

**EVALUACIÓN DE ALMIDÓN DE *MANIHOT ESCULENTA* (YUCA)
Y *MUSA AAB SIMMONDS*. (PLÁTANO) EN PROCESOS DE
COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES EN LA PTARD DEL PARQUE
AGROINDUSTRIAL DE OCCIDENTE – PAO**

**ANYELA PATRICIA MÁSMELA ROZO
NATHALY AGUILAR CRISTANCHO**

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD
Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente - ECAPMA
Bogotá D.C., Colombia
2017

**EVALUACIÓN DE ALMIDÓN DE *MANIHOT ESCULENTA* (YUCA)
Y *MUSA AAB SIMMONDS*. (PLÁTANO) EN PROCESOS DE
COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES EN LA PTARD DEL PARQUE
AGROINDUSTRIAL DE OCCIDENTE – PAO**

**ANYELA PATRICIA MÁSMELA ROZO
NATHALY AGUILAR CRISTANCHO**

Proyecto de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniería Ambiental

Director:

DIANA MARCELA FÚQUENE YATE

Línea de investigación:

Gestión y Manejo Ambiental

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente - ECAPMA

Bogotá D.C., Colombia

2017

“Logra la paz aquel cuyo corazón es como el océano, en cuyo lecho desaguan todos los ríos sin desbordarlo”. - Baghavad Gita-

Agradecimientos

Agradezco a mi familia por creer en mis capacidades, a mi compañera de proyecto por el sacrificio realizado, a la docente Diana Fúquene por la paciencia, dedicación y apoyo durante el desarrollo del proyecto.

Agradezco a la empresa *Baying S.A.S.* y al Parque agroindustrial de occidente PAO, por permitirnos el acceso a la planta de tratamiento de agua residual, especialmente al colaborador de la planta y gran amigo Jorge Bernal quien nos acompañó en el trabajo de campo y oficina con su experiencia y conocimiento de manera constante.

A Juancho por su incondicionalidad y solidaridad infinitas gracias, - Siempre serás mi compañero de lucha -.

Nathaly Aguilar C

Estas palabras de gratitud llevan consigo varios nombres impresos, todos ellos fundamentales para la culminación de esta quimera; quiero iniciar por agradecer a mi mamá por su fe infinita y su apoyo ilimitado, a mi preciada familia por su compañía incondicional, a mi amiga y eterna compañera académica Natha por su excesiva paciencia, a mis amigos por su respaldo y palabras alentadoras, a la profesora Diana Marcela por su oportuna guía y permanente liderazgo, a Jorge por su sincera colaboración y todos sus valiosos aportes; finalmente a todos esos compañeros laborales por estar tan pendientes de mi avance académico.

Anyela P. Másmela R.

Resumen

El presente proyecto de investigación tuvo como objetivo principal evaluar la eficiencia de dos coagulantes de origen natural en el tratamiento de las aguas residuales domésticas provenientes del Parque Agroindustrial de Occidente (PAO), localizado sobre la vía Siberia que conduce desde la ciudad de Bogotá al municipio de Cota (Autopista Medellín Km 1,5).

El diseño experimental incluyó la extracción de los coagulantes naturales: *Manihot esculenta* (yuca) y *Musa AAB Simmonds*. (plátano), la medición de los parámetros fisicoquímicos (pH, color, turbiedad y SST) de las aguas residuales domésticas antes y después del tratamiento de coagulación realizado en la PTARD PAO y la realización de las pruebas de tratabilidad a nivel de laboratorio por medio de test de jarras, con el fin de determinar la dosificación óptima de los coagulantes de interés; lo anterior permitió medir de forma cuantitativa los niveles de remoción presentados por los coagulantes naturales con respecto al coagulante químico usado en la PTARD PAO (hidroxicloruro de aluminio).

La dosis óptima del almidón de yuca fue de 20 ml a una concentración de 252 ppm, presentando una eficiencia máxima de 38,1%; la dosis óptima del almidón de plátano fue de 18,5 ml a una concentración de 252 ppm, presentando una eficiencia máxima de 60,6%; respecto a la eficiencia máxima presentada por el hidroxicloruro de aluminio se determinó que los almidones de yuca y plátano están por debajo de este (49,9 y 27,4 puntos porcentuales, respectivamente).

Palabras claves: *Coagulación, Almidón, Test de jarras, Aguas residuales, Coagulantes alternativos, Coagulantes naturales, Dosificación.*

Abstract

The main objective of this research project was to evaluate the efficiency of two natural coagulants for the treatment of domestic wastewater from the Parque Agroindustrial de Occidente (PAO), located on the Siberia road that leads from the city of Bogotá to the municipality of Cota (Medellín Avenue Km 1,5).

The experimental design included the extraction of natural coagulants: *Manihot esculenta* (Cassava) and *Musa AAB Simmonds* (Green plantain), the measurement of the physicochemical parameters (pH, color, turbidity and TSS) of domestic wastewater before and after of coagulation treatment made in PAO's wastewater treatment plant and do treatability tests at the laboratory level by means of Jar Test, in order to determine the optimum dosage of the natural coagulants; through this tests it was found the removal levels presented by the natural coagulants respect to the chemical coagulant used in the PAO's wastewater treatment plant (aluminum hydroxychloride).

The optimum dosage of cassava starch was 20 ml with concentration of 252 ppm, showing a maximum efficiency of 38.1%; The optimum dosage of Green plantain starch was 18.5 ml with concentration of 252 ppm, showing a maximum efficiency of 60.6%. Respect to the maximum efficiency presented by aluminum hydroxychloride, it was determined that the cassava and Green plantain starches are below this (49.9 and 27.4 percentage points, respectively).

Keywords: *Coagulation, Starch, Jar Test, Wastewater, Alternative Coagulants, Natural Coagulants, Dosage.*

Contenido

1	Marco Referencial	3
1.1	Antecedentes de la Investigación	3
1.2	Marco Teórico.....	8
1.2.1	Características de las aguas residuales domésticas.....	8
1.2.2	Parámetros de calidad de las aguas residuales.....	11
1.2.3	Suspensiones coloidales	14
1.2.4	Sistemas de Tratamiento de Aguas	16
1.3	Marco Conceptual.....	25
1.4	Marco Contextual.....	27
1.4.1	Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales - PAO.....	29
2	Planteamiento del Problema.....	41
2.1	Objetivos.....	44
2.1.1	Objetivo General.....	44
2.1.2	Objetivos Específicos.....	44
3	Metodología.....	45
3.1	Etapa 1. Consolidación de la Información Marco Referencial	45
3.2	Etapa 2. Actividades de Campo.....	46
3.2.1	Línea Base	46
3.3	Etapa 3. Actividades de Laboratorio	51
3.3.1	Actividad 1. Extracción y Preparación del Almidón de Yuca (Manihot esculenta) y Plátano (Musa AAB Simmonds.)	52
3.3.2	Actividad 2. Preparación del coagulante alternativo hidroxiclورو de aluminio.....	61
3.3.3	Actividad 3. Test de Jarras	61
3.4	Etapa 4. Análisis y Procesamiento de la Información.....	65
3.4.1	Análisis estadístico	65
3.5	Etapa 5. Entrega de Resultados	66

4	Resultados y Discusión.....	67
4.1	Almidón de Yuca (Manihot esculenta)	67
4.2	Almidón de Plátano (Musa AAB Simmonds.).....	74
4.3	Hidroxiclورو de aluminio	80
5	Conclusiones y Recomendaciones	87
5.1	Conclusiones.....	87
5.2	Recomendaciones.....	89
6	Bibliografía.....	115

Lista de figuras

Figura 1. a. Helmholtz b. Gouy-Chapman c. Stern.....	15
Figura 2. Doble capa de una partícula coloidal.	16
Figura 3. Diagrama de bloques de una PTAR	18
Figura 4. Diagrama general del tratamiento fisicoquímico	20
Figura 5. Modelo Test de Jarras	25
Figura 6. Localización general del Parque Agroindustrial de Occidente – PAO y su PTARD.	27

Lista de tablas

Tabla 1. Investigaciones que han evaluado la eficiencia de coagulantes de origen natural.	3
Tabla 2. Investigaciones en Colombia que han evaluado la eficiencia de coagulantes de origen natural.	6
Tabla 3. Principales características físicas de las aguas residuales domésticas.	9
Tabla 4. Principales características químicas de las aguas domésticas.	9
Tabla 5. Principales características biológicas de las aguas domésticas.	11
Tabla 6. Tipos de coagulantes.	21
Tabla 7. Tipos de coadyuvantes.	24
Tabla 8. Tipos de actividades desarrolladas en PAO de acuerdo al concepto de uso del suelo.	28
Tabla 9. Descripción de elementos que conforman PAO.	28
Tabla 10. Características de los productos químicos utilizados en la operación de la PTARD.	39
Tabla 11. Metodología de Análisis Parámetros In-situ.	47
Tabla 12. Metodología de Análisis Parámetros Ex-situ.	47
Tabla 13. Equipos de medición - Laboratorio PTARD.	48
Tabla 14. Lista de materiales y reactivos procedimiento experimental.	51
Tabla 15. Índice de floculación de Willcomb.	62
Tabla 16. Eficiencias coagulantes evaluados.	85

Lista de fotografías

Fotografía 1. Tanque de Igualación.....	30
Fotografía 2. Tamiz rotatorio fino.....	31
Fotografía 3. Trampa de grasas, tanque de flotación donde la grasa sale a la superficie y es retenida mientras el agua sale aclarada.	32
Fotografía 4. Zanjón de oxidación.	34
Fotografía 5. Sedimentador secundario.....	35
Fotografía 6. Clariflocurador.....	37
Fotografía 7. Sistema de filtración en arena y carbón activado.....	38
Fotografía 8. Sistema de deshidratación de lodos (lechos de secado).	39
Fotografía 9. Productos químicos usados en la operación de la PTARD.....	40
Fotografía 11. pH metro.....	48
Fotografía 12. Multiparámetro colorímetro.....	49
Fotografía 13. Canaleta Parshall.....	50
Fotografía 13. Selección de raíces.....	53
Fotografía 14. Lavado y pelado de raíces.....	53
Fotografía 15. Rallado o desintegración.....	54
Fotografía 16. Colado y extracción.....	54
Fotografía 17. Sedimentación y deshidratación.....	54
Fotografía 18. Secado almidón.....	54
Fotografía 19. Acondicionamiento almidón de yuca.....	54
Fotografía 20. Selección del plátano.....	55
Fotografía 21. Lavado del plátano.....	55
Fotografía 22. Pelado del plátano.....	55
Fotografía 23. Rebanado del plátano.....	55
Fotografía 24. Secado de rebanadas de plátano.....	55
Fotografía 25. Molido y tamizado almidón de plátano.....	55
Fotografía 26. Determinación de la densidad de los almidones.....	56
Fotografía 27. Medición pH.....	63
Fotografía 28. Muestras de agua en equipo de jarras.....	63
Fotografía 29. Formación de flóculos durante test de jarras.....	63
Fotografía 30. Sedimentación de flóculos formados.....	64
Fotografía 31. Medición de parámetros después de test de jarras.....	65

Lista de gráficas

Gráfica 1. Test 1 – Almidón de yuca	68
Gráfica 2. Test 2 – Almidón de yuca	69
Gráfica 3. Test 3 – Almidón de yuca	71
Gráfica 4. Test 4 – Almidón de yuca	72
Gráfica 5. Test 5 – Almidón de yuca	73
Gráfica 6. Test 1 – Almidón de plátano	75
Gráfica 7. Test 2 – Almidón de plátano	76
Gráfica 8. Test 3 – Almidón de plátano	77
Gráfica 9. Test 4 – Almidón de plátano	79
Gráfica 10. Test 5 – Almidón de plátano	80
Gráfica 11. Test 1 – Hidroxicloruro de aluminio.....	81
Gráfica 12. Test 2 – Hidroxicloruro de aluminio.....	82
Gráfica 13. Test 3 – Hidroxicloruro de aluminio.....	83
Gráfica 14. Test 4 – Hidroxicloruro de aluminio.....	84

Introducción

El agua es un elemento esencial para todos los aspectos de la vida, se sabe que aproximadamente el 97,5% de toda el agua que existe en el planeta se encuentra en los océanos y que del 2,5% (agua dulce) restante, solo el 1% esta accesible para su uso, un volumen limitado teniendo en cuenta el crecimiento continuo de la población, la industrialización y el aumento de producción de alimentos, lo que ha llevado a que desde comienzos del siglo XXI el mundo se enfrente a una crisis de agua (UNEP, 2010). El uso del recurso hídrico como parte fundamental de las actividades antropogénicas debe garantizar que el agua se devuelva al medio con condiciones óptimas, evitando que se convierta en un peligro para la salud humana y que por supuesto no se afecte su ciclo natural y regenerativo.

El manejo y tratamiento de aguas residuales son temas que han ido avanzando a la par de la historia del hombre y su paso por cada una de las sociedades que ha formado; desde el antiguo mesopotámico (3500 a 2500 a.C.) donde ya se usaban sistemas de drenaje para transportar desechos, pasando por los romanos (800 a.C. a 450 d.C.) quienes entendían la necesidad de mantener las aguas residuales aparte del agua potable o por la época de la revolución industrial (1750-1950) donde ya se asociaban las tasas de mortalidad (cólera y tifus) con el agua y las enfermedades que podía transmitir y que con el pasar de los años daría lugar al tratamiento de las aguas a través de la tierra (trincheras o pozos), luego a tratamientos químicos, filtros biológicos; hasta llegar a la época en que se enfoca la atención del tratamiento de las aguas residuales como protección y mejora del ambiente (1965-actualidad) donde las técnicas y operaciones se han sofisticado para remover DBO, SST, nutrientes (N y P) que eviten la eutrofización; también se abordan los temas de tratamiento y disposición de lodos, se aplican modelos desarrollados por computadoras y el uso de membranas para la eliminación de bacterias (osmosis inversa, microfiltración y ultrafiltración) (Cooper, 2001).

