac{0,083 \text{ m}}{0,068 \text{ m}}$$

⁸⁷ Sunplas - Plásticos, Lda. Polimetilmetacrilato (PMMA). [en línea]. [citado el 03 de septiembre de 2019]. Disponible en internet: <http://www.sunplas.pt/>

⁸⁸ GUANOLUIZA LLIVE, Luis Ernesto. Op., cit., p.131.

$$h = 1,22 A$$

$$h = 1,71$$

Para calcular el ancho de los electrodos, se utilizó la ecuación 14:

Ecuación 14. Ancho de los electrodos.

$$a_e = A$$

Donde:

a_e = Ancho de los electrodos.

A = Ancho del reactor.

$$a_e = 1,40 m$$

Para calcular el valor de la altura de los electrodos, es necesario determinar el espacio sobre el borde superior de los electrodos y el espacio bajo el borde inferior de los electrodos en el reactor experimental. Se hace uso de la ecuación 15:

Ecuación 15. Relación espacio bajo el borde inferior-nivel del agua.

$$\frac{b}{h} = \frac{0,005 m}{0,083 m}$$

$$b = 0,06 h$$

$$b = 0,06 * 1,22 * 1,71$$

$$b = 0,1030 m$$

Donde:

b = Espacio bajo el borde inferior de los electrodos en el reactor experimental.

h = Nivel del agua en el reactor experimental.

La ecuación 16, se utiliza para determinar la relación existente entre el espacio sobre el borde del reactor y el nivel del agua

Ecuación 16. Relación espacio sobre el borde - nivel del agua.

$$\frac{e}{h} = \frac{0,01 \text{ m}}{0,083 \text{ m}}$$

$$e = 0,12 h$$

$$e = 0,12 * 1,22 * 1,40$$

$$e = 0,21 \text{ m}$$

Donde:

e = Espacio sobre el borde superior de los electrodos.

h = Nivel del agua en el reactor experimental.

La altura de los electrodos se determina mediante la ecuación 17:

Ecuación 17. Altura de electrodos.

$$he = h - e - b$$

Donde:

he = Altura de los electrodos⁸⁹

h = Relación nivel del agua-ancho

e = Espacio sobre el borde superior de los electrodos

b = Espacio bajo el borde inferior de los electrodos en el reactor experimental

$$he = 1,71 - 0,21 - 0,10$$

$$he = 1,40 \text{ m}$$

En la tabla 29, se evidencian las medidas de los electrodos.

Tabla 29. Dimensiones de electrodos.

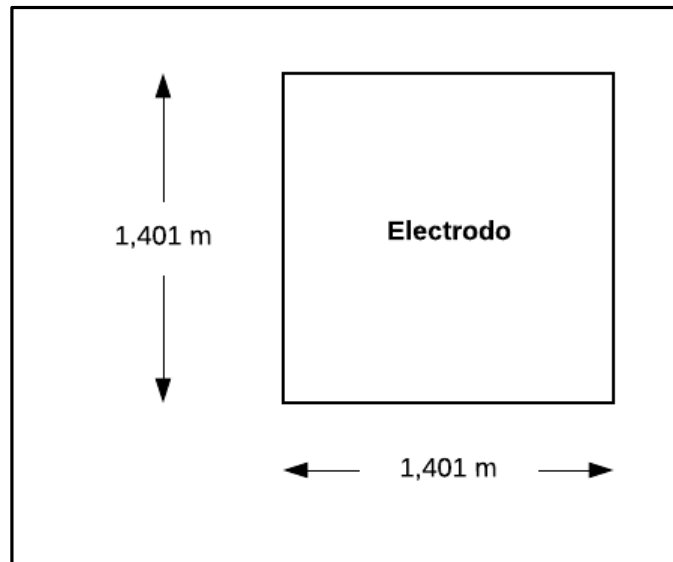
DIMENSIONES	VALOR
Ancho	1,403 m
Alto	1,401 m

Fuente: elaboración propia.

⁸⁹ | GUANOLUIZA LLIVE, Luis Ernesto. Op., cit., p.131.

Las dimensiones del electrodo se pueden observar en la ilustración 14:

Ilustración 14. Dimensiones electrodo.



Fuente: elaboración propia.

5.2.2.1 Material de electrodos. Según Soberanis, Dominguez, Gonzalez –Ramirez, Pireto – Garcia, Guevara – Lara, Garcia - Espinoza⁹⁰, sugieren usar en la experimentación para el tratamiento del agua residual los electrodos de aluminio y hierro ya que los resultados obtenidos con estos ánodos son los más eficientes en la reducción de parámetros en el proceso y en su relación costo beneficio.

Para su implementación a nivel industrial en el tratamiento del agua residual generada por la empresa Doña Panela el costo para el electrodo de aluminio es de \$454,000 COP y el del electrodo de hierro es de \$ 275,000 COP.

Cabe resaltar que el precio es un factor importante en los costos de implementación del sistema ya que los electrodos tienden a desgastarse producto de su uso, esto genera que deban ser cambiados en medida que se pasiven. es decir que se logre evidenciar la formación de biopelícula recubriendo el electrodo.

El hierro y el aluminio no generan cargas altas de contaminantes por este motivo al disponerse el costo de la disposición de los lodos es bajo. Los electrodos de hierro

⁹⁰ SOBERANIS, M. Piña, DOMÍNGUEZ, A. Martín, Revisión de variables de diseño y condiciones de operación en la electrocoagulación. Mexico. 2011.p 3.

remueven con mayor facilidad las grasas, la turbiedad y la demanda química de oxígeno (DQO).⁹¹

5.2.2.2 Número de electrodos. Por medio de la ecuación 18 se determina el número de electrodos que se requieren para la celda de electro coagulación.

Ecuación 18. Cálculo del número de electrodos⁹².

$$\#Electrodo = \frac{(ancho\ de\ celda) - 2 * (distancia\ electrodos\ cara\ lateral)}{(distancia\ máxima\ entre\ electrodos \pm espesor\ de\ la\ placa)}$$

$$Numero\ de\ electrodos = 42$$

Los dimensionamientos anteriormente mencionados, son teniendo en cuenta el caudal que maneja la empresa Doña Panela LTDA en la zona de empaquetamiento, puesto que es en dicho lugar donde se genera la mayor cantidad de agua residual de todo el proceso de elaboración de la panela. Además, para el dimensionamiento se tuvo en cuenta el espacio disponible para poder implementar el proceso de electrocoagulación en sus instalaciones, ya que la empresa está en la puesta en marcha de otro tipo de instalaciones con el propósito de expandir su mercado.

5.2.3 Bombas. La necesidad de transportar el agua residual desde las trampas de grasa hasta cada reactor de electrocoagulación hace indispensable el uso de bombas para mover el fluido de un punto a otro. Por esta razón, se sugiere la implementación de bombas centrífuga, las cuales se caracterizan por tener la capacidad de bombear fluidos con presencia de sólidos. Las bombas de la marca Bonve⁹³ se caracterizan por tener un porcentaje de eficiencia alto y ser resistentes a la corrosión.⁹⁴

⁹¹ SOBERANIS, M. Piña, DOMÍNGUEZ, A. Martín, Revisión de variables de diseño y condiciones de operación en la electrocoagulación. México. 2011.p 5

⁹² ARANGO RUIZ Álvaro y GARCES GIRALDO Luis Fernando. Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales dela industria láctea.2007. p. 64.

⁹³ Bonve. Ningbo Bonve pumps co. LTD. [en línea]. [consultado el 01 de octubre de 2019]. Disponible en: <http://en.bvwww.com>.

⁹⁴ BOMEQ. Bombas, Motores y Equipos. S.A.S. [en línea], [consultado el 06 de octubre de 2019]. Disponible en internet: <http://www.bomeq.com.co/contact.html>.

5.2.4 Filtro de carbón activado. Como complemento al sistema de tratamiento, se propone la implementación de un sistema de filtración con carbón activado, el cual tiene excelentes propiedades adsorbentes, entre sus características se destaca su porosidad, área superficial interna, variedad de grupos funcionales y una buena distribución de poros los cuales logran captar gran cantidad de moléculas.

Basados en las aplicaciones sugeridas en el artículo “El carbón activado, un material adsorbente”⁹⁵ se implementara un filtro de carbón activado con la finalidad de remover impurezas, que para el caso particular del agua residual de Doña Panela generan color y olor en el agua, así mismo todo residuo de materia orgánica.

El carbón activado es el medio filtrante establecido, ya que es un material con un elevado y variado grado de porosidad, tiene una superficie específica de 500 a 1500 m²/g por lo cual su capacidad adsorbente es tal, que 1 gramo puede absorber aproximadamente otro gramo de gases y líquidos⁹⁶ y su contenido de grupos químicos le dan gran capacidad para absorber sustancias ⁹⁷. Lo cual permite la disminución de parámetros como: DBO (demanda bioquímica de oxígeno y DQO (demanda) química de oxígeno. Además de reducir los niveles de color y de controlar los olores de las aguas residuales⁹⁸. Según un estudio realizado, los resultados de remoción de color para el jugo de caña mediante el carbón activado removieron un 88% de compuestos cromóforos presentes en el jugo desmenuzado y un 80% en el jugo claro⁹⁹.

Asimismo, la utilización de este sistema de filtración ofrece las siguientes ventajas: En aguas residuales con un gran contenido de aguas residuales industriales es eficiente para eliminar compuestos orgánicos disueltos, no es necesario una gran cantidad de espacio para su implementación y la adsorción mediante el carbón activo granular se puede incorporar fácilmente a cualquier instalación de aguas residuales existentes¹⁰⁰

⁹⁵PADRÓN, Rolando; RODRIGUEZ, Clara y GOMÉZ, Aláin. El Carbón Activado Un Material Adsorbente. Matanzas, Cuba.: Universidad de Matanzas., 2013. 16

⁹⁶OCHOA, Efrain. Diseño De Un Tren De Potabilización Para Una Planta Generadora De Agua Embotellada. Cholula, Puebla, México.: Universidad de las Américas Puebla., 2005. p. 51.

⁹⁷SOLÍS, Julio, et al. Obtención de carbón activado a partir de residuos agroindustriales y su evaluación en la remoción de color del jugo de caña. enero-junio, 2012.vol. 27, no. 1, p. 36.

⁹⁸Empresa Andaluza. Opciones De Tratamiento De Aguas Residuales Mediante Carbón Activo. Chauchina, Granada. Disponible en: https://www.gedar.com/PDF/Industrial/GEDAR-Carbon_Activo_Aguas_Residuales.pdf

⁹⁹ SOLÍS, Julio, et al. Obtención de carbón activado a partir de residuos agroindustriales y su evaluación en la remoción de color del jugo de caña. enero-junio, 2012.vol. 27, no. 1, p. 36.

¹⁰⁰ Empresa Andaluza. Opciones De Tratamiento De Aguas Residuales Mediante Carbón Activo. Chauchina, Granada. Disponible en: https://www.gedar.com/PDF/Industrial/GEDAR-Carbon_Activo_Aguas_Residuales.pdf

6. ANALISIS FINANCIERO DE LOS COSTOS DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES SELECCIONADO

En este capítulo se realizó el análisis financiero del plan de implementación del proceso de electrocoagulación en la empresa Doña Panela LTDA; donde se tuvo en cuenta la inversión inicial necesaria del proceso y el mantenimiento del mismo.

6.1 CÁLCULO DE INVERSION

Para el cálculo de inversión se tuvieron en cuenta los costos de los siguientes aspectos: mano de obra, equipos, materiales para el diseño del reactor, bombas, tuberías, entre otros.

6.1.1 Costos Directos. Los costos directos, son aquellos que se hacen al inicio de la puesta en marcha de un proyecto, son inversiones que se hacen, generalmente, una vez durante todo el proyecto. Para este caso tiene que ver directamente con la realización de la planta de tratamiento.

Basados en el método de estimación del cálculo de costos directos (equipos, instrumentación y tuberías) propuesto por S. Peters y D. Timmerhaus¹⁰¹ se calculan los costos para la implementación de la planta de tratamiento de agua residual, proveniente del proceso de elaboración de la panela en la empresa Doña Panela LTDA.

La tabla 30, muestra los valores en pesos colombianos (COP) de los costos directos del proceso de electrocoagulación.

¹⁰¹ PETERS S. Max; TIMMERHAUS D. Klaus. Plant design and economics for chemical engineers. Cuarta Ed. McGRAW HILL International Editions., p.157.

Tabla 30. Cálculo costos directos.

Material	Cantidad	Valor Unitario (COP)	Valor Total (COP)
Placa PMMA	5	\$ 2.700.000	\$ 13.500.000
Trampa de grasa	1	\$ 813.000	\$ 813.000
Filtro de Carbón Activado	1	\$ 1.063.900	\$ 1.063.900
Electrodo Aluminio	24	\$ 454.000	\$ 10.896.000
Electrodo Hierro	24	\$ 275.000	\$ 6.600.000
Fuente de poder	1	\$ 2.500.000	\$ 2.500.000
Bombas Centrifuga	2	\$ 449.000	\$ 898.000
Válvula de compuerta	4	\$ 650.000	\$ 2.600.000
Tubería	7	\$ 52.900	\$ 370.300
Total			\$ 39.241.200

Fuente: elaboración propia.

6.1.2 Costos indirectos. Son aquellos que tienen una relación indirecta con la implementación de la planta de tratamiento de agua residual. Según S. Peters y D. Timmerhaus¹⁰² resaltan la importancia de hacer la estimación del costo ingenieril (desarrollo, supervisión e inspección) y costo en construcción.

La tabla 31, muestra los porcentajes típicos de valores de inversión de capital fijo para segmentos de costos indirectos para plantas de tratamiento de agua residual¹⁰³ valores en pesos colombianos (COP) de los costos indirectos del proceso de implementación del sistema de tratamiento de electrocoagulación:

Tabla 31. Cálculo costos indirectos.

Costo Indirecto	Cantidad de empleados	Salarios (COP)	Tiempo de trabajo (meses)	Total (COP)
Ingeniería	1	\$ 1.880.000	3	\$ 5.640.000
Operario	2	\$ 925.148	3	\$ 5.550.888
			Total	\$ 11.190.888

Fuente: elaboración propia.