Dentro de los tratamientos químicos que actualmente se aplican a las aguas residuales se encuentran las técnicas de coagulación y floculación, consistentes en la adición de productos sintéticos (coagulantes) que buscan desestabilizar los coloides presentes en el agua, para así removerlos y de esta forma reducir o eliminar la turbiedad y color; no obstante el uso de estas sustancias en el tratamiento de las aguas residuales traen consigo algunas desventajas ambientales y económicas; por lo tanto muchas investigaciones se están enfocando en la búsqueda de alternativas de origen natural (almidones, polisacáridos naturales como alginatos, derivados de celulosa, entre otros) que reemplacen u optimicen la aplicación de los coagulantes químicos.

En la presente investigación se busca evaluar una alternativa que permita optimizar el manejo ambiental de los lodos generados en el tratamiento de agua residual doméstica, específicamente en la etapa de coagulación y floculación, para lo cual se implementó el uso de coagulantes naturales, en este caso almidón *Manihot Esculenta* (Yuca) y *Musa AAB Simmonds*. (Plátano). Como indicadores en la remoción se tendrá en cuenta color, turbiedad y SST, al final de la investigación se logrará determinar sus eficiencias así como un comparativo frente al compuesto alternativo usado actualmente en la PTARD.

1 Marco Referencial

1.1 Antecedentes de la Investigación

La coagulación y floculación son procesos fundamentales en el tratamiento de las aguas residuales; en la actualidad se usan principalmente agentes coagulantes de origen sintético; no obstante, estas técnicas se han usado desde la antigüedad, donde se empleaban diferentes sustancias para clarificar el agua, principalmente semillas trituradas; se sabe por ejemplo que los egipcios en el 2000 a.C. usaban almendras para aclarar el agua del río (Bratby, 2006), de igual forma en lugares como India, África y China por más de 2000 años utilizaron coagulantes naturales fabricados a partir de semillas, hojas y raíces de plantas. Los coagulantes naturales tienen un futuro promisorio debido a su abundancia, bajo precio y naturaleza biodegradable (Asrafuzzaman, Fakhruddin and Hossain, 2011); razón por la cual existen numerosas investigaciones alrededor del tema.

Investigaciones realizadas en diferentes regiones del mundo han presentado resultados positivos en la clarificación de aguas, mediante el uso de coagulantes naturales provenientes de diferentes fuentes vegetales, la Tabla 1 resume algunos de ellos:

Tabla 1. Investigaciones que han evaluado la eficiencia de coagulantes de origen natural.

Región - Ciudad (País)	Fuente Natural Coagulante	Resultado	Autor (Año)
Daca (Bangladesh)	<i>Cicer arietinum</i> (garbanzo)	Reducción final de turbidez de 95,89%	(Asrafuzzaman, Fakhruddin and Hossain, 2011)
Maracaibo (Venezuela)	<i>Cactus latifaria</i> y semillas de <i>Prosopis juliflora</i>	Agua final con turbidez aceptable (5 NTU)	(Díaz et al., 1999)
Estados Unidos	<i>Opuntia spp.</i> (tuna)	Reducción de turbidez con una eficiencia de 92 al 99%	(Miller et al., 2008)
Badajoz (España)	(<i>Acaciamearnsii</i> de Wild y <i>Schinopsisbalansae</i>)	Reducción de hasta un 80% el color del agua	(Beltrán-Heredia, Sánchez-Martín and Gómez-Muñoz, 2010)

Región - Ciudad (País)	Fuente Natural Coagulante	Resultado	Autor (Año)
Badajoz (España)	<i>Acacia mearnsii</i> (Acacia Australiana)	Reducción de hasta un 75% el color del agua	(Beltrán-Heredia, Sánchez-Martín and Dávila-Acedo, 2011)
México	Mezclas con potencial coagulante compuestas por almidón de yuca (<i>Manihot esculenta Crantz</i>) y sulfato de aluminio	Remociones entre el 97,9 y 98,7%	(Solís, R., Laines, J.R. and Hernández, J.R., 2012)
Quito (Ecuador)	<i>Tropaeolum Tuberosum</i> (almidón de Mashua)	El coagulante natural es eficiente como ayudante de floculación, pues se logra obtener una turbiedad de 1,2 NTU	(Báez, 2010)

Fuente: Compilado por autores, 2016

A partir de una revisión realizada a 21 coagulantes naturales vegetales, Choy et. al (2014) concluyeron que estos coagulantes que se encuentran disponibles en abundancia pueden ser considerados para afrontar los inconvenientes asociados¹ al uso de coagulantes químicos en la clarificación de aguas, la mayoría de los coagulantes vegetales incorporados en esta revisión se componen de residuos de frutas (semillas y cortezas): (1) *Carica papaya*, (2) *Citrus sinensis*, (3) *Feronia limonia*, (4) *Mangifera indica*, (5) *Persea americana*, (6) *PHoenix dactylifera*, (7) *Prunus americana*, (8) *Tamarindus indica*, (9) *Citrus sinensis* e (10) *Hylocereus undatus* y otras categorías como cactus: (11) *Cereus repandus*, *Stenocereus griseus* y (12) *Opuntia ficus indica*, cereales: (13) *Oryza sativa* y (14) *Zea mays*, hongos: (15) *Pleurotus tuber-regium*, nueces: (16) *JatropHa curcas*, (17) *Strychnos potatorum*, arbustos: (18) *Cassia alata*, (19) *Maerua subcordata*, (20) *Prosopis juliflora* y especias: (21) *Trigonella foenum-graecum*.

Los diferentes estudios que se han realizado enfocados en la efectividad de los coagulantes naturales en la clarificación de aguas también han incluido a las hortalizas y legumbres, entre las cuales se cuentan: *Coccinia indica*, *Hibiscus esculentus*, *Luffa*

¹ Efectos perjudiciales en la salud humana, debido a los residuales que quedan en el agua tratada, generación de lodos voluminosos de óxido hidratado no biodegradable, costos asociados a la operación de la planta, así como el tratamiento y manejo de lodos.

cylindrica, *Arachis hypogaea*, *Cicer arietinum*, *Dolichos biflorus*, *Glycine max*, *Guar gum*, *Lablab purpureus*, *PHaseolus angularis*, *PHaseolus mungo*, *PHaseolus vulgaris*, *Pisum Sativum* y *Vigna unguiculata*, algunos de los cuales han mostrado resultados notables y podrían adoptarse como coagulantes primarios o coadyuvantes (Choy et al., 2015).

Las operaciones de coagulación y floculación involucran el uso de coagulantes auxiliares (coadyuvantes) que buscan optimar la eficiencia del proceso, para lo cual son ampliamente usados los polielectrolitos sintéticos; de allí que también las investigaciones estén enfocadas en buscar sustitutos de origen natural; una recopilación hecha por Oladoja (2016) presenta algunos avances que se han hecho en este campo, a partir de la información proporcionada por diferentes investigadores sobre las evaluaciones de estos coagulantes “verdes” donde se incluyen sustancias como pectinas, taninos, minerales de arcilla, conchas de gasterópodos, almidones (de yuca, arroz, trigo, maíz y papa), *Psyllium Husk* (Pantago Ovata), plátano, especies de *Opuntia*, semillas de *Ipomoea*, *Pistacia atlántica* (Baneh) y extracto de hoja de *Hibiscus rosa-sinensis* (rosa de china); en este estudio se precisan entre otras cosas las principales ventajas y desventajas de estos materiales, entre las que se destacan la biodegradabilidad, no toxicidad, la disponibilidad inmediata a partir de materiales naturales renovables y bajo costo.

En el contexto nacional se han realizado diversos estudios de este tipo, donde se han evaluado coagulantes naturales, de origen vegetal como el almidón de plátano, almidón de tuna, almidón de yuca y maíz; los resultados de todos coinciden en la funcionalidad que presenta el uso de estos coagulantes naturales en el tratamiento de aguas (Tabla 2).

Tabla 2. Investigaciones en Colombia que han evaluado la eficiencia de coagulantes de origen natural.

Ciudad/Municipio (Departamento)	Fuente Natural Coagulante	Coagulante Comparativo	Tipo de Agua	Resultados Principales	Autor (Año)
Gambote (Bolívar)	Polvo de la semilla <i>Cassia fistula</i>	-	Agua cruda del Canal del Dique	Dosis óptima de 20 mg/L para alcanzar 25 UPC Color y 6 UTN Turbidez	Guzmán, L., Taron, A. y Núñez, A. (2015).
Bucaramanga (Santander)	Sábila <i>Aloe vera</i> (Coadyuvante)	Sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$	Arroyo Palmichala	Nivel medio de turbidez (45,5 NTU): Dosis óptima 56 mg/L Alumbre + 5 mg/L <i>Aloe vera</i> Alto nivel de turbidez (101 NTU): Dosis óptima 24 mg/L Alumbre + 14 mg/L <i>Aloe Vera</i> Disminución 20% dosis óptima alumbre y hasta 96 NTU	Kopytko M, Rueda E, y Rincón Y. (2014)
Manizales (Caldas)	Plátano verde	Sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$	Agua cruda sector Cerro del Oro antes de entrada a PTAP Niza	Dosis óptima 50:50 P/P Sulfato de aluminio/almidón de plátano	Trujillo, D et al. (2014)
Arjona (Bolívar)	Tuna <i>Opuntia ficus-indica</i>	-	Agua cruda Canal del Dique	Remoción 50% Color y 70% Turbidez	Villabona, A.; Paz, I & Martínez, J., (2013)
Villa de Leyva (Boyacá)	Cáscara de papa (Planta procesadora de papas Producritos "La Libertad")	Sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$	Agua potable Planta La Diana (río Cane y quebrada Colorada)	2,5 g de cáscara de papa <2 UNT Turbiedad <10 UPC Color	Alvarado, L. (2013)

Ciudad/Municipio (Departamento)	Fuente Natural Coagulante	Coagulante Comparativo	Tipo de Agua	Resultados Principales	Autor (Año)
Bogotá D.C. (Distrito Capital)	Hojas de fique <i>Furcraea sp.</i> (Coadyuvante)	Cloruro férrico hexahidrato $FeCl_3$ (Coagulante)	Lixiviados relleno sanitario Doña Juana	3000 mg/L de coagulante y 40 mg/L coadyuvante Mejoras 15% Turbiedad y 9% DQO	Lozano W. (2012)
Ibagué (Tolima)	<ul style="list-style-type: none"> • Moringa (<i>Moringa oleífera</i>) • Samán (<i>Pithecellobium saman</i>) • Tuna (<i>Opuntia ficus</i>) • Antorcha peruana (<i>Trichocereus peruvianus</i>) 	Sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$	Agua cruda del río Combeima	<ul style="list-style-type: none"> • Dosis óptima 30 mg/L • 36 mg/L • 40 mg/L • 45 mg/L • >10 UTN Turbidez 	Ospina, O. y Ramírez, H. (2011)
Bogotá D.C. (Distrito Capital)	Almidón de yuca Almidón de maíz	Sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$ Tipo B Polielectrolito	Agua cruda Quebrada Las Delicias	<ul style="list-style-type: none"> • Dosis óptima almidón de yuca: 50 mg/L: Turbiedad 30 UNT y Color 60 UPC • Dosis óptima almidón de maíz: 20 mg/L: Turbiedad 1 UNT y Color 25 UPC 	Rodríguez M., J.P; Lugo U., I.P; Rojas C., A.V. & Malaver C., C. (2007)

1.2 Marco Teórico

El compuesto químico de mayor abundancia sobre la superficie terrestre es el agua, sin embargo su composición puede variar de acuerdo al origen y cauce, lo que significa que su estado puro no es común en la naturaleza, la causa de este fenómeno radica básicamente en las descargas que los cuerpos hídricos reciben a través del recorrido en la cuenca hidrográfica donde se ubican, se pueden identificar diversas fuentes de vertimiento entre las que destacan las de origen industrial, agroindustrial y doméstico. Las sustancias que alteran la forma molecular pura del agua pueden estar en suspensión o en solución según el tamaño de disgregación del material que acarrea (Arboleda Valencia, 2000)

Los compuestos o sustancias contaminantes en las aguas residuales están determinados por la actividad o uso a la que fue sometida, a pesar de considerar las tres fuentes de contaminación mencionadas anteriormente, cada una de ellas podría variar en consecuencia al clima, características demográficas, economía, tipo de industria, hábitos de la población, entre otros.

1.2.1 Características de las aguas residuales domésticas

Como se mencionó anteriormente, las características de las aguas residuales obedecen a diversos factores, entre estos principalmente; el consumo medio de agua por persona día, lo cual determina la cantidad y concentración, la dieta de la población que caracteriza su composición química (Rivas Mijares, 1978).

Para definir la calidad del agua se debe tener en cuenta los siguientes parámetros:

- *Físicos*: Se refieren a las variaciones de las características físicas del agua, en su mayoría de valoración cualitativa, por ejemplo, color, turbidez, olor, aspecto, sabor, entre otros).
- *Químicos*: Corresponde a sustancias ajenas a la composición pura de la molécula del agua, pueden ser de tipo orgánico o inorgánico, de acuerdo a su toxicidad podrán requerir tratamientos específicos.
- *Biológicos*: Se deben a la presencia de microorganismos patógenos.