¹⁰² PETERS S. Max; TIMMERHAUS D. Klaus. Op., cit., p.160.

¹⁰³ *Ibid.*, p.167.

6.2 EGRESOS

los egresos son aquellos gastos que se deben realizar dentro del proyecto, con la finalidad de poder llevarlo a cabo. Es decir, dinero que sale de la compañía para implementar, en este caso en concreto, la planta de tratamiento de aguas residuales.

6.2.1 Depreciación. Es la disminución del valor de un bien o servicio. En este proyecto se evaluaron diferentes equipos, los cuales están sujetos a la depreciación; y son los siguientes:

- Reactores.
- Trampa de grasa
- Filtro de carbón activado.
- Bombas
- Fuente de poder.

El cálculo de la depreciación se realizó basado en el decreto 3019 de 1989¹⁰⁴. Para cada uno de los bienes mencionados se hace mediante la ecuación 19:

Ecuación 19. Cálculo depreciación.

$$\text{Depreciación anual} = \frac{\text{Valor del bien}}{\text{Vida útil del bien}}$$

Aplicando la ecuación 18, la tabla 32, muestra los valores de depreciación anual para cada uno de los bienes descritos anteriormente:

Tabla 32. Depreciación de equipos.

Equipo	Depreciación anual
Reactores	\$ 1.350.000
Trampa de grasa	\$ 162.600
Filtro Carbón activado	\$ 212.780
Bombas	\$ 179.600
Fuente de poder	\$ 225,176

Fuente: elaboración propia.

¹⁰⁴ SISTEMA UNICO DE INFORMACION NORMATIVA. Decreto 3019 de 1989: Por el cual se modifica el Decreto 1649 de 1976y se reglamenta parcialmente El Estatuto Tributario de los impuestos administrados por la Dirección General de Impuestos Nacionales. [en línea], [consultado el 02 de octubre de 2019], p 12. Disponible en internet: <http://www.suin-juriscal.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Decretos/1507895>.

6.2.2 Mano de obra. El proceso de electrocoagulación precisa un mantenimiento relativamente periódico, puesto que los electrodos usados dentro del reactor al estar en un medio acuoso, pueden evidenciar la presencia de una película inerte producto de los contaminantes retirados del agua residual industrial. Si no se retira esta película, se genera la pasivación en los electrodos y, su eficiencia y vida útil, se ven reducidos. Para el mantenimiento del proceso, es necesario la colaboración de dos operarios para que lleven a cabo esta tarea.

Tabla 33. Cálculo mano de obra.

Cargo	Cantidad	SMLMV(COP)	Total (COP)
Operario	1	925.148	925.148

Fuente: elaboración propia.

6.2.3 Calculo de energía requerida. Se realiza el cálculo del consumo energético, con la finalidad de determinar cuál es la cantidad de energía consumida por el sistema de electrocoagulación. Para calcular dicho consumo, se hace uso de la ecuación 20:

Ecuación 20. Cálculo de energía requerida.

$$E = \frac{V * I * t}{V_{efr}}$$

Donde:

E = Energía requerida por el sistema electrocoagulación (KWh/m³).

V = Voltaje de la celda.

I = Intensidad aplicada.

t = Tiempo de electrocoagulación.

V_{efr} = Volumen efectivo de la celda.

El sistema de electrocoagulación se ejecuta con un tiempo de retención de 30 minutos, el cálculo de energía requerida queda de la siguiente manera:

$$E = \frac{15 V * 1A * 30min}{7 m3}$$

$$E = 1125 \frac{kWh}{m3}$$

Partiendo de que el costo del kW en EBSA, empresa de energía de Boyacá es de \$521,1789 para uso industrial, se realizó el cálculo de costo energético de operación.

$$\text{Costo energetico} = 1125 \frac{kWh}{m^3} * 521 \frac{COP}{kWh}$$

$$\text{Costo energetico} = \$ 83,732 \frac{COP}{m^3}$$

$$\text{Costo energetico} = \$ 83,732 \frac{COP}{m^3} * 3 \frac{descargas}{día} * 26 \frac{día}{mes} * 12 \frac{mes}{año}$$

$$\text{Costo energetico} = \$ 72'413,076 \frac{COP}{m^3 \text{ año}}$$

El costo energético calculado hace referencia a que el suministro de energía es por parte de la compañía de electricidad EBSA, en caso de que el sistema de paneles presente alguna inconsistencia, es necesario tener un plan de contingencia para evitar suspensiones.

6.3 MULTAS.

la empresa Doña Panela LTDA, no cuenta con un sistema de tratamiento de agua residual industrial para el efluente proveniente del proceso de elaboración de la panela; esto puede generar problemas ambientales en el entorno donde se vierten dichos fluidos y, generando multas para la compañía, por un valor de \$100.632.582 (COP). Con la finalidad de que la empresa implemente en sus instalaciones un STAR, se puede tomar el valor de la multa como un ingreso, puesto que la implementación de este sistema representa un ahorro para la empresa.

La ilustración 15, muestra el flujo de caja libre del proyecto para tratar lo vertimientos de la empresa Doña Panela LTDA.

Ilustración 15. Flujo de caja libre.

Ingresos		\$ 100.632.582	\$ 100.632.582	\$ 100.632.582	\$ 100.632.582	\$ 100.632.582
	0					
Inversion	\$ 50.432.088					
Egresos						
Costos de mantenimiento	Costo Anual	\$ 22.203.552	\$ 22.203.552	\$ 22.203.552	\$ 22.203.552	\$ 22.203.552
Depreciacion	Depreciacion Anual	\$ 2.130.156	\$ 2.130.156	\$ 2.130.156	\$ 2.130.156	\$ 2.130.156
Energia	Costo Anual	\$ 60.413.076	\$ 60.413.076	\$ 60.413.076	\$ 60.413.076	\$ 60.413.076

Fuente: elaboración propia.

6.4 RELACIÓN BENEFICIO – COSTO (B/C)

La relación costo – beneficio, indica si un proyecto es rentable o no. Se determina a partir del resultado del cociente entre el valor de los ingresos totales y los costos totales. Para que un proyecto sea rentable, el cociente debe ser mayor a 1.

Partiendo de lo anterior, la relación costo – beneficio de la empresa Doña Panela LTDA, para la implementación de un STAR para el agua residual industrial proveniente del proceso de elaboración de la panela, se expresa mediante la ecuación 21.

Ecuación 21. Cálculo relación Beneficio - Costo.

$$R \frac{B}{C} = \frac{\sum V_{Ingresos}}{\sum V_{Egresos}}$$

Para este proyecto se obtuvo un total de ingresos de \$503'162.910 COP; en cuanto al total de ingresos totales, se obtuvo un total de \$483'733.920 COP.

$$R \frac{B}{C} = \frac{503'162.910}{483'733.920}$$

$$R \frac{B}{C} = 1.04$$

Con base en lo mencionado anteriormente, la relación Costo – Beneficio, el valor de 1,19 al ser mayor a 1, indica que el proyecto de la implementación de un STAR en la empresa Doña Panela LTDA, es viable económicamente para la reducción de parámetros del agua residual proveniente de la industria de Doña Panela LTDA.

Comparando los resultados obtenidos con respecto a la Resolución 0631 de 2015, artículo N°. 12, no se logra el cumplimiento de la normatividad legal vigente. Es necesario considerar la evaluación de otras alternativas de tratamiento de agua, que permitan alcanzar los valores límites en cuanto a vertimientos de los efluentes se refiere.

7. CONCLUSIONES

- Los sistemas de tratamiento coagulación – floculación y electrocoagulación, evaluados a escala laboratorio, registrando los siguientes resultados: pH (4,5), DQO (2633 mg/ L) y DBO₅ (1758 mg/L). Los valores obtenidos no cumplen con la normatividad legal vigente, según la Resolución 0631 de 2015, Artículo 12.
- De las alternativas propuestas para llevar a cabo el tratamiento del agua residual industrial del proceso de elaboración de la panela, mediante la matriz de criterios de priorización, se seleccionaron las dos mejores alternativas. Las cuales fueron: Coagulación / Floculación y Electrocoagulación, respectivamente.
- El desarrollo experimental del test de jarras, arrojó diferentes resultados, dando como mejor alternativa de coagulante, teniendo en cuenta el porcentaje de remoción de Turbidez evidenciado durante la práctica, el policloruro de aluminio (PAC), con una concentración de 10% y dosificación de 200 ppm, para un valor de remoción de DQO de 16,07% y Turbidez de 19,75%.
- Mediante el proceso de electrocoagulación, se determinó que la corrida que presentó mejores rendimientos de DQO y pH, fue la corrida con las siguientes características: Intensidad de corriente = 15 Voltios; tiempo de retención = 30 minutos. Además, con estas condiciones se prolonga la vida útil de los electrodos y se requiere de menor cantidad de energía para llevar a cabo la electrocoagulación.
- El método de electrocoagulación es una muy buena alternativa para la empresa Doña Panela LTDA, para tratar el agua residual industrial que proviene del proceso de elaboración de la panela, ya que es más económico que otros sistemas de tratamiento. Además, no requiere de una gran cantidad de espacio para implementar el sistema y funciona de manera eficiente.
- Mediante la realización del cálculo del Costo – Beneficio, que dio superior a uno, se determinó que la implementación del sistema de electrocoagulación es viable, puesto que los beneficios del sistema superan los costos totales de construcción. Además, sólo se requiere de dos empleados, que ya pertenezcan a la empresa, para que realicen las tareas de puesta en marcha del sistema y mantenimiento de los electrodos, ya que son las partes que requieren limpieza de manera periódica.

8. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar la evaluación de otros sistemas de tratamiento de agua residual, puesto que los tratamientos desarrollados a escala laboratorio, arrojaron resultados que no permiten el cumplimiento de la norma legal vigente.
- Se recomienda verificar el comportamiento, en cuanto a porcentajes de remoción de la DBO se refiere, en los sistemas de tratamiento de coagulación/floculación y electrocoagulación.
- Para tener un sistema completo, se sugiere el uso de un pretratamiento, como lo es una trampa de grasas y una etapa de filtración con carbón activado luego del proceso de electrocoagulación, con la finalidad de reducir aún más la carga contaminante presente en el efluente.
- Con el objetivo de un mayor rendimiento de los electrodos usados en la electrocoagulación, se recomienda manejar intensidades de voltaje superiores a 2,5 Voltios, de esta manera, se incrementaría la velocidad de reacción por parte de los electrodos hacia el medio acuoso.
- Se recomienda hacer uso de un sistema de paneles solares, los cuales brindarían la energía necesaria para el correcto funcionamiento del sistema y, disminuyendo los costos energéticos que presenta el tratamiento de electrocoagulación
- Para tener un mejor rendimiento del proceso de electrocoagulación, se sugiere utilizar sustancias que favorezcan la conductividad del agua residual industrial. De esta forma, se puede dar la generación de flocs de manera más rápida, disminuyendo el tiempo de retención del agua residual industrial en la fase de electrocoagulación.

REFERENCIAS

AGUDELO, Edison Alexander; BARRIOS ZIOLO, Leonardo Fabio; CARNODA GALLO, Santiago Alonso; GAVIRIA RESTREPO, Luisa Fernanda. Tecnologías para a remoción de colorantes y pigmentos presentes en aguas residuales. [en línea], junio de 2015. Medellín, Colombia. [consultado el 09 de septiembre de 2019]. Disponible en internet: <http://bdigital.unal.edu.co/59032/1/42924-250842-1-PB.pdf>.

ALFONSO CORREA, Laura Alejandra; VARGAS GUERRERO, Lizethe Tatiana. Desarrollo de una propuesta de tratamiento de aguas residuales proveniente del proceso de producción de pulpas de fruta de la empresa Alimentos S.A.S. Bogotá D. C.: Fundación Universidad de América, 2018., p. 157.

ARANGO RUIZ, Álvaro. La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales [en línea]. Revista Lasallista de Investigación, vol. 2, núm. 1, enero-junio, 2005, p 50. Corporación Universitaria Lasallista Antioquia, Colombia. [consultado 09 de septiembre de 2019]. Disponible en internet: <https://www.redalyc.org/pdf/695/69520109.pdf>.

ARRIOLS, Enrique. Qué son las aguas residuales y cómo se clasifican. Ecología verde [en línea], 6 de agosto de 2018 [consultado el 4 de marzo de 2019]. Disponible en internet: <https://www.ecologiaverde.com/que-son-las-aguas-residuales-y-como-se-clasifican-1436.html>.

BAILÓN DÍAZ, Pedro. Estudio y dimensionamiento de la instalación de recogida y tratamiento de aguas negras en un buque. PDF [en línea], [consultado 28 de marzo de 2019], p. 85. Disponible en internet: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/85541/112385_Estudio+y+dimensionamiento+de+la+instalaci%F3n+de+recogida+y+tratamiento+de+aguas+negras+en+un+buque.pdf;jsessionid=93A3EB2A26628ACB76FACB1C6AEB86C1?sequence=1.

BARONA, Alejandro. Proceso de elaboración de la panela. [en línea], 29 de enero de 2008, [consultado el 28 de marzo de 2019]. Disponible en internet: <http://gloriapatriciamera.blogspot.com/2008/01/proceso-de-elaboracion-de-panela.html>.

BAYRAMOGLU, Mahmut, *et al.* Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater. En: Separation and Purification Technology. 2004. Vol.37. p. 438.

CERON PEREZ, Vicky Alexandra. estudio para la determinación y dosificación óptima de coagulantes en el proceso de clarificación de aguas crudas en la potabilización de aguas de la empresa empoobando e.sp. San Juan de Pasto. Universidad de Nariño, 2016., p. 114.

COGOLLO FLORÉZ, Juan Miguel. Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio. PDF, [en línea], 05 de octubre de 2011, [consultado el 28 de marzo de 2019], p. 27. Disponible en internet: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25636/39133>.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 0631 (17, marzo, 2015). Por 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 y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C.: El ministerio, 2015. p. 62.

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Pretratamiento y tratamiento primario. México D. F., p. 74
CRISTANCHO BELLO, Angie Julieth; NOY ORTIZ, Andrés Mauricio. Diseño conceptual de una planta de tratamiento de aguas residuales para Pelikan Colombia SAS. Fundación Universidad de América, 2016., p 142.