A continuación, se describen las principales características físicas de las aguas residuales de origen doméstico (Tabla 3):

Tabla 3. Principales características físicas de las aguas residuales domésticas.

Parámetro	Descripción
Temperatura	<ul style="list-style-type: none"> • Ligeramente superior a la del agua de abastecimiento • Variación conforme a la época del año • Influencia en la actividad microbiana • Influencia en la solubilidad de los gases • Influencia en la velocidad de reacciones químicas • Influencia en la viscosidad del líquido
Turbidez	<ul style="list-style-type: none"> • Muy superior a la del agua de abastecimiento • Variación conforme a la época del año • Influencia en la solubilidad de los gases • Influencia en la velocidad de reacciones químicas

Fuente: Sperling, 2005 modificado por el autor

Adicional a la temperatura, el color y la turbiedad son parámetros físicos fundamentales en la determinación de la calidad de las aguas residuales; por ejemplo, cuando se habla de color aparente, se asocia a sustancias en suspensión, y si se trata de color verdadero se asocia a sustancias en solución; a su vez la turbiedad representa la reducción de la transparencia del agua (interferencia del paso de luz) ocasionada por presencia de material particulado en suspensión. Estos parámetros se consideran base teórica fundamental del presente proyecto, por lo tanto, estos se abordan con mayor detalle en el numeral 1.2.2.

Tabla 4. Principales características químicas de las aguas domésticas.

Parámetro	Descripción
Sólidos totales	Orgánicos e inorgánicos; suspendidos y disueltos; sedimentables
<ul style="list-style-type: none"> • En suspensión 	Fracción de los sólidos orgánicos e inorgánicos que son retenidos en filtros de papel con aberturas de dimensiones estandarizadas (0,45 a 2 μm)

Parámetro	Descripción
• Fijos	Componentes minerales, no incinerables, inertes, de los sólidos en suspensión
• Volátiles	Componentes orgánicos de los sólidos en suspensión
• Disueltos	Fracción de los sólidos orgánicos e inorgánicos que no son retenidos en los filtros de papel anteriormente descritos. En el ensayo de laboratorio, incluyen también a los sólidos coloidales
• Fijos	Componentes minerales de los sólidos disueltos
• Volátiles	Componentes orgánicos de los sólidos disueltos
• Sedimentables	Fracción de sólidos orgánicos e inorgánicos que sedimenta en una hora en el cono Imhoff. Indicación aproximada de la sedimentación en un tanque de decantación.
Materia orgánica	Mezcla heterogénea de diversos compuestos orgánicos. Principales componentes: proteínas, carbohidratos y lípidos.
Determinación indirecta	
DBO ₅	Demanda Bioquímica de Oxígeno. Medida a 5 días, 20°C. Está asociada a la fracción biodegradable de los componentes orgánicos carbonáceos, Es una medida del Oxígeno consumido después de 5 días por microorganismos en la oxidación bioquímica de la materia orgánica.
DQO	Demanda Química de oxígeno. Representa la cantidad de oxígeno requerida para estabilizar químicamente la materia orgánica carbonácea. Utiliza fuertes agentes oxidantes (dicromato de potasio) en condiciones ácidas.
DBO última	Demanda última de oxígeno. Representa el consumo total de oxígeno, al final de varios días, requerido por los microorganismos para la oxidación bioquímica de la materia orgánica.
Determinación directa	
Carbono Orgánico Total - COT	Es una medida directa de la materia orgánica carbonácea. Se determina a través de la conversión del carbono orgánico a gas carbónico.
Nitrógeno Total	El Nitrógeno total incluye el Nitrógeno orgánico, amoníaco, nitrito y nitrato. Es un nutriente indispensable para el desarrollo de los microorganismos en el tratamiento biológico. El Nitrógeno orgánico y el amoníaco comprenden el denominado Nitrógeno total
Fósforo	El Fósforo total existe en forma orgánica (Combinado con la materia orgánica) e inorgánica (ortofosfato y polifosfato). Es un nutriente indispensable en el tratamiento Biológico.
Cloruros	Provenientes del agua de abastecimiento y de los desechos humanos
Aceites Y Grasas	Fracción de la materia orgánica soluble en hexanas. En aguas residuales domésticas las fuentes son aceites y grasas utilizadas en las comidas.

Fuente: Sperling, 2005

Tabla 5. Principales características biológicas de las aguas domésticas.

Parámetro	Descripción
Bacterias	<ul style="list-style-type: none">• Organismos unicelulares• Diversas formas y tamaños• Responsables de la conversión de la materia orgánica• Algunas patógenas, causantes de enfermedades intestinales
Algas	<ul style="list-style-type: none">• Organismos autotróficos, fotosintetizantes, contenido de clorofila• Importantes en la producción de Oxígeno en algunos cuerpos de agua y en algunos procesos de tratamiento de aguas residuales• En lagos y represas, pueden proliferar el exceso, causando deterioro de la calidad del agua
Hongos	<ul style="list-style-type: none">• Organismos predominantemente aerobios, uni o multicelulares, no fotosintéticos, heterotróficos• También de importancia en la descomposición de materia orgánica• Pueden crecer en condiciones de bajo pH
Protozoarios	<ul style="list-style-type: none">• Organismos unicelulares sin pared celular• La mayoría son aerobios o facultativos• Se alimentan de bacterias, algas y otros microorganismos• Son esenciales en el tratamiento biológico para el mantenimiento de un equilibrio entre diversos grupos• Algunos son patógenos
Virus	<ul style="list-style-type: none">• Organismos parásitos, formados por la asociación de material genérico (<i>DNA</i> o <i>RNA</i>) y una cubierta proteica• Causan enfermedades y pueden ser de difícil remoción en el tratamiento de agua o de las aguas residuales

Fuente: Sperling, 2005

1.2.2 Parámetros de calidad de las aguas residuales

Los parámetros de calidad del agua que se abordarán a continuación determinarán el diseño experimental y la metodología para el desarrollo del presente proyecto, por tanto, son de gran importancia, de determinación rutinaria y medición práctica en el laboratorio de la PTARD de PAO.

pH: se define como el potencial de hidrogeno, lo cual refiere a la concentración del ion hidrógeno en el agua, este parámetro es de gran importancia ya que el intervalo de concentración adecuado permitirá la proliferación y desarrollo de la mayor parte de vida biológica (Metcalf & Eddy, INC., 1995), en cuanto al agua residual, la concentración

inadecuada del ion H^+ representa interferencia en los procesos de tratamiento como (coagulación, desinfección, control de corrosividad, remoción de dureza y biológicos), adicionalmente se puede generar alteraciones en el cuerpo de agua receptor afectando las diversas formas de vida acuática, para contrarrestar este efecto se deben realizar procesos de corrección antes y después de la adición de productos químicos en el tratamiento (Sperling, 2005).

La concentración del ion H^+ se expresa como pH, que a su vez se define como el logaritmo decimal cambiado de signo

$$pH = -\log_{10}[H^+]$$

El pH en muestras de agua puede medirse fácilmente con un instrumento de medición llamado pH-metro, el cual debe ser calibrado o verificado con las soluciones indicadas (Buffer) antes de iniciar con el proceso de medición, de no contarse con este sistema se puede emplear soluciones o papeles de indicación de pH, los cuales cambian de color de acuerdo al valor de pH, debido a que son materiales de referencia debe adquirirse preferiblemente aquellos que posean certificación.

Color: este parámetro es el responsable de agregar color al agua residual, su origen radica en dos fuentes; origen natural por descomposición de la materia orgánica (vegetales – ácidos húmicos y fúlvicos), hierro y manganeso, origen antrópico por residuos industriales y aguas residuales domésticas (Sperling, 2005). El agua residual puede tener variaciones de color de acuerdo al tiempo que transcurre entre su origen, transporte, almacenamiento, disposición y vertimiento.

Inicialmente el agua residual puede presentar una coloración grisácea, una vez inicia su recorrido a través de las redes de alcantarillado y donde se puede presentar un ambiente cercano al anaerobio, se generan variaciones en el color cambiando gradualmente de color gris a gris oscuro, si la fuente generadora cuenta con un sistema de tratamiento de agua residual se deberá almacenar temporalmente el caudal que ingresa a la planta, donde puede cambiar el color en escala de grises hasta alcanzar el color negro, en este punto se clasifica el agua residual como séptica (Metcalf & Eddy, INC., 1995).

El color que se determina en una muestra de agua puede ser de dos tipos: color aparente cuando la muestra presenta material en suspensión y color verdadero medido luego de sedimentar este material en suspensión, quedando solo con suspensiones de tipo coloidal.

La remoción de color en el agua se suele hacer por razones estéticas, químico-sanitarias, a continuación, se describen dichas razones:

- Estética, porque la apariencia del agua es más favorable si se acerca al agua cristalina
- Químico-sanitarias, debido a que interfiere el proceso de coagulación (Arboleda Valencia and Rendón Soto, 2000)

El color puede medirse cuantitativamente a través de un colorímetro, el cual debe haberse verificado antes de iniciar con el proceso de medición.

Turbiedad: es la dificultad del agua para transmitir la luz debido a materiales insolubles en suspensión, coloidales o muy finos, que se presentan principalmente en aguas superficiales (Rigola Lapeña, 1999). Su medición indica la efectividad en el proceso de coagulación, debido a que se considera una medida indirecta de la concentración de coloides, lo cual significa que si las partículas coloidales se transforman en materia particulada la turbidez puede disminuir, el fenómeno se entiende ya que las partículas sedimentan con mayor facilidad disminuyendo a su vez la dispersión de la luz.

Como la turbiedad es la que produce la diseminación de la luz, debe considerarse a aquella como la interacción de un conjunto de ondas actuando sobre un conjunto de átomos y partículas, sin relación con la concentración de la suspensión.

Sólo cuando la luz pasa por un líquido ideal homogéneo, no se produce diseminación ninguna del rayo luminoso y por tanto la turbiedad es cero (Arboleda Valencia, 2000).

En cuanto al sistema de medida se debe mencionar que existe en el mercado diversos tipos de turbidímetros de lectura digital, los cuales entregan un resultado cuantitativo en diversas unidades. Para las mediciones de turbidez se ha utilizado un turbidímetro DR 900 HACH, donde las lecturas son en términos de formazina (FAU), esta prueba es apta para

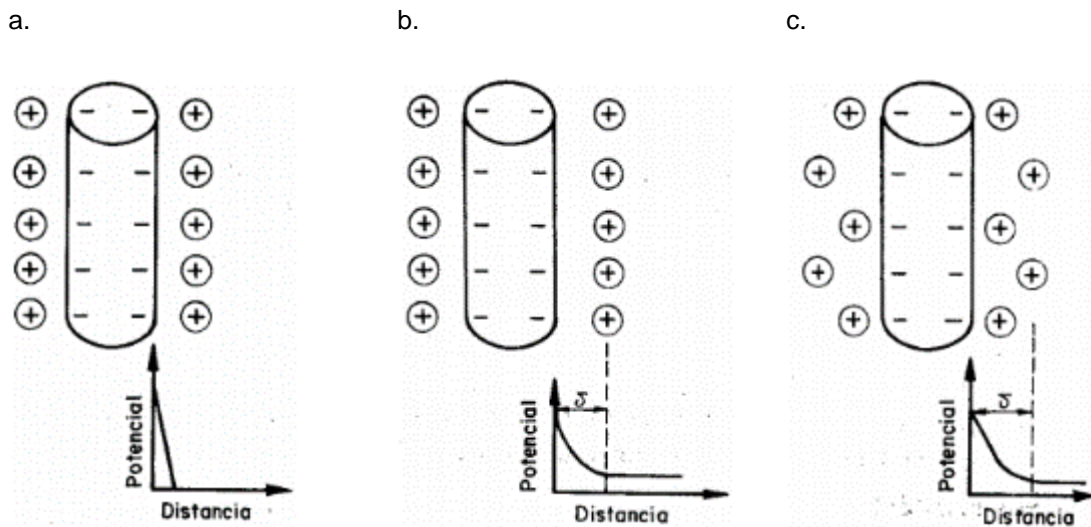
el monitoreo diario en una planta. Una FAU es equivalente a una Unidad Nefelométrica de Turbidez (NTU) de Formazina, aunque el método óptico de medición es muy diferente, (1NTU= 1FTU = 1 FAU) (Hach.com, 2016).

1.2.3 Suspensiones coloidales

Las impurezas presentes en el agua que confieren la turbiedad y el color están constituidas por partículas de pequeña dimensión que forman una estructura coloidal en suspensión estable; los coloides pueden ser de tres tipos: liofílicos (en sistemas acuosos hidrofílicos), liofóbicos (en sistemas acuosos hidrofóbicos) o de asociación; los primeros poseen una gran interacción con el agua, como lo son las proteínas o polímeros sintéticos; los segundos tienen una menor interacción con el agua y presentan estabilidad gracias a sus cargas eléctricas bien sea positiva o negativa que por repulsión impiden la agregación entre ellas, por ejemplo las arcillas o partículas orgánicas; por último los coloides de asociación son agregados especiales de iones y moléculas conocidas como micelas, donde se tiene ambas terminaciones, hidrofílica e hidrofóbica (Manahan, 2007).