FIBRAS Y NORMAS DE COLOMBIA S.A.S. Aguas residuales: clasificación y características. Fibras & Normas de Colombia S.A.S. [en línea], 30 de noviembre de 2018 [consultado 14 de marzo de 2019]. Disponible en internet: <https://www.fibrasynormasdecolombia.com/terminos-definiciones/aguas-residuales-clasificacion-y-caracteristicas>.

FIBRAS Y NORMAS DE COLOMBIA S.A.S. Coagulación y floculación: definición, tipos y factores. Fibras & Normas de Colombia S.A.S. [en línea], [consultado 14 de marzo de 2019]. Disponible en internet: https://www.fibrasynormasdecolombia.com/terminos-definiciones/coagulacion-floculacion-definicion/#Que_es_la_Floculacion.

FUNACH; ASCAPAM. Capacitación en obtención de nuevos productos derivados de la caña y el manejo adecuado de la agroindustria panelera, municipio de Mocoa. Ministerio de agricultura y desarrollo rural programa nacional de transferencia de tecnología agropecuaria Pronatta. PDF, [en línea]. 2002, [consultado el 28 de marzo de 2019], p. 17. Disponible en internet: http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/4775/1/2006102416333_Guia%20elaboracion%20de%20panela.pdf.

FUQUENE, Diana Marcela; YATE, Andrea Viviana. Ensayo de jarras para el control del proceso de coagulación en el tratamiento de aguas residuales industriales. [en línea]. [consultado el 19 de septiembre de 2019]. Disponible en internet: file:///C:/Users/Stevan/Downloads/2771-8143-1-SM.pdf.

GALEANO NIETO, Lady Johana; ROJAS IBARRA, Vivian Daniela. Propuesta de diseño de una planta de tratamiento de agua residual por zanjón de oxidación para el casco urbano del municipio de Vélez – Santander. Bogotá D. C.; Universidad Católica de Colombia. 2016., P. 112.

GARCÍA ASTILLERO, Adriana. Tipos de tratamiento de aguas residuales. Ecología verde. [en línea], 06 de agosto de 2018, [consultado el 28 de marzo de 2019]. Disponible en internet: <https://www.ecologiaverde.com/tipos-de-tratamiento-de-aguas-residuales-1448.html>.

GOMÉZ RODRÍGUEZ, Yuli Paola. Comparación de desempeño de dos configuraciones de lodos activados para la reducción de materia orgánica carbonácea y nitrógeno amoniacal total. Santiago de Cali. Universidad del Valle. 2014. P. 133.

GONZÁLEZ, Nicolás; HERNÁNDEZ, Malaquías; JÍMENEZ, Román; OJEDA, Nadia. La caña de azúcar como alimento funcional. PDF, [en línea], agosto de 2014, [consultado el 28 de marzo de 2019], p. 33. Disponible en internet: <http://www.reibci.org/publicados/2014/agosto/3300112.pdf>.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACION. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C :El instituto, 2018. ISBN 9789588585673., p153.

INTRODUCCION AL DISEÑO DE EXPERIMENTOS. [en línea]. [consultado el 25 de septiembre de 2019]., p. 19. Disponible en internet: <http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/jmmarin/esp/Disenno/IntroDE.pdf>.

KOPARAL, A. y ÖGUTVEREN, Bakir. Removal of nitrate from water by electroreduction and electrocoagulation. En: Journal of Hazardous Materials. vol. 89, no. 1, p. 520.

LEE, C. C. and LIN, Shun Dar. Handbook of environmental engineering calculations. McGraw Hill, 2007.

LÓPEZ BARROSO, María Fernanda; MENDOZA ARIAS, Laura Carlota. Desarrollo de una propuesta de mejora para la planta de tratamiento de aguas residuales para

la reducción de DQO y DBO en la fábrica de chocolates Triunfo S.A. Bogotá D. C.: Fundación Universidad de América, 2018., p. 184.

MARCÓ, Leandro, et al. La turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadas a partir de fuentes superficiales. Propuestas a propósito del estudio del sistema de potabilización y distribución en la ciudad de Concepción del Uruguay (Entre Ríos, Argentina). En: revista de higiene y sanidad ambiental. vol. 4, p. 72-82
MARIN, J.M. Introducción al diseño de experimentos. [en línea]. [consultado el 24 de septiembre de 2019]. Disponible en internet: <http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/jmmarin/esp/Disenno/IntroDE.pdf>.

MELO HERNANDEZ, Anyi Paola; SACRISTAN YEPES, Laura Juliana. Evaluación de la remoción de nitratos por electrocoagulación. Bogotá D. C.; Universidad de América. 2018., p 138.

MERCADO MARTINEZ, Iván Darío; REYES AVILA, Deisy. Estudio de tratabilidad por electrocoagulación de los lixiviados del relleno sanitario La Esmeralda. [en línea], 2003. Manizales, Colombia. [consultado el 09 de septiembre de 2019]. Disponible en internet: <http://bdigital.unal.edu.co/1069/1/deisyreyesavila.2003.pdf>.

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 631 de 2015.

NUEVO, David. Tratamientos secundarios de depuración de aguas residuales. Tecpa. [en línea], 09 de noviembre de 2018, [consultado el 28 de marzo de 2019]. Disponible en internet: <https://www.tecpa.es/edar-tratamiento-secundario-depuracion-aguas/>.

PEREZ PRADO, José Luís; RODRIGUEZ FLORES, Richard Edgar. Remoción de DQO y DBO del lactosuero ácido mediante en una celda de electrocoagulación. [en línea], 2018. Huancayo, Perú. [consultado el 23 de septiembre de 2019]. Disponible en internet: http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/5168/T010_20085567_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

PRIETO BERNAL, Winny Jimena; SOLER URIBE, Emily Andrea. Evaluación de una propuesta de un sistema de tratamiento para el agua residual industrial generada en una empresa de saborizantes. Bogotá D. C.: Fundación Universidad de América, 2018., p. 170.

RÁMIREZ CAMPEROS, Esperanza. Fundamentos teóricos de lodos activados y aireación extendida. PDF, [en línea], [consultado el 28 de marzo de 2019], p. 36. Disponible en internet:

<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018834/MEMORIAS2004/CapituloII/1Fundamentosdelprocesodelodosactivados.pdf>.

RAMOS VELANDIA, Cristian Camilo. Evaluación de un sistema de tratamiento de lodos activados para la remoción de carga orgánica en las aguas residuales domésticas generadas en el colegio San Viator. Bogotá D. C.: Fundación universidad de América, 2017., p. 130.

REDONDO, L. La utilidad de los métodos de decisión multicriterio en un entorno de competitividad creciente. Bogotá D.C. 2007., P 639.

REDONDO, L. los métodos de decisión multicriterio y su aplicación al análisis del desarrollo local. esic. 2011., P 465.

ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Acupurificación. Diseño de sistemas de purificación de agua. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 1995. p. 428.

ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Tratamiento De Aguas Residuales: Teoría y Principios De Diseño. 3 ed. Bogotá D.C.: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2008. p. 1248

RODRÍGUEZ, A., LETÓN, P., ROSAL, R., DORADO, M., VILLAR, S., y ZANZ, J. Informe de vigilancia tecnológica: tratamientos avanzados de agua residual, Madrid.2006.

RODRÍGUEZ RAMÍREZ, Carol Luciana and ZAPATA JÁUREGUI, Cristina. Influencia del pH, concentración de coagulante a base de aluminio y floculante en la remoción de sulfuros, sólidos suspendidos, demanda química y biológica de oxígeno de efluentes de rivera en curtiembres. Universidad Nacional de Trujillo, 2015. p. 46.

SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: filtros anaerobios de flujo ascendente. PDF, [en línea], [consultado el 28 de marzo de 2019], p. 70. Disponible en internet: <http://www.mapasconagua.net/libros/sgapds-1-15-libro29.pdf>.

TOVAR, Julia Amanda; RODRIGUEZ, Jayerth. Manual de laboratorio de química industrial inorgánica experimental. Bogotá D.C.: Fundación universidad de américa, 2012. p. 54-57.

ANEXOS

ANEXO A
RESULTADO DE LABORATORIO COMPARADOS CON EL DECRETO 1594
DE 1984

PARAMETROS	UNIDADES	METODO	RESULTADO	DECRETO 1594/84
DBO5	mgO ₂ /L	Winkler S.M. 21st Edition 5210 B	1614	N/A
DQO	mgO ₂ /L	Titimetrico S.M. 21st Edition 2540D	2503	N/A
Material flotante	N/A	Cualitativo no estandarizado	Presentes	N/A
Grasas y Aceites	mg/L	S.M. 21st Ed. 5520 B	18	N/A
pH	Unidades	Potenciometrico S.M. 21st Edition 4500H	7,1	5,0 -9,0
Solidos sedimentables	mL/L	S.M. 21st Edition 2540 F	0,3	N/A
Solidos suspendidos totales	mg/L	S.M. 21st Edition 2540 D	45	N/A
Temperatura	°C	S.M. 21st Ed. 2550 B	19,9	Max 40
Tensoactivos	mg/L	S.M. 21st Ed. 5540C	1,61	N/A

Fuente: Doña Panela LTDA

ANEXO B

RESULTADOS CARACTERIZACIÓN AGUA RESIDUAL DOÑA PANELA LTDA.



Código: F-ER-02
Versión: 2
Fecha: 26/01/2016

RESULTADOS DE ANÁLISIS AGUAS



INFORME DE RESULTADOS N°:				39598			
CLIENTE:	CORPORACION PANELERA DOÑA PANELA LTDA			CANTIDAD:	5600 mL	RESPONSABLE MUESTREO:	LABORATORIO BIOPOLAB
NIT:	800231596-0	COTIZACIÓN N°:	19R-288	FECHA DE MUESTREO:	2/08/2019	T (° C) MUESTREO:	25°C
TÉLFONO:	6749204	ODS:	19-2558	FECHA DE RECIBIDO:	2/08/2019	DESCRIPCIÓN:	ARnD
CONTACTO:	LILIANA SMITH ACUÑA			TIPO DE EMPAQUE:	P/V	TIPO DE MUESTREO:	Compuesto (8 Horas)
CARGO:	N.E.			PUNTO DE CAPTACIÓN/ Orden de servicio cliente:	Caja Inspección Externa Aguas Dulces		
DIRECCIÓN:	CR 7 180 75 MD 3 LC 1 Y 2 CODABAS			LUGAR DE RECOGIDA:	Corporación Doña Panela Planta de Producción Chitaraque Boyacá		
CIUDAD:	BOGOTA			COORDENADAS:	N: 1018838	w: 988811	
ID. MUESTRA:	19-6805			ALMAC. CONTRAMUESTRA:	Análisis FQ: 15 días	Análisis MB: 24 horas	

Fisicoquímica									
FECHA DE ANÁLISIS (dd/mm/yyyy)	PARÁMETRO	RESULTADO	LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN	UNIDADES	TÉCNICA ANALÍTICA	MÉTODO	Resolución 0631 de 2015. Art. 12 Elaboración de productos alimenticios.	CONFORMIDAD	
2/08/2019	pH (A)	3,9 - 5,5	NO APLICA	Unidad de pH	Electrometric Method.	SM 4500-H+ B.Ed 23	6,00-9,00	NO CUMPLE	
3/08/2019	DBOS (A)	1758	20,6	mg O2/L	5-Day BOD Test.	SM 5210 B, Ed 23 ASTM D888-18 Método C	400	NO CUMPLE	
8/08/2019	DQO (A)	2633	16,6	mg O2/L	Closed Reflux, Titrimetric Method	SM 5220 C.Ed 23	600	NO CUMPLE	
6/08/2019	Sólidos Suspendidos Totales (A)	46	11,6	mg/L	Secado a 104°C Gravimetrico	SM 2540 D.Ed 23	200	CUMPLE	
2/08/2019	Sólidos Sedimentables (A)	0,9	0,10	ml/L	Cono Imhoff	SM 2540 F.Ed 23	2,0	CUMPLE	
23/08/2019	Grasas y Aceites (A)	11,9	9,97	mg/L	Extracción líquido - líquido, partición gravimétrica.	S.M. 5520 B.Ed 23	20	CUMPLE	
15/08/2019	Compuestos Fenólicos Semivolátiles(*)	< 0,007	0,0070	mg/L	Cromatografía de Gases	EPA 3510 C-EPA 8041A	Análisis y Reporte	NO APLICA	
3/08/2019	Tensoactivos (A)	6,076	0,242	mg SAAM/L	Anionic Surfactants as MBAS.	SM 5540C.Ed 23	Análisis y Reporte	NO APLICA	
3/08/2019	Ortofosfato(Fosfatos) (A)	12,2	0,060	mg P-PO4/L	Stannous Chloride Methods	SM 4500-P D.Ed 23	Análisis y reporte.	NO APLICA	
23/08/2019	Fósforo Total(A)	4,55	0,060	mg P/L	Colorimetric Method-Stannous Chloride	SM 4500-P B, D Ed 23	Análisis y reporte.	NO APLICA	
3/08/2019	Nitratos (A)	165	0,31	mg NO3-/L	UV Spectrophotometric Screening Method.	SM 4500-NO3- B.Ed 23	Análisis y reporte.	NO APLICA	
3/08/2019	Nitritos (A)	0,114	0,014	mg NO2-/L	Colorimetric Method	SM 4500-NO2- B.Ed 23	Análisis y reporte.	NO APLICA	
12/08/2019	Nitrógeno Amoniacal (A)	<5,60	5,6	mg NH3-/L	Destillation-Titrimetric Method	SM 4500-NH3 B, C. Ed 23	Análisis y Reporte	NO APLICA	
13/08/2019	Nitrógeno Orgánico Total Kjeldahl(A)	<5	5	mg N/ L	Semi-Micro-Kjeldahl and Destillation-Titrimetric Method	SM 4500-NOrg C, SM 4500-NH3 B, C. Ed 23	Análisis y Reporte	NO APLICA	
30/08/2019	Nitrógeno Total	37,39	No Aplica	mg N/ L	Cálculo	Cálculo	Análisis y Reporte	NO APLICA	
22/08/2019	Cianuros Totales (*)	< 0,01	0,01	mg / L		SM 4500-CN B C E	Tratamiento preliminar - Destilación - Colorimetrico	0,50	CUMPLE
12/08/2019	Cloruros (A)	201	19,9	mgCl-/L	Argentometric Method.	SM 4500-Cl- B. Ed 23	250	CUMPLE	
6/08/2019	Sulfatos (A)	111	8,90	mg SO42 - /L	Turbidimetric Method	SM 4500 SO4 2- E.Ed 23	250	CUMPLE	
12/08/2019	Sulfuros (*)	< 1,0	1	mg / L	Yodométrico	SM 4500 S-2, F	No Especifica	NO APLICA	