Según Hernández Muñoz (2001) la carga coloidal es el resultado de una acción en tres fases; en la primera el coloide adsorbe iones (OH^- , Cl^- , etc., para el caso de partículas negativas); seguidamente algunos iones de signo contrario (H^+ , iones metálicos, etc., para partículas negativas) son retenidos en la proximidad del coloide cargado, atraído energicamente por su carga central, formando una especie de película líquida, rígida, con límite definido; y finalmente, el resto de iones de signo contrario al del núcleo se dispersan en la solución, con una concentración mayor en la proximidad de la partícula.

Las fuerzas electroestáticas existentes en las partículas son consideradas físicamente como una doble capa eléctrica que interacciona con la fase acuosa; este concepto es explicado a través de tres (3) teorías representadas en la Figura 1.



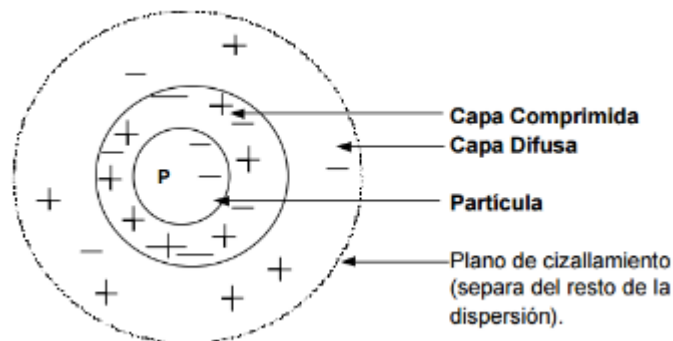
Fuente: Arboleda Valencia and Rendón Soto, 2000
Figura 1. a. Helmholtz b. Gouy-Chapman c. Stern.

- a. Helmotz (1879) La superficie del coloide es concurrida por todos los iones positivos (contraiones) del medio dispersante necesarios para neutralizar su carga (Potencial q).
- b. Gouy (1910) y Chapman (1913) Asegura que la agitación térmica del líquido tiende a separar los contraiones de la superficie del coloide y a formar una capa difusa alrededor de ella, en la que el potencial cae lentamente prolongándose hasta una distancia δ dentro del líquido que la rodea.
- c. Stern (1924) Considera la formación de una capa adherida y una capa difusa alrededor del coloide, en la que el potencial q cae velozmente en la capa adherida y lentamente en la capa difusa.

Consolidando lo anterior un coloide tiene tres potenciales importantes a saber: 1. Potencial q que existe en la superficie. 2. Potencial j que existe en la superficie interior de la doble capa, donde inicia la fase difusa. 3. Potencial Z que existe en el plano de cizalla, fundamental en la coagulación, tema fundamental de la presente investigación.

En otras palabras, los iones que se adhieren enérgicamente a la partícula y se desplazan con ella, forman la capa comprimida, a su vez que los iones que se adhieren débilmente forman la capa difusa, por lo tanto, hay un potencial electrostático entre la superficie de la

partícula y la solución, conocido como Potencial Z, como se muestra en la Figura 2 (Andía Cárdenas, 2000).



Fuente: Andía Cárdenas, 2000

Figura 2. Doble capa de una partícula coloidal.

1.2.4 Sistemas de Tratamiento de Aguas

Consiste en el conjunto de procesos y operaciones unitarias de tipo físico, químico y microbiológico que tiene como objetivo reducir o eliminar la carga contaminante que tiene el agua; en la naturaleza los cursos de agua tienen sus propios medios de autodepuración; sin embargo, la constante presión antropogénica que sufre el recurso hídrico hace necesario el empleo de sistemas de tratamiento de las aguas residuales para mantener el ciclo natural y posibilitar la recuperación de la capacidad auto depuradora de los cuerpos de agua. El tratamiento de las aguas residuales se realiza en una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR), también conocida como Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) (Wastewater Treatment Plant - WWTP), la cual está constituida por un conjunto de infraestructuras, mecanismos e instalaciones, que realizan el tratamiento de las aguas residuales (Trapote Jaume, 2013), dependiendo del origen y destino del agua se deben realizar diferentes tipos de tratamiento.

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales pueden clasificarse de acuerdo al tipo de tratamiento que realiza o de acuerdo al grado de rendimiento que tenga; para el primer caso se tienen los siguientes tipos:

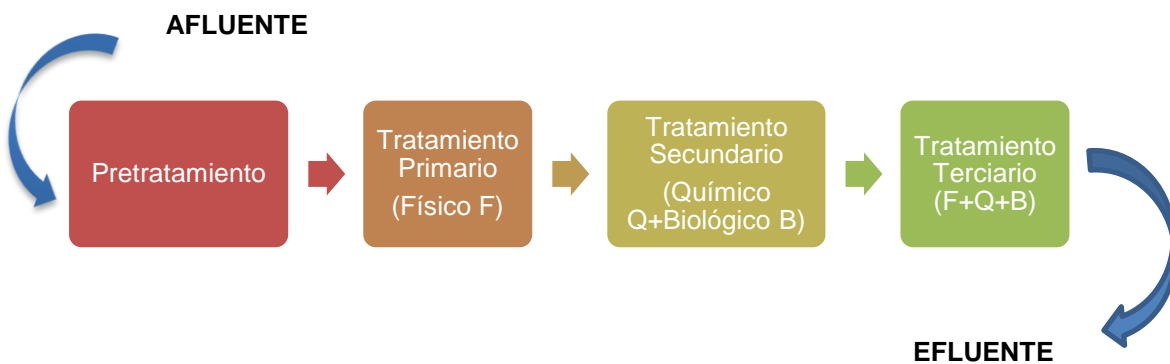
- *Operaciones físicas unitarias:* Métodos de tratamiento físico que típicamente incluyen desbaste, desarenado, desengrasado, sedimentación, flotación, adsorción.
- *Procesos químicos unitarios:* La remoción o disminución de contaminantes se realizan a través de la adición de productos químicos o por medio de reacciones químicas, donde se cuentan: floculación y coagulación, neutralización, oxidación, reducción, intercambio iónico, precipitación química, adsorción, desinfección, etc.
- *Procesos biológicos unitarios:* Involucran la actividad biológica para eliminar sustancias orgánicas biodegradables presentes en el agua residual, así como para eliminar nutrientes (N y P), los más populares son lodos activados, lechos bacterianos (filtros percoladores o biológicos), biodiscos, lagunas aireadas, tanques de estabilización, entre otros.

Por su parte la clasificación de acuerdo al grado de depuración es la siguiente:

- **Pretratamiento:** También conocido como tratamiento preliminar, busca eliminar las partículas presentes en el agua residual de gran tamaño (gravas, arenas), así como las grasas y aceites, que pueden causar inconvenientes en las demás operaciones.
- **Tratamiento primario:** Tiene como objetivo separar del agua residual una parte de los sólidos en suspensión, sedimentables por gravedad y los elementos solubles y coloidales (coagulación-floculación y decantación); los rendimientos en la reducción de sólidos en suspensión oscilan entre el 50 y 70% aproximadamente, a su vez que la reducción de la DBO₅ llega apenas al 25 – 40%.
- **Tratamiento Secundario:** También conocido como biológico busca eliminar la mayor parte de la materia orgánica coloidal, a través de procesos unitarios como: lodos activados, filtros percoladores, biodiscos (filtros rotativos o contactores biológicos rotativos: CBR), tanques de estabilización, lagunas aireadas, lechos de turba, entre otros; los rendimientos oscilan entre 80 y 95% en la reducción de sólidos en suspensión y 85 y 95% en la reducción de DBO₅.
- **Tratamiento Terciario:** Tiene como objetivo mejorar los rendimientos de eliminación de la DBO₅ y sólidos suspendidos (SS), así como la eliminación de nutrientes, metales y en general adaptar finalmente la calidad del efluente de acuerdo al destino (reutilización o vertimiento), los procesos más utilizados son:

filtración, nitrificación/desnitrificación, adsorción sobre carbón activado, intercambio iónico, ósmosis inversa, desinfección; finalmente con este tratamiento se alcanzan rendimientos del 95-96% en la eliminación de SS y del 95-98% en la DBO₅.

La Figura 3 representa el diagrama de los sistemas que hacen parte de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de acuerdo a lo descrito.



Fuente: Trapote, 2013

Figura 3. Diagrama de bloques de una PTAR

1.2.4.1 Coagulación y Floculación

Como se mencionó en el numeral 1.2.3 las partículas coloidales evitan agregarse debido a la repulsión electrostática de la doble capa eléctrica, de allí que el objetivo principal de la coagulación sea desestabilizar estas partículas que se encuentran en suspensión, para que posteriormente a través de la floculación estas partículas desestabilizadas se unan para formar grandes partículas estables o aglomerados.

La coagulación se obtiene añadiendo a la dispersión de iones de signo contrario al del coloide, para que se manifieste la acción es necesario que el ion coagulante sea adsorbido por el coloide, hasta anular su potencial Z; por su parte los flóculos se separan del agua mediante decantación; existen tres fenómenos que se dan en la coagulación: lo primero es la neutralización de las cargas negativas de las impurezas con el ión coagulante; lo segundo es la reacción del coagulante y la formación de flóculos de óxido hidratado coloidal con carga positiva, los cuales atraen las impurezas coloidales de carga negativa;

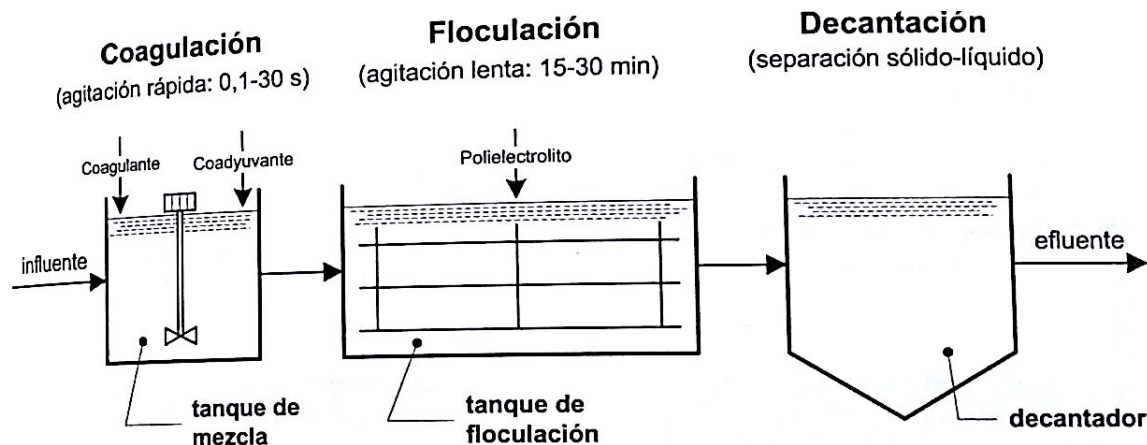
lo tercero y último es la adsorción superficial de impurezas por los flóculos (Hernández Muñoz, 2001).

Existen algunos factores condicionantes de la coagulación-floculación, Trapone Jaime (2013) cita los siguientes:

- *Tipo y cantidad de coagulante:* la dosis apropiada se determina a través de ensayos de laboratorio (test de jarras).
- *pH:* Es un factor crítico de la coagulación, para cada coagulante y dosis existe un intervalo de pH óptimo de funcionamiento.
- *Velocidad de agitación de la mezcla:* Una coagulación óptima implica que la neutralización se complete antes de la formación de los flóculos, por lo tanto, el reactivo debe difundirse rápidamente, pues el tiempo de floculación es muy corto (entre 0,1 y 30 s).
- *Periodo de coagulación:* Tiempo transcurrido entre la adición del coagulante al agua y el final de agitación, a una velocidad que impida la sedimentación de las materias floculadas en el tanque de floculación, antes de la entrada de la mezcla al decantador.
- *Temperatura del agua:* Puede tener un efecto sobre el tiempo requerido para conseguir una buena formación de flóculos.

En síntesis, el tratamiento fisicoquímico de aguas residuales se compone fundamentalmente de tres (3) fases secuenciales como lo explica Trapone Jaime (2013). Ver Figura 4.

- 1. Fase de coagulación:** adición de los coagulantes y coadyuvantes al agua residual para generar la desestabilización de los coloides (agitación rápida).
- 2. Fase de floculación:** formación de agregados de partículas coaguladas (flocúlos o flocs) de tamaño sedimentable (agitación lenta).
- 3. Fase de decantación:** separación sólido-líquido para la eliminación de los flocs formados en la fase 2.



Fuente: Trapone Jaume, 2013.

Figura 4. Diagrama general del tratamiento fisicoquímico

1.2.4.1.1 Coagulantes

Los coagulantes son compuestos de origen orgánico o sintético que al adicionar al agua proporcionan cargas de signo contrario para neutralizar las cargas eléctricas de las partículas coloidales presentes, con lo que dejan de actuar las fuerzas de repulsión, su potencial Z se anula y los coloides se agregan. Según Hernández Muñoz (2001) los coagulantes deben contar con las siguientes características:

- Tener carga opuesta al coloide con el fin de poder neutralizar las fuerzas electrostáticas (punto isoelectrico o potencial Z nulo); cuando esto no se logra es necesario adicionar otros compuestos denominados coadyuvantes.
- Tener carga de valencia alta para garantizar que la ruptura de la estabilidad coloidal sea rápida.
- Ser pesados, para que los flóculos formados puedan separarse lo más rápidamente posible, por precipitación.

Los coagulantes de importancia en el tratamiento de agua pueden clasificarse como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Tipos de coagulantes.