RESULTADOS DE ANÁLISIS AGUAS

INFORME DE RESULTADOS N°: 39598								
6/08/2019	Cadmio (A)	<0,0090	0,009	mg Cd/L	Direct Air-Acetylene Flame Method	SM 3111 B.Ed 23	0,050	CUMPLE
6/08/2019	Cinc (A)	0,528	0,050	mg Zn /L	Direct Air-Acetylene Flame Method	SM 3111 B. Ed 23	3	CUMPLE
8/08/2019	Cobre (A)	<0,058	0,058	mg Cu/L	Direct Air-Acetylene Flame Method	SM 3111 B. Ed 23	1,00	CUMPLE
8/08/2019	Cromo (A)	0,054	0,045	mg Cr/L	SM 3111 B. Direct Air-Acetylene Flame Method	SM 3111 B,SM 3111 B.Ed 23	0,50	CUMPLE
20/08/2019	Mercurio (*)	< 0,001	0,001	mg Hg/L	Vapor frío	SM 3112B	0,010	CUMPLE
11/08/2019	Niquel (A)	0,078	0,051	mg Ni/L	Direct Air-Acetylene Flame Method	SM 3111 B.Ed 23	0,5	CUMPLE
12/08/2019	Plomo (A)	<0,068	0,068	mg Pb/L	Direct Air-Acetylene Flame Method	SM 3111 B. Ed 23	0,20	CUMPLE
2/08/2019	Acidez(A)	1100	9,10	mg /L	SM 2310 B	SM 2310 B	Análisis y Reporte.	NO APLICA
2/08/2019	Alcalinidad Total (A)	76,0	34,6	mg CaCO3 /L	Titration Method	SM 2320 B Ed 23	Análisis y Reporte.	NO APLICA
12/08/2019	Dureza Calcica (A)	75,9	8	mg CaCO3/L	EDTA titrimetric Method	SM 3500-Ca B. Ed 23	Análisis y Reporte	NO APLICA
12/08/2019	Dureza Total (A)	101	7,4	mg CaCO3 /L	EDTA Tritimetric Method.	SM 2340C.Ed 23	Análisis y Reporte.	NO APLICA
9/08/2019	Color 436 nm (A)	25,9	0,10	m-1	Spectrophotometer Method	ISO 7887 Método B	Análisis y Reporte	NO APLICA
9/08/2019	Color 525 nm(A)	10,7	0,10	m-1	Spectrophotometer Method	ISO 7887 Método B	Análisis y Reporte	NO APLICA
9/08/2019	Color 620 nm (A)	6,7	0,10	m-1	Spectrophotometer Method	ISO 7887 Método B	Análisis y Reporte	NO APLICA
2/08/2019	Temperatura (A)	25,6	0,10	°C	Laboratory and Field Methods.	SM 2550B.	40	CUMPLE
2/08/2019	Caudal (A)	0,41	0,01	L/s	Volumétrico	Volumétrico	No Especifica	NO APLICA

* Análisis subcontratados

Los valores de pH, Caudal, Temperatura, Oxígeno Disuelto y Sólidos Sedimentables fueron medidos in situ.

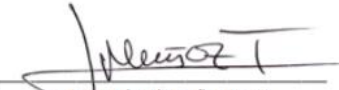
(A) Análisis acreditado por BIOPOLAB ante el IDEAM

Formato de fecha: dd/mm/yyyy

INFORME DE RESULTADOS N°: 39598

- Estos resultados son válidos únicamente para esta muestra recibida y analizada en el Laboratorio de Físicoquímica de Biopolab.
- Este informe de resultados no se puede reproducir y solo aplica para los resultados de la muestra analizada.
- Cualquier inquietud o reclamación puede ser presentada a nuestra compañía ya sea vía telefónico, o al correo e inmediatamente sera atendida
- La muestra será almacenada 15 días para eventuales repeticiones o inquietudes con los análisis y resultados.

Documento aprobado por:



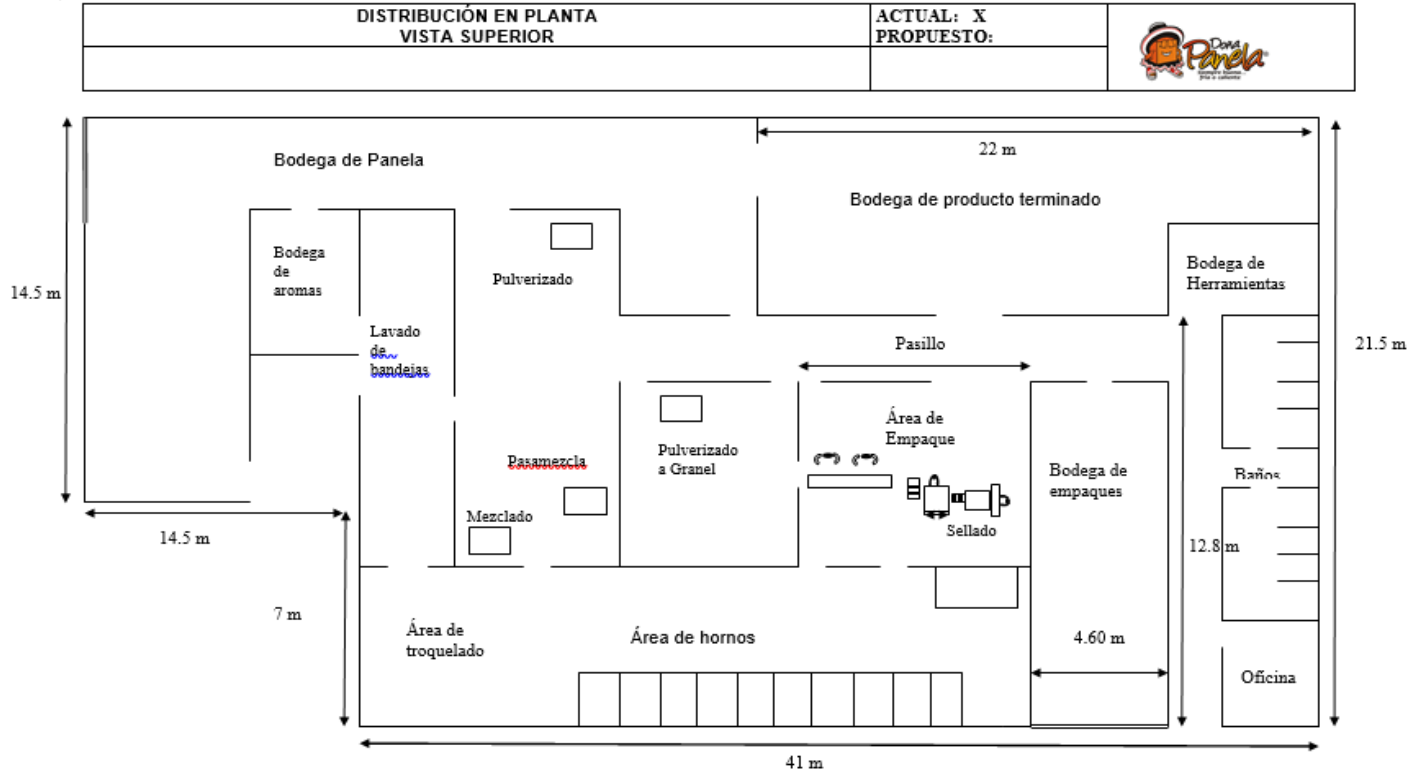
Javier Eduardo Muñoz Torres
Gerente Técnico
P. Químico de Alimentos. Matrícula Profesional PQA-495