Coagulantes Inorgánicos		<ul style="list-style-type: none"> • Sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$ • Sulfato ferroso ($FeSO_4$) • Sulfato férrico ($Fe_2(SO_4)_3$) • Cloruro férrico ($FeCl_3$) • Aluminato sódico ($NaAlO_2$) • Sulfato cúprico ($CuSO_4$) • Cloruro de aluminio ($AlCl_3$)
Coagulantes Orgánicos (Polieléctrolitos)	Naturales	Son obtenidos a partir de productos naturales como alginatos (extractos de algas), almidones (extractos de granos vegetales) y derivados de la celulosa.
	Sintéticos*	<ul style="list-style-type: none"> • Polielectrolitos no iónicos <ul style="list-style-type: none"> ○ Óxido de polietileno ○ Poliacrilamida • Polielectrolitos aniónicos <ul style="list-style-type: none"> ○ Ácido poliacrílico ○ Poliacrilamida hidrolizada ○ Poliestireno sulfonado • Polielectrolitos catiónicos <ul style="list-style-type: none"> ○ Polidialildimetilamonio

*Son usados como ayudantes de floculación. Ver numeral 1.2.4.1.2.

Fuente: Hernández Muñoz, 2001.

Los coagulantes convencionales que se han usado con más frecuencia en el tratamiento de las aguas son los compuestos inorgánicos de aluminio o hierro; no obstante, en los últimos años se ha desarrollado una nueva generación de coagulantes inorgánicos prepolimerizados (coagulantes alternativos), entre ellos, policloruros de aluminio (PAC's), clorhidrato de aluminio (ACH) y polisulfatos de aluminios (PAS), los cuales han mostrado mejor desempeño que los coagulantes convencionales (Cogollo Flórez, 2011); dentro del grupo de los PAC's se encuentra el hidroxiclورو de aluminio $[Al_2(OH)_5Cl_2 \cdot 5H_2O]$, coagulante usado en la operación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Parque Agroindustrial de Occidente (PAO), respecto al cual se realiza la evaluación y comparación de la capacidad coagulante de los almidones investigados en el presente proyecto.

Coagulantes Naturales: Son producidos de manera espontánea, debido a reacciones bioquímicas que ocurren en animales y en plantas; se caracterizan por no presentar toxicidad y actúan de modo similar a los coagulantes sintéticos, facilitando la aglomeración

de las partículas en suspensión que están presentes en el agua; estos coagulantes alternativos pueden llegar a tener rendimientos superiores a los de origen sintético, además debido a su origen natural poseen características de biodegradabilidad que los convierten en una buena alternativa desde el punto de vista ambiental y económico para el tratamiento de aguas; algunos de los coagulantes de origen natural son almidones y polisacáridos naturales (Nieto y Orellana, 2011 citado por Ramírez Arcila y Jaramillo Peralta, 2015).

- **Almidones:** Es una macromolécula que se encuentra en abundancia en el reino vegetal, constituye la mayor reserva de carbohidratos de las plantas, puede ser extraído de su fuente con relativa facilidad; puede decirse que el almidón es un carbohidrato fuertemente polimerizado cuyo monómero está representado por la glucosa; el almidón está constituido por dos componentes principales: amilosa y amilopectina (Campos and Di Bernardo, s.f.); se encuentra en las semillas de cereales (maíz, trigo, arroz, sorgo), en tubérculos (papa), en raíces (yuca, batata, arrurruz), en semillas de leguminosas (frijoles, lentejas, guisantes), frutas (bananas y manzanas y tomates verdes), troncos (palma sago) y hojas (tabaco).
 - *Almidón de yuca:* Es la segunda fuente de almidón en el mundo después del maíz, pero por delante de la papa y el trigo; se usa principalmente sin modificar, es decir como almidón nativo, pero también es usado modificado con diferentes tratamientos para mejorar sus propiedades de consistencia, viscosidad, estabilidad a cambios del pH y temperatura, gelificación, dispersión y de esta manera poder usarlo en diferentes aplicaciones industriales que requieren ciertas propiedades particulares.

La extracción del almidón de yuca es un proceso simple y sencillo, existen procesos artesanales y mecanizados para hacerlo y básicamente comprende las actividades de: selección de raíces, lavado y pelado de las raíces, rallado o desintegración, colado o extracción, sedimentación o deshidratación, secado y acondicionamiento (Aristizábal, Sánchez and Mejía-Lorío, 2007); el contenido de almidón presente en la harina extraída

de yuca puede variar dependiendo del proceso, para el desarrollo presente proyecto se tomó en cuenta el valor teórico de 63% precisado por Buitrago A. (1990).

- *Almidón de plátano*: Los frutos verdes de plátano son ricos en almidón, pueden llegar a tener entre 70% y 80% en base seca, e incluso la cáscara puede llegar a contener hasta un 50% de almidón en base seca. Al igual que el almidón de yuca, la extracción del almidón de plátano consiste en un proceso sencillo que se puede realizar de forma artesanal o a nivel industrial, puede realizarse a través de métodos secos o húmedos; para el desarrollo del presente proyecto se aplicó el método seco, donde se realizan las siguientes actividades: selección y pesaje de los frutos, lavado, pelado, rebanado, secado y molido (Mazzeo M., M., Alzate G. y Marín M., M., 2008); el contenido de almidón presente en la harina de plátano extraída se toma de forma teórica, 68% según lo mencionado por Soto A., V. (2010).

1.2.4.1.2 Ayudantes de coagulación (Coadyuvantes)

Son agentes auxiliares de coagulación, sustancias de origen sintético (polielectrolitos) o natural (alginatos, almidones, entre otros) que son usadas para optimizar los resultados obtenidos el uso de una sola sustancia coaguladora, su acción ayuda a la formación de un floc más fuerte y más sedimentable, reducen la cantidad de coagulante requerido, reducen el volumen de lodos depositados, amplían el rango de condiciones óptimas de floculación y minimizan los residuos químicos; al usar estas sustancias por sí solas producen poco o ningún floc.

Los coadyuvantes son agentes que facilitan la desestabilización de la estructura coloidal, bien sea actuando sobre el potencial Z de los coloides ayudando a anularlo, o bien transformando los hidrófilos en hidrófobos, o modificando el pH del agua, de acuerdo a su función Hernández Muñoz (2001) los clasifica así (Tabla 7):

Tabla 7. Tipos de coadyuvantes.

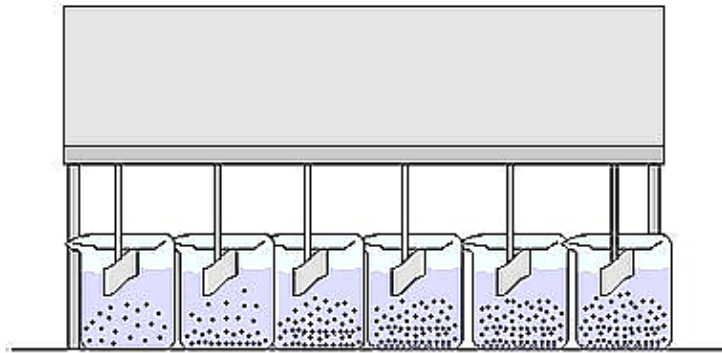
	Función	Sustancia usada
Coadyuvantes Inorgánicos	Modificadores de pH	<ul style="list-style-type: none"> • Cal viva • Cal apagada • Carbonato de soda • Soda cáustica.
	Transformadores de hidrófilos a hidrófobos:	<ul style="list-style-type: none"> • Cloro.
	Neutralizadores de cargas coloidales	<ul style="list-style-type: none"> • Sulfato de magnesio.
	Facilitador de aglomeración de flóculos	<ul style="list-style-type: none"> • Arcillas • Sílice activa • Carbón activado
Coadyuvantes Orgánicos	<ul style="list-style-type: none"> • Alginatos • Tunas • Almidones • Semillas 	

Fuente: Hernández Muñoz, 2001.

1.2.4.2 Test de Jarras

También conocido como “Jar Testing” consiste en el método más usado en la industria del tratamiento de agua para la simulación a escala de las etapas de coagulación, floculación y sedimentación, bajo condiciones muy similares a la operación real de una planta de tratamiento. Según Lozano-Rivas, W. & Lozano, W. (2015), el propósito de este ensayo es el de determinar el tipo de coagulante y/o coadyuvante, y en que dosis genera la más rápida desestabilización de las partículas coloidales, para que se forme un floc lo suficientemente pesado para que por efectos de la gravedad caiga por sedimentación.

El equipo usado consiste fundamentalmente en una serie de 6 ejes agitadores de varilla (también existen equipos de 2 y 4 puestos), en un mismo chasis, que tiene la particularidad que giran simultáneamente todos a una misma velocidad y tiempo regulable y constante, estos ejes pueden moverse en sentido vertical, con el fin de poder extraerlos desde el interior del vaso utilizado (Aguilar, 2002) (Figura 5).



Fuente: https://water.me.vccs.edu/exam_prep/jartest.html

Figura 5. Modelo Test de Jarras

1.3 Marco Conceptual

Aguas residuales: Aguas que contiene material disuelto y en suspensión, luego de ser usada por una comunidad o industria (RAS, 2000).

Almidón: Polímero natural constituido por unidades de glucosa dispuestas en dos componentes: amilosa y amilopectina; su proporción varía de un tipo a otro según sea su fuente. Estas macromoléculas se caracterizan por su grado de polimerización o ramificación lo cual afecta su comportamiento frente a los procesos de degradación; presenta propiedades de consistencia, viscosidad, estabilidad a cambios del pH y temperatura, gelificación y dispersión (Aristizábal, Sánchez and Mejía-Lorío, 2007).

Coagulación: Es el proceso por el que los componentes de una suspensión o disolución estable son desestabilizados por superación de las fuerzas que mantienen su estabilidad (Aguilar, 2002).

Coagulante natural: Son una fuente alternativa con gran potencial aún no explotado suficientemente; se producen de manera espontánea, debido a reacciones bioquímicas que ocurren en animales y en plantas (Villabona, A.; Paz, I & Martínez, J., 2013).

Coagulante alternativo: Coagulantes inorgánicos prepolimerizados (PAC's) contienen una gama de especies hidrolíticas de Al (III), se comportan diferentes a los coagulantes convencionales en el proceso de clarificación debido a sus características de especiación química (Cogollo Flórez, 2011)

Demanda Química de Oxígeno (DQO): Medida de la cantidad de oxígeno requerido para oxidación química de la materia orgánica del agua residual, usando como oxidantes sales inorgánicas de permanganato o dicromato en un ambiente ácido y a altas temperaturas (RAS, 2000).

Eficiencia de tratamiento: Relación entre la masa o concentración removida y la masa o concentración en el afluente, para un proceso o planta de tratamiento y un parámetro específico; normalmente se expresa en porcentaje (RAS, 2000)

Floculación: Es el proceso por el que las partículas desestabilizadas se unen para formar grandes partículas estables o aglomerados (Aguilar, Sáez, Lloréns, Soler, & Ortuño, 2002).

Hidroxiclорuro de aluminio ($Al_2(OH)_5Cl \cdot 2.5H_2O$): Es una sal inorgánica de aluminio multinuclear (PAC) capaz de formar con mayor rapidez y perfección flóculos con mayor velocidad de sedimentación y poder clarificante logrando remociones más altas de turbiedad respecto a otras sales de aluminio mononuclear como el sulfato de aluminio (Cogollo Flórez, 2011)

Test de jarras (jar-test): Método convencional para obtener información sobre el proceso de coagulación-floculación de un determinado efluente; simula las tres etapas principales: coagulación, floculación y sedimentación (Aguilar, 2002).

1.4 Marco Contextual

A continuación, se hace una descripción general del Parque Agroindustrial de Occidente (PAO), lugar donde se localiza la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas (PTARD) donde fue llevado a cabo el desarrollo del presente proyecto.

El Parque Agroindustrial de Occidente (de aquí en adelante PAO) se ubica en la autopista Medellín Km 1,5 vía Siberia (Coordenadas $4^{\circ}44'31.18''N - 74^{\circ}08'11.82''E$) a 2.575 msnm en el municipio de Cota, Cundinamarca (ver Figura 6); está conformado por siete (7) espacios en los cuales se llevan a cabo diversas actividades (Tabla 8 y Tabla 9) y adicional se encuentra el área destinada para recibir y tratar las aguas residuales generadas para su posterior descarga al río Bogotá, la operación de la PTARD la realiza la empresa Baying SAS; la fuente de abastecimiento de agua de PAO es Aguas de la Sabana.



Fuente: Google earth, 2016.

Figura 6. Localización general del Parque Agroindustrial de Occidente – PAO y su PTARD.

Tabla 8. Tipos de actividades desarrolladas en PAO de acuerdo al concepto de uso del suelo.

TIPO DE USO	CARACTERÍSTICAS	ESTABLECIMIENTOS
PRINCIPAL	Industrial con bajo y mediano impacto ambiental urbanístico	Barra Café – Patrón y Compañía SAS – Huevo la Colina Brands – Transportes Circular SAS – InterParts – Hanna – Simple Logística – PapelAlfa LTDA – ICEE COLOMBIA – Sabor Costeño.
	Servicios de ruta: aradores, restaurantes, estacionamientos.	
	Comercial: centro comercial de bajo impacto ambiental y urbanístico, comercial y de servicios 3 y 4.	
COMPATIBLES	Centros de acopio de productos agropecuarios para el almacenamiento y distribución de productos agroindustriales.	Santa Ana – Químicos North - BBC Fruvers and Flowers SAS – Orosol –Sodiak SAS – Mario Garcia – AgroViva SAS – Filtros y No Tejidos.
	Comercial y de servicios nivel 2.	
CONDICIONADOS	Construcción, ampliación y modificación, adecuaciones y operación de terminales para vacaciones, institucional, infraestructura básica para usos principales y compatibles.	EpHitelium SAS – Pollos Savicol.

Fuente: Administración del Parque Agroindustrial y Ajustes Baying SAS, 2015

Tabla 9. Descripción de elementos que conforman PAO.

TIPO DE ESPACIO	CARACTERÍSTICAS
Bodega 1	Compuesto por un conjunto de locales contiguos, planta de dos niveles, corredores peatonales. Porcentaje de locales con uso principal (78,6%), uso compatible (17,9%) y uso condicionado (3,6%).
Bodega 2	Compuesto por un conjunto de locales contiguos, planta de dos niveles, corredores peatonales. Porcentaje de locales con uso principal (75,0%), uso compatible (15,0%) y uso condicionado (10,0%).

TIPO DE ESPACIO	CARACTERÍSTICAS
Bodega 3	Compuesto por un conjunto de locales contiguos, planta de dos niveles, corredores peatonales. Porcentaje de locales con uso principal (81,5%), uso compatible (18,5%).
Bodega 4	Compuesto por un conjunto de locales contiguos, planta de un nivel, porcentaje de locales con uso principal (76,2%), uso compatible (23,8%).
Plataforma	Ubicado sobre la planta superior del parque, (sobre el área administrativa) compuesto en su totalidad por usos principales.
Área Administrativa	Se ubica bajo la plataforma, espacio destinado para el desarrollo de actividades de oficina.
PTARD	Espacio destinado para la recepción de la totalidad de las aguas residuales generadas en el Parque y desarrollo de su respectivo tratamiento previo a su descarga en el Río Bogotá.

Fuente: Baying SAS, 2015.

1.4.1 Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales - PAO

La planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de PAO está compuesta por las siguientes unidades: tanque de igualación, tamiz rotatorio fino, trampa de grasas, zanjón de oxidación, sedimentador secundario, desinfección, clarifloculador, sistema de filtración en arena y carbón activado y sistema de deshidratación de lodos (lechos de secado), como se muestra en el Anexo 1. Plano de la PTARD PAO se presenta el plano en planta de la PTARD PAO.

A continuación, se realiza una descripción de cada una de las unidades de tratamiento que operan; lo cual fue tomado del documento técnico entregado en el año 2015 a la autoridad ambiental para el trámite de solicitud de permiso de vertimientos, el cual fue elaborado por la empresa Baying SAS y es propiedad de PAO.

1.4.1.1 Tanque de igualación

El agua residual generada en las instalaciones de PAO hace su ingreso hacia al sistema de tratamiento mediante dos tuberías de 6" y 8", provenientes de los procesos productivos del parque y de OIKOS respectivamente, a un tanque de igualación y de bombeo, en éste

el agua será acumulada por un tiempo de 5 horas para luego ser bombeada hacia un tamiz mediante dos bombas sumergibles de funcionamiento alterno.

El pozo cuenta con sensores los cuales permiten la activación o la desactivación de las bombas de acuerdo al nivel del agua. El pozo de bombeo cuenta con un sistema de mezcla con aire a través de una tubería perforada en PVC presión alimentado por un soplador, con el fin de homogenizar y airear el agua para mejorar las condiciones de la misma (Fotografía 1).



a) Caseta de control 1: operación de bombas luego del ingreso del agua a la PTARD.



b) Rejilla de mantenimiento en la entrada de la caseta de control 1.



c) Pozo de bombeo: homogeniza y airea el agua.

Fuente: Autores, 2016.
Fotografía 1. Tanque de Igualación.

1.4.1.2 Tamiz rotatorio fino

Posterior al pozo de bombeo se encuentra un tamiz rotatorio fino con el fin de reducir la concentración de sólidos suspendidos y permitir una mayor eficiencia en el tratamiento.

El tamiz es un equipo diseñado para la filtración y/o tamizado de líquidos con alta presencia de sólidos y su objeto es realizar una separación sólido – líquido a través de una distribución uniforme del líquido a lo largo de una malla filtrante. Los sólidos quedan retenidos en la superficie del mismo mientras que el fluido pasa a través de este y es conducido hacia la salida. La unidad maneja un caudal de 1,3 LPS con apertura de malla de 0.75 mm. Debido a que el sistema es autolimpiante, cuenta con una tolva para la recolección de los sólidos retenidos y el agua filtrada pasará por gravedad a la unidad trampa de grasas (Fotografía 2).



a) Vista lateral tamiz rotatorio fino.



b) Vista frontal tamiz rotatorio fino.



c) Distribución uniforme del agua en la malla filtrante.

Fuente: Autores, 2016.

Fotografía 2. Tamiz rotatorio fino.

1.4.1.3 Trampa de grasas

Sistema de flotación que funciona por separación gravitacional, producto de la disminución de la velocidad horizontal de flujo y la diferencia de las densidades entre las sustancias como: aceites, grasas no emulsionadas, jabones y el agua.

El sistema está compuesto por dos (2) unidades en serie, cuenta con dos compuertas para dejar alguna de las unidades en *Stand by (Fuera de Servicio)* por motivos de mantenimientos y garantizar la eficiencia del proceso (

Fotografía 3).



Fuente: Autores, 2016.

Fotografía 3. Trampa de grasas, tanque de flotación donde la grasa sale a la superficie y es retenida mientras el agua sale aclarada.

1.4.1.4 Zanjón de oxidación

Es la unidad en la cual se propician los procesos biológicos de degradación de materia orgánica (DBO soluble) por medio de microorganismos aerobios los cuales utilizan la M.O (Materia Orgánica) como fuente energía (alimento).

El proceso consiste en incentivar el desarrollo de una colonia bacteriana en el tanque alimentado con el efluente a tratar, el cual se encuentra dotado de un sistema de aireación logrando altas eficiencias de remoción de DBO y DQO.

El sistema de aireación en el reactor biológico será realizado por medio de un soplador y un sistema de difusión de burbuja fina instalados en la parte inferior del tanque, lo que permite facilidad de operación y mantenimiento, además de ofrecer una alta eficiencia.

El tanque está construido en concreto reforzado y tiene una capacidad de 230 m³, incluye a su vez dos (2) baffles construidos en poliéster reforzado en fibra de vidrio PRFV dispuestos en los extremos del zanjón con el fin de generar zonas anóxicas (zonas con deficiencia de oxígeno) para la remoción de nutrientes en exceso (Fotografía 4).



a) Vista planta del zanjón de oxidación



b) Bafle 1 generador de zonas anóxicas



c) Plataforma de operación y mantenimiento de la unidad

Fuente: Autores, 2016.

Fotografía 4. Zanjón de oxidación.

1.4.1.5 Sedimentador secundario

Unidad que se encarga de recibir el agua tratada y el licor mezclado, este último incluye la mezcla del efluente con la colonia de bacterias. Dentro de esta unidad se produce la separación de los sólidos y el agua tratada, el clarificado fluye por la parte superior y los sólidos se sedimentan acumulándose en el fondo del mismo.

Con el fin de mantener una concentración de licor mezclado dentro del sistema biológico, este es recirculado hacia el reactor mediante un sistema Airlift y el exceso es enviado a los lechos de secado. El sedimentador está diseñado para recibir una carga menor a $0,5 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-d}$ (Fotografía 5)



a) Vista planta sedimentador secundario



b) Efluente sedimentador secundario

Fuente: Autores, 2016.

Fotografía 5. Sedimentador secundario.

1.4.1.6 Desinfección

Consiste en la destrucción selectiva de los organismos que causan enfermedades. No todos los organismos se destruyen durante el proceso, punto en el que radica la principal diferencia entre la desinfección y la esterilización, proceso que conduce a la destrucción de la totalidad de los organismos.

La pre - desinfección se realiza en una cámara de contacto de cloro donde se aplicará una solución de hipoclorito de sodio, a la entrada de la misma. La dosificación se realizará con un dosificador gravimétrico de graduación manual. Este proceso es efectuado en una cámara construida en concreto de capacidad 8,5 m³.

1.4.1.7 Clarifloculador

El efluente de la cámara de contacto de cloro es enviado al tanque clarifloculador, el cual tiene como finalidad disminuir las concentraciones de sólidos suspendidos totales y turbiedad que se ven reflejados principalmente en una mejora considerable del color del

agua. En esta unidad se presentan tres procesos: coagulación, floculación y sedimentación.

- **Coagulación:** proceso en el cual se anulan las cargas eléctricas de las partículas suspendidas en el agua tales como materia orgánica y sólidos suspendidos y coloidales, que posteriormente se aglomeran por medio de la mezcla de los insumos químicos con el agua a tratar, bajo unos gradientes de velocidad y tiempos de mezcla. suspendidos y coloidales, que posteriormente se aglomeran por medio de la mezcla de los insumos químicos con el agua a tratar, bajo unos gradientes de velocidad y tiempos de mezcla.

Para realizar la mezcla rápida se cuenta con un cono de mezcla, en cuyo vórtice se realiza la dosificación de químicos (Neutralizante, Coagulante y Floculante) a través de tres (3) bombas dosificadoras tipo diafragma.

- **Floculación** es el proceso en el que las partículas sólidas previamente coaguladas en la mezcla rápida, son aglomeradas formando “flocs”, de esta manera aumentan su masa, peso y densidad y su eliminación por sedimentación es más eficiente.
- **Sedimentación** es el proceso mediante el cual se remueve, por acción de la gravedad, el depósito del material en suspensión que ha sido coagulado y floculado.

Estos procesos se efectúan en un tanque troncopiramidal de 8 m³ construido en poliéster reforzado fibra de vidrio PRFV, el cual cuenta con un sistema de tolvaje de 45 grados con el fin de reducir la velocidad ascensional promoviendo la precipitación y facilitando la extracción de los sólidos sedimentados (Fotografía 6).



a) Vista lateral clarifloculador



b) Cono de mezcla clarifloculador

Fuente: Autores, 2016.

Fotografía 6. Clarifloculador

1.4.1.8 Sistemas de filtración en arena y carbón activado

El agua pasa a través de un sistema de filtración con el fin de contribuir a la eliminación de sólidos suspendidos y contaminantes orgánicos e inorgánicos, además de llevar a cabo la remoción de características organolépticas del agua como olor y color.

El sistema incluye dos (2) filtros de arena para trabajo en paralelo y dos (2) filtros de carbón activado para trabajo en serie, construidos en lámina de acero al carbón A-36 de 3/16 de espesor protegidos con pintura epóxica.

El sistema de filtración cuenta con un tanque equilibrio de 500 L con el fin de presurizar los filtros por medio de dos (2) bombas centrifugas con una presión de trabajo de 40 PSI, tuberías de interconexión, válvulas y todos los accesorios necesarios para su correcto funcionamiento (Fotografía 7).



a) Filtros de arena en paralelo.



b) Filtro de carbón activado.

Fuente: Autores, 2016.

Fotografía 7. Sistema de filtración en arena y carbón activado.

1.4.1.9 Sistemas de deshidratación de lodos (lechos de secado)

Los lodos fisicoquímicos y biológicos producidos en el clarifloculador y en el zanjón de oxidación (depositados en el sedimentador) son extraídos y conducidos hacia el sistema de deshidratación de lodos por lechos de secado. Este sistema está compuesto por dos (2) celdas de 9,75 m x 3,7 m x 1,0 m de alto cada una. Las celdas están construidas en mampostería pañetada e impermeabilizada sobre placa de concreto y cuentan con cubierta en teja de zinc. El lixiviado es recogido en el fondo a través de una tubería en forma de espina de pescado y es enviada a cabeza de proceso (Tanque de Igualación) mediante una tubería de retorno (Fotografía 8).



a) Celda 1 (lecho de secado)



b) Distribución de las dos celdas que constituyen el sistema de deshidratación de lodos

Fuente: Autores, 2016.

Fotografía 8. Sistema de deshidratación de lodos (lechos de secado).

Los productos químicos utilizados al interior de la planta de tratamiento de aguas residuales se relacionan en la Tabla 10 (Ver Fotografía 9).

Tabla 10. Características de los productos químicos utilizados en la operación de la PTARD

PRODUCTO QUÍMICO	USO INTERNO	CARACTERÍSTICAS DE PELIGROSIDAD	MEDIDAS DE MANEJO Y CONTROL
Hidroxiclورو de aluminio $Al_2(OH)_5Cl_2 \cdot 5H_2O$	Coagulante en la PTARD	Moderadamente Corrosivo	Hoja de seguridad (Almacenamiento manejo y disposición).
Hidróxido de Sodio (Soda Caustica) NaOH	Control de pH en la PTARD	Corrosivo	Hoja de seguridad (Almacenamiento manejo y disposición).
Polímero Aniónico	Ayudante de coagulación en la PTARD	Ninguno	No se requieren medidas especiales
Hipoclorito de sodio NaClO	Desinfección en la PTARD	Corrosivo	Hoja de seguridad (Almacenamiento manejo y disposición).

Fuente: Baying SAS, 2015.



a) Almacenamiento de envases de residuos químicos



b) Hidroxido de sodio, producto empleado en el control de pH



c) Hidroxicloruro de aluminio, producto usado como coagulante

Fuente: Autores, 2016.

Fotografía 9. Productos químicos usados en la operación de la PTARD.

Anexo 2 se encuentra la carta de autorización por parte de la empresa Baying SAS para la realización de las pruebas dentro de las instalaciones de la PTARD para el desarrollo del presente proyecto.