Fecha de expedición:

5/09/2019

FIN DEL INFORME

ANEXO C PLANO DE PLANTA DE EMPAQUETAMIENTO



ANEXO D COTIZACION PANEL SOLAR

Bogotá, 24 DE SEPTIEMBRE DE 2019

Ref.: PANELES SOLARES



PRODUCTOS	PRECIO INCLUIDO IVA
2 PANEL SOLAR POLICRISTALINO 24V	\$1,125,882
MEDIDAS 1956X992X40MM	
PANELES EXCENTO DE IVA NO INCLUYE TRANSPORTE	

Estos costos están sujetos a inventarios y costo del dólar

Entrega Material 1 o 2 Días Hábiles
Cualquier inquietud no dude en comunicármela
estaré atenta a resolverla
Cordialmente,
CECILIA LUCENA
Cel.: 301 694 0329



ANEXO E

FICHA TECNICA PANEL SOLAR COTIZADO

Photovoltaic Modules

Modulo		GPP300-340W(72)					
Encapsulation		Glass/EVA/Cell/EVA/Backsheet					
Size and Number of cells		156*mm*156mm 72#*12pcs					
Maximum Power P _{max}	W	300	310	320	325	330	340
Maximum Power Voltage (V _{mp})	V	36.72	37.55	37.85	38.02	38.16	38.25
Maximum Power Current (I _{mp})	A	8.17	8.26	8.46	8.55	8.65	8.89
Open Circuit Voltage (V _{oc})	V	45.17	46.19	46.56	46.76	46.94	47.02
Short Circuit Current (I _{sc})	A	8.74	8.84	9.05	9.15	9.25	9.31
Cell Efficiency	%	17.12	17.69	18.26	18.55	18.83	19.40
Module Efficiency	%	15.48	15.99	16.49	16.72	17.01	17.52
Tolerance		0±3%					
Max System Open Circuit Voltage		1000V					
Max Series Fuse Rating		15A					
Junction Box (protection degree)		≥IP67					
Dimension		1956*962*40mm					
Weight		21kg					
Operate Temperature Scope		-40/+85°C					
Relative Humidity		0~100%					
Frame Thickness		40/45/50mm					
Frame Colour		Gold/Brown/Black/Silver					

Standard Test Conditions(STC): irradiance 1,000 W/m²; AM 1.5; module temperature 25°C. Measuring uncertainty of power is within ±3%. Tolerance of P_{mp}: 0→±3%. Certified in accordance with IEC61215, IEC61730-1/2.

Temperature Coefficients

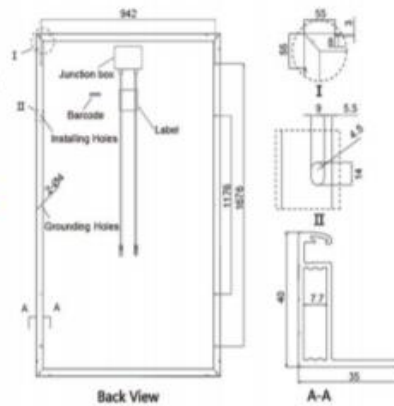
NOCT		45°C±2°C	
Short Circuit Current Temperature Coefficients	$\alpha(I_{sc})$	+0.045%/°C	
Open Circuit Voltage Temperature Coefficients	$\beta(V_{oc})$	-0.292%/°C	
Peak Power Temperature Coefficients	$\gamma(P_{max})$	-0.408%/°C	
Nominal Operating Cell Temperature(NOCT) : 45°C±2°C			
Output			
Cable 4.0mm ² (TUV)	Length 900/1200mm	Connector MC4 type	

Advantage

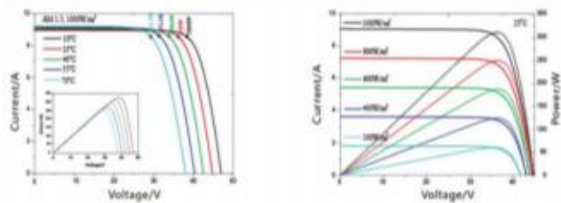
G&P series modules consist of **poly-crystalline** high efficient silicon cells, which are individually characterized and electronically matched before interconnection and laminated with toughened glass, EVA & Backsheet of high quality.

After assembled with anodized aluminum alloy frame, cable and junction box with MC4 connectors, G&P solar modules can be installed easily and work for a long period. At the same time, they can withstand the storm, strong wind and hail impact, etc.

Dimensions



I-V Curves



ANEXO F
CALCULO DE MATRICES DE SELECCION

Matriz de selección con respecto a Costos de implementación (C1)

Costos de implementación					
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Suma (α)	FP'
Alternativa 1	-	2	2	4	0,25
Alternativa 2	4	-	2	6	0,38
Alternativa 3	3	3	-	6	0,38
TOTAL				16	

Matriz de selección con respecto a Reducción de parámetros (C2)

Reducción de parámetros					
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Suma (α)	FP'
Alternativa 1	-	3	4	7	0,39
Alternativa 2	3	-	4	7	0,39
Alternativa 3	2	2	-	4	0,22
TOTAL				18	

Matriz de selección con respecto a Estabilidad del sistema de tratamiento (c3)

Estabilidad del sistema de tratamiento					
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Suma (α)	FP'
Alternativa 1	-	2	1	3	0,17
Alternativa 2	4	-	2	6	0,33
Alternativa 3	5	4	-	9	0,50
TOTAL				18	

Matriz de selección con respecto al Mantenimiento y control del STAR (C4)

Mantenimiento y Control operativo del STAR					
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Suma (α)	FP'
Alternativa 1	-	3	1	4	0,22
Alternativa 2	3	-	2	5	0,28
Alternativa 3	5	4	-	9	0,50
TOTAL				18	

ANEXO G
CALCULO DEPRECIACION DE EQUIPOS

- Depreciación reactores:

$$\text{Depreciación Anual} = \frac{\$ 27'000.000}{10 \text{ años}}$$

$$\text{Depreciación Anual} = \$ 5'400.000$$

- Depreciación fuente de poder:

$$\text{Depreciación Anual} = \frac{\$ 1'125.882}{5 \text{ años}}$$

$$\text{Depreciación Anual} = \$ 225.176,4$$

- Depreciación bombas:

$$\text{Depreciación Anual} = \frac{\$ 898.000}{5 \text{ años}}$$

$$\text{Depreciación Anual} = \$ 179.600$$