2 Planteamiento del Problema

Sin importar su origen las aguas residuales presentan impurezas de tipo coloidal que varían de tamaño, oscilando entre los 10^{-8} cm para sustancias solubles y 10^{-2} cm para la materia en suspensión (Aguilar, 2002); la presencia de estas partículas genera turbiedad y color al agua que las contiene; de allí la importancia de recurrir a los procesos de coagulación-floculación para eliminar estas partículas, (Villabona, A.; Paz, I & Martínez, J., 2013) afirman: “La coagulación es el proceso más importante en el tratamiento convencional del agua; pues su aplicación incluye la remoción de especies en suspensión, mediante la adición de coagulantes químicos”.

La coagulación-floculación requiere el uso de compuestos químicos (coagulantes convencionales o alternativos), en su gran mayoría sales metálicas, cuya función principal es desestabilizar energéticamente el medio y estimular la agrupación de coloides en floculos facilitando su posterior precipitación, esto sin duda genera lodos que se convierten en un aspecto ambiental significativo, especialmente cuando estos lodos son descargados en cuerpos de agua, afectando el entorno; en efecto esto se convierte en uno de los aspectos más críticos en la operación de plantas de tratamiento, por lo tanto es primordial mejorar la composición de los coagulantes usados para la remoción de color y turbiedad (Salgar H., J.G., 2006).

Así pues los lodos deben ser tratados antes de su disposición, pues contienen los materiales removidos del agua, así como las sustancias químicas y biológicas usadas durante el tratamiento; por lo tanto este factor se considera muy importante, especialmente por los costos de operación que implica el manejo de estos lodos, que en algunos casos puede llegar a alcanzar el 50% de la inversión y costos que implica la operación completa de la planta (Noyola A., Morgan-Sagastume, J.M & Guereca L.P., 2013)

En este sentido muchas investigaciones se han enfocado en la búsqueda de alternativas de tratamiento de aguas, basadas en la utilización de coagulantes naturales; pues dichos extractos de origen vegetal son eficientes en la remoción de la turbidez del agua, producen menor cantidad de lodos y su principal mecanismo de coagulación utilizado es la adsorción y la neutralización de cargas (Guzmán, Villabona, Tejada, & Garcia, 2013). Estos polímeros naturales se producen en las reacciones bioquímicas naturales de los animales y plantas, como proteínas, carbohidratos y polisacáridos (almidón, glucósidos); específicamente a través de los almidones se han obtenido grandes porcentajes de remoción de color y turbiedad de las aguas tratadas (Ojeda Báez, 2012).

Estas investigaciones realizadas en diferentes regiones del mundo han presentado resultados positivos en la clarificación de aguas, mediante el uso de coagulantes naturales provenientes de diferentes fuentes vegetales; por ejemplo en Daca (Bangladesh) se realizó un estudio que evaluó la eficiencia del *Cicer arietinum* (garbanzo), encontrando una reducción de turbidez en un 95,89% (Asrafuzzaman M.D.; Fakhruddin A.N.M & Hossain A., 2011); en Maracaibo (Venezuela) se investigó el *Cactus latifaria* y semillas de *Prosopis juliflora*, donde se encontró que el uso de estos coagulantes son capaces de producir agua final con turbidez aceptable (5NTU) (Díaz, A, et al., 1999); en Estados Unidos se evaluó la *Opuntia spp.* los resultados mostraron que este coagulante tiene la capacidad de reducir la turbidez con una eficiencia de 92 al 99% (Miller, et al., 2008); en Badajoz (España) se estudiaron dos tipos de extractos de taninos (*Acaciamearnsii* de Wild y *Schinopsisbalansae*) encontrando que estos extractos pueden reducir hasta un 80% el color del agua (Beltrán et al., 2010); posteriormente evaluaron la *Acacia mearnsii* (*Acacia Australiana*) y encontraron una eficiencia del 75% (Beltrán et al., 2011); en México evaluaron la eficiencia mezclas con potencial coagulante compuestas por almidón de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) y sulfato de aluminio, donde se alcanzaron remociones entre el 97,9 y 98,7% (Solís S., R; Laines C., J.R. & Hernández B., J.R., 2012) y en Ecuador se evaluó la eficiencia de las características coagulantes y floculantes del *Tropaeolum Tuberosum* (almidón de Mashua) donde encontraron que el coagulante natural es eficiente como ayudante de floculación, pues se logra obtener una turbiedad de 1,2 NTU de igual forman estos autores precisan las desventajas que presenta el uso de coagulantes convencionales, asociadas principalmente a altos costos de adquisición, producción de grandes volúmenes de lodo, niveles de toxicidad, baja biodegradabilidad y afectación del pH del agua tratada.

En Colombia también se han realizado estudios de este tipo, donde se han evaluado coagulantes naturales, de origen vegetal como el almidón de plátano (Trujillo, D et al., 2014), almidón de tuna (*Opuntia ficus-indica*) (Villabona, A.; Paz, I & Martínez, J., 2013), almidón de yuca y maíz (Rodríguez M., J.P; Lugo U., I.P; Rojas C., A.V. & Malaver C., C., 2007); los resultados de todos coinciden en la eficiencia que presenta el uso de estos coagulantes naturales en el tratamiento de aguas. Como resultado del planteamiento de problema descrito se formula la siguiente hipótesis: “Los almidones naturales extraídos a partir de *Manihot esculenta* (yuca) y *Musa AAB Simmonds*. (Plátano) funcionan como coagulantes para el tratamiento de aguas residuales domésticas”.

Es así como el presente proyecto aplicado pretende hacer una evaluación comparativa de la eficiencia de dos coagulantes de origen natural (almidón de yuca y almidón de plátano) respecto al coagulante inorgánico prepolimerizado (PAC) hidroxiclорuro de aluminio - $Al_2(OH)_5Cl_2 \cdot 5H_2O$, coagulante usado en la operación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas del Parque Agroindustrial de Occidente (PAO).

2.1 Objetivos

2.1.1 Objetivo General

Evaluar y comparar la capacidad coagulante del almidón de yuca (*Manihot esculenta*) y almidón de plátano (*Musa AAB Simmonds*) para el tratamiento de las aguas residuales de la PTARD del Parque Agroindustrial de Occidente – PAO.

2.1.2 Objetivos Específicos

- Extraer el almidón de yuca (*Manihot esculenta*) y almidón de plátano (*Musa AAB Simmonds*) apto para el proceso de coagulación.
- Realizar pruebas de tratabilidad a nivel de laboratorio para evaluar la eficiencia del almidón de yuca (*Manihot esculenta*) y almidón de plátano (*Musa AAB Simmonds*).
- Comparar los resultados obtenidos del test de jarras de los coagulantes naturales evaluados respecto al coagulante convencional empleado en la PTARD PAO.

3 Metodología

La evaluación de la eficiencia del almidón de yuca y plátano en el proceso de coagulación para el tratamiento de aguas residuales de la PTARD del Parque Agroindustrial de Occidente (PAO) se llevó a cabo mediante un proyecto de investigación, fundamentado en los principios teóricos que rigen este proceso unitario; así como en diferentes referentes bibliográficos que han abordado la misma temática de interés. El proyecto se formuló y desarrolló mediante la ejecución de cinco (5) etapas que incluyeron diferentes actividades, técnicas y procedimientos que permitieron alcanzar los objetivos planteados.

3.1 Etapa 1. Consolidación de la Información Marco Referencial

Esta primera etapa del proyecto consistió en la recolección de información que aportó todos los conceptos teóricos y técnicos necesarios para la ejecución y puesta en marcha del presente proyecto, esta recolección inició con la construcción del estado del arte de la temática de interés: coagulación y floculación a partir de agentes de origen natural, permitiendo así determinar la forma como ha sido tratado el tema, cómo se encuentra el avance de su conocimiento y cuáles son las tendencias existentes, tanto a nivel nacional, como a nivel mundial; la información consolidada se presentó en el numeral 1.1 Antecedentes de la Investigación del presente documento.

Adicionalmente se realizó una revisión teórica referente a los conceptos inherentes al tema principal de investigación, pasando de lo general a lo específico; entre las temáticas se cuentan: aguas residuales (características, parámetros de calidad fisicoquímica y microbiológica), suspensiones coloidales, sistemas de tratamiento de aguas residuales, específicamente procesos de coagulación-floculación, coagulantes y ayudantes de coagulación: convencionales (incluyendo los alternativos), así como los de origen natural,

específicamente los dos estudiados (yuca y plátano); la información consolidada se presentó en el numeral 1.2 Marco Teórico.

3.2 Etapa 2. Actividades de Campo

Inicialmente consistió en la construcción de la línea base, en la que se incluyeron observaciones y seguimientos realizados mediante la visita inicial que se realizó de reconocimiento del Parque Agroindustrial de Occidente (PAO) y su Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTARD), donde se reunió la información operacional de la PTARD, en cuanto a procesos unitarios (sedimentación, coagulación, floculación, regulación de pH, filtración y disposición de lodos), la observación se enfatizó en los procedimientos llevados a cabo en los procesos de coagulación y floculación (medición de parámetros como pH y turbiedad, dosificación, pruebas de tratabilidad o test de jarras, manejo de instrumentos de medición, manejo de reactivos); los registros se incluyen en el numeral 1.4 Marco Contextual.

Posteriormente se realizaron las actividades de recolección de muestras, determinación de parámetros in-situ (pH, color, turbiedad y SST), ensayo de jarras (en laboratorio PTARD) y nuevamente determinación de los parámetros de control; para el registro de datos se diseñó un formato que se presenta en el Anexo 4.

3.2.1 Línea Base

3.2.1.1 Análisis Físicoquímicos

De acuerdo a las visitas realizadas se identificó que la empresa encargada de la operación mantenimiento de la PTRAD - PAO, realiza monitoreo diario a parámetros como turbiedad y pH y con una periodicidad anual se efectúa caracterización de vertimientos, donde se incluye parámetros como DBO5, DQO, fosforo total, SST, grasas y aceites, coliformes totales y nitrógeno total.

Las metodologías aplicadas para el análisis In situ y Ex situ se relacionan en la Tabla 11 y Tabla 12.

Tabla 11. Metodología de Análisis Parámetros *In-situ*.

PARÁMETRO	EQUIPO	TÉCNICA ANALÍTICA
pH	Multiparámetro Hach, modelo Sension 156	pH Meter Electrode Method
Temperatura		Direct Measurement Method
OD		Direct Measurement, LDO Probe (EPA)

Fuente: Informe Caracterización de vertimientos PTARD PAO, 2015.

Tabla 12. Metodología de Análisis Parámetros *Ex-situ*.

PARÁMETRO	MÉTODO DE ENSAYO	TÉCNICA ANALÍTICA
DBO ₅	S.M 5210 B	5-day BOD Test
DQO	S.M 5220 C	Closed Reflux, Titrimetric Method
SST	S.M 2540 D	Total Suspended Solids Dried at 103-105°C
Grasas y Aceites	S.M 5520 C	Partition-Infrared Method
Coliformes totales	S.M 9223 B	Enzyme Substrate Coliform Test (Presence/Absence)

Fuente: Informe Caracterización de vertimientos PTARD PAO, 2015.

3.2.1.2 Operación de la unidad Clarifloculador y dosificación

Durante visitas y observación de las unidades de tratamiento se identificó que el efluente de la cámara de contacto de cloro es enviado al tanque clarifloculador, el cual tiene como finalidad disminuir las concentraciones de sólidos suspendidos totales y turbiedad que se ven reflejados principalmente en una mejora considerable del color del agua. En esta unidad se presentarán tres procesos:

- Coagulación
- Floculación
- Sedimentación

El proceso de Coagulación tiene por objetivo eliminar las cargas eléctricas de las partículas suspendidas en el agua tales como materia orgánica y sólidos suspendidos y coloidales, que posteriormente se aglomeran por medio de la mezcla de los insumos químicos con el agua a tratar, bajo unos gradientes de velocidad y tiempos de mezcla.

Para realizar la mezcla rápida se cuenta con un cono de mezcla, en cuyo vórtice se realiza la dosificación de químicos (Neutralizante, Coagulante y Floculante) a través de tres (3) bombas dosificadoras tipo diafragma.

En el proceso de floculación las partículas sólidas previamente coaguladas en la mezcla rápida, son aglomeradas formando “flocs”, de esta manera aumentan su masa, peso y densidad y su eliminación por sedimentación es más eficiente.

Finalmente se somete el caudal al proceso de sedimentación, mediante el cual se remueve por acción de la gravedad, el depósito del material en suspensión que ha sido coagulado y floculado.

3.2.1.3 Manejo y calibración de equipos

La PTARD cuenta con una edificación de estructura pequeña en la que se realiza la preparación de químicos a dosificar y donde además se realizan las pruebas de tratabilidad (Test de jarras) y medición de parámetros como pH, color y SST, en la actualidad se cuenta con los siguientes instrumentos de medición.

Tabla 13. Equipos de medición - Laboratorio PTARD.

Instrumento	Imagen
<p>pH-metro:</p> <p><u>Marca HACH HQ11d</u></p> <p>Se cuenta con soluciones buffer de valor conocido (4, 7 y 10), se procura realizar continuamente la verificación del instrumento para garantizar que se conservan mediciones precisas.</p> <p>No se requiere someter el instrumento a Calibración en Laboratorio especializado, ya que las unidades de medida no son trazables al Sistema Internacional de unidades, las soluciones de referencia permiten monitorear el estado del instrumento, así como de la confiabilidad de la medición.</p>	<div data-bbox="971 1144 1312 1749" data-label="Image"> </div> <p data-bbox="992 1755 1287 1818">Fuente: Autores, 2016. Fotografía 10. pH metro</p>

Instrumento	Imagen
<p>Multiparámetro colorímetro portátil:</p> <p><u>Marca HACH DR900</u></p> <p>Posee tres modos de medida: Transmitancia (%), absorbancia (Abs) y concentración (Conc). Cuenta con detector fotodiodo y rango de longitud de onda 420, 520, 560, 610 nm. Rango de meda fotométrico 0–2 Abs</p> <p>Con este instrumento se mide los parámetros de turbiedad, color y Solidos Suspendidos.</p> <p>No se requiere someter el instrumento a Calibración en Laboratorio especializado, ya que las unidades de medida no son trazables al Sistema Internacional de unidades, las celdas de referencia permiten monitorear el estado del instrumento, así como de la confiabilidad de la medición.</p>	 <p>Fuente: Autores, 2016.</p> <p>Fotografía 11. Multiparámetro colorímetro</p>

Fuente: Autoras, 2016.

3.2.1.4 Medición de Caudal

El caudal de ingreso a la PTARD es conducido a través de dos tuberías de 6” y 8”, provenientes del proceso productivo del Parque Agroindustrial, a un tanque de igualación y de bombeo, en éste el agua es acumulada por un tiempo de cinco (5) horas para luego ser bombeada hacia un Tamiz mediante dos bombas sumergibles de funcionamiento alterno, el caudal es medido a través de una Canaleta Parshall, sin embargo el caudal de diseño de la PTARD es de 1.3 LPS el cual se obtuvo a través de mediciones históricas en el cuerpo receptor, el tanque de igualación permite que el caudal no sea variable y que se mantenga condiciones específicas durante la operación de la PTARD.



Fuente: Autores, 2016.

Fotografía 12. Canaleta Parshall

3.2.1.5 Muestreo para actividades en campo

Se realizaron muestreos puntuales y no se hizo necesario implementar mecanismos para la preservación muestras ni medios de transporte, ya que el análisis de las muestras se hizo a través de la medición de parámetros como pH, color, turbiedad y sólidos suspendidos, cubiertos por los equipos con los que se contaba en campo, por lo tanto, todas las mediciones fueron In Situ y se utilizaron los siguientes materiales:

- Equipos portátiles para la medición de los parámetros seleccionados.
- Un balde de muestreo con lazo o manila de longitud suficiente para el muestreo.
- Frasco lavador.
- Toallas de papel absorbente.
- Cinta pegante y de enmascarar.
- Bolsa pequeña para basura.
- Esfero (bolígrafo) y marcador de tinta indeleble.
- Tabla portapapeles.
- Guantes.

- Agua desionizada o destilada. En su defecto utilizar agua lluvia previamente colectada en vasijas plásticas limpias, o en último caso agua del acueducto del parque.

Para la toma de muestras se debió seleccionar un punto fijo, el cual se encuentra en un canal accesible que precede el tanque clarifloculador, con las muestras tomadas en este punto se podrá medir los parámetros a evaluar de manera confiable sin alteraciones.

La toma se hace de forma manual introduciendo la botella en el punto seleccionado del cuerpo de agua, a una profundidad no mayor de 30 cm y evitando la recolección de sólidos suspendidos, se deja llenar completamente la botella que siempre debe estar en posición contracorriente, se saca y se descarta un pequeño volumen de agua (aproximadamente medio centímetro). Es importante antes de recoger la muestra realizar por lo menos dos purgas (enjuagar con aproximadamente un 1/3 de capacidad de la botella). (Corpoamazonia, 2017).

3.3 Etapa 3. Actividades de Laboratorio

Para la ejecución de esta etapa se realizaron tres (3) actividades, las cuales fueron: extracción y preparación del almidón de yuca (*Manihot esculenta*) y plátano (*Musa AAB Simmonds.*), dilución de coagulante alternativo hidroxiclورو de aluminio y realización de test de jarras. La Tabla 14 muestra los materiales y reactivos usados durante estas actividades.

Tabla 14. Lista de materiales y reactivos procedimiento experimental.

	Act.1 Extracción y Preparación del Almidón	Act. 2 Preparación del coagulante hidroxiclورو de aluminio	Act. 3 Test de Jarras
Equipos	<ul style="list-style-type: none"> • Molino • Licuadora 	<ul style="list-style-type: none"> • Ninguno 	<ul style="list-style-type: none"> • Agitador múltiple (Jar-test) • pH metro • Turbidímetro
Utensilios	<ul style="list-style-type: none"> • Rallador • Recipiente de vidrio 1000 ml 	<ul style="list-style-type: none"> • Vasos de precipitado de 500 ml • Probeta de 100 ml 	<ul style="list-style-type: none"> • Vasos de precipitado de 1000 ml

	Act.1 Extracción y Preparación del Almidón	Act. 2 Preparación del coagulante hidroxiclورو de aluminio	Act. 3 Test de Jarras
	<ul style="list-style-type: none"> • Tamiz diámetro 1 mm • Lienzo • Bandejas para secado ambiente • Cuchillo • Esponja (limpieza) 	<ul style="list-style-type: none"> • Agitador manual • Toallas absorbentes 	<ul style="list-style-type: none"> • Pipetas de 1ml a 10 ml en caso contrario Jeringas 1 ml a 10 ml • Frascos de vidrio de 100 ml con tapa
Reactivos	<ul style="list-style-type: none"> • Agua Potable (Lavado) • Agua Destilada (Extracción) • Plátano - <i>Musa AAB Simmonds</i> • Yuca - <i>Manihot esculenta</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Hidroxiclورو de Aluminio $Al_2(OH)_5Cl_2 \cdot 5H_2O$ • Agua destilada 	<ul style="list-style-type: none"> • Hidroxiclورو de Aluminio $Al_2(OH)_5Cl_2 \cdot 5H_2O$ • Hidróxido de Sodio - Soda caustica NaOH • Solución de Plátano - <i>Musa AAB Simmonds</i> • iv. Solución de Yuca - <i>Manihot esculenta</i>

Fuente: Autores, 2016

3.3.1 Actividad 1. Extracción y Preparación del Almidón de Yuca (*Manihot esculenta*) y Plátano (*Musa AAB Simmonds*.)

Para la extracción del almidón se utilizó yuca y plátano comprados en plaza de mercado, el método de extracción aplicado en ambos casos fue artesanal, se realizaron dos mecanismos de extracción: el almidón de yuca se extrajo a través del método húmedo y el almidón de plátano a través del método seco; a continuación, se describen las metodologías utilizadas para cada uno de ellos.

3.3.1.1 Extracción almidón de yuca (*Manihot esculenta*)

Para la extracción del almidón de yuca se siguieron las recomendaciones citadas en la guía técnica para la producción y análisis de almidón de yuca (FAO, 2007).

a. *Selección de raíces.* La guía recomienda que las raíces de yuca deben ser procesadas de 24 – 48 horas posteriores a su cosecha y el proceso de extracción deberá realizarse en el menor tiempo posible, esta recomendación aplica para el almidón destinado al consumo humano, para el presente proyecto este tiempo no es crítico dado que el almidón obtenido tendrá fines diferentes a los alimenticios.

b. *Lavado y pelado de raíces:* La materia prima se somete a lavado retirando las impurezas y residuos que pueda contener la cascarilla de las raíces, se deberá evitar la pérdida de la cascara ya que esta también contiene almidón.

c. *Rallado o desintegración:* Este proceso se realiza manualmente para liberar el almidón de la raíz empleando un rallador fabricado en aluminio, al pasar la yuca a través del rayo se obtiene masa de ralladura, la cual será fina debido al diámetro de los orificios del instrumento empleado. El proceso se efectúa en seco y se busca optimizar su eficiencia para evitar pérdidas de almidón en el afrecho desechado (Freddy Alarcón M, Dominique Dufor, 1998).

d. *Colado y extracción:* Para la separación de la masa de ralladura de la lechada de almidón se emplea un lienzo que permita separar de manera eficaz los dos productos, sin permitir el paso de pequeñas fibras o partículas que pudiesen contaminar la lechada del almidón, esta actividad se realiza dos veces para garantizar la calidad de la lechada.

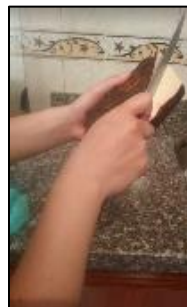
e. *Sedimentación y deshidratación:* Para este fin se emplean recipientes de vidrio tipo probeta que permitan sedimentar la lechada y obtener el almidón extraído a partir de los gránulos en suspensión.

f. *Secado:* El almidón obtenido se someterá a secado solar, se busca remover la humedad del almidón de un 12% a 13%.

g. *Acondicionamiento:* Si se obtiene gránulos grandes debe pasar por tamizado y finalmente es empacado en bolsas secas.



Fuente: Autores, 2016.
Fotografía 13.
Selección de raíces



Fuente: Autores, 2016.
Fotografía 14. Lavado y pelado de raíces.



Fuente: Autores, 2016.
Fotografía 15. Rallado o desintegración.



Fuente: Autores, 2016.
Fotografía 16. Colado y extracción.



Fuente: Autores, 2016.
Fotografía 17. Sedimentación y deshidratación.



Fuente: Autores, 2016.
Fotografía 18. Secado almidón.



Fuente: Autores, 2016.
Fotografía 19. Acondicionamiento almidón de yuca.

3.3.1.2 Extracción almidón de plátano (*Musa AAB Simmonds.*)

Para la extracción del almidón de plátano se siguieron las recomendaciones dadas por Alzate, Marín & Mazzeo (2008).

- a. *Selección del plátano.* Se seleccionan plátanos sanos no maduros.
- b. *Lavado:* Se lavan los plátanos seleccionados con agua potable y desinfectando con una solución de hipoclorito de sodio al 1% sumergiéndolos durante 10 minutos.
- c. *Pelado:* Posteriormente y de manera inmediata se procede a retirar la cascara de la pulpa manualmente con cuchillo.
- d. *Rebanado:* Con la ayuda de un cuchillo se debe trocear los plátanos en rodajas de 4 mm aproximadamente.

- e. *Secado*: Las rodajas obtenidas en la etapa anterior se disponen en bandejas y someten a secado solar hasta evidenciar que se removi6 humedad suficiente del plátano.
- f. *Molido y tamizado*: Las rodajas secas se pasan a través de un molino de cocina, el almid6n obtenido es pasado a trav6s de un tamiz para eliminar impurezas y gránulos grandes.
- g. *Empacado*: El producto obtenido se empaqa en bolsas secas de polietileno.



Fuente: Autores, 2016.
Fotografía 20.
Selección del plátano.



Fuente: Autores, 2016.
Fotografía 21.
Lavado del plátano.



Fuente: Autores,
2016.
Fotografía 22.
Pelado del
plátano.



Fuente: Autores, 2016.
Fotografía 23. Rebanado
del plátano.



Fuente: Autores, 2016.
Fotografía 24. Secado de rebanadas de
plátano.



Fuente: Autores, 2016.
Fotografía 25. Molido y tamizado almid6n de
plátano.

3.3.1.3 Preparación del almid6n de Yuca (*Manihot esculenta*) y Plátano (*Musa AAB Simmonds*.)

Para preparar el almid6n se determin6 la concentraci6n del mismo, la densidad y volumen preparado, as6 como el volumen de la jarra, para el presente proyecto se determin6

emplear la concentración teórica de los mismos, jarra de 1000 ml y volumen de preparación de 2,5 L.

- a. **Concentración:** Para el almidón de yuca (*Manihot esculenta*) obtenido a partir de raíces de buena calidad donde se procuró evitar el contacto con agentes extraños durante su extracción se consideró una composición teórica del 63% de almidón presente en el material extraído (Buitrago A, 1990).

Para el almidón de plátano (*Musa AAB Simmonds*) obtenido a partir de frutos verdes de buena calidad se consideró una concentración teórica de 68% de almidón (Soto Azurduy, 2010).

Es importante mencionar que en procesos industriales (tecnificados) las extracciones de este tipo de almidones alcanzan concentraciones que se encuentran en el rango 92 – 96%. La pureza del almidón está dada por el contenido del mismo; valores bajos son indicativos de un proceso de extracción ineficiente (FAO, 2007).

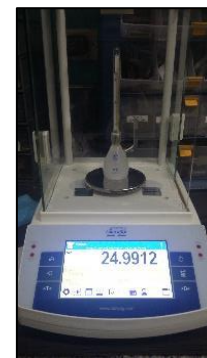
- b. **Densidad:** Para hallar la densidad de los almidones se procedió a diluir 25 g de cada almidón en 2,5 L de agua destilada, esta fue la dilución que se empleó para iniciar el test de jarras, la medición se realizó con el método gravimétrico empleando un picnómetro (25 ml) y una balanza de laboratorio analítica (0,001 g).



a) Balanza analítica con picnómetro vacío



b) Balanza analítica con picnómetro lleno (yuca)



b) Balanza analítica con picnómetro lleno (plátano)

Fuente: Autores, 2016.

Fotografía 26. Determinación de la densidad de los almidones

Los cálculos realizados para la determinación de la densidad fueron los siguientes:

Considerando que la densidad es la relación entre la masa y el volumen de una sustancia:

$$\text{Densidad } (\rho) = \frac{\text{Masa}}{\text{Volumen}} = \frac{m}{V}$$

La determinación experimental de la densidad del líquido se realizó con un picnómetro (25 ml), entonces:

$$\rho_{\text{almidón de yuca}} = \frac{m_{\text{almidón de yuca}}}{V_{\text{Picnómetro}}} = \frac{24,9909 \text{ ml}}{25 \text{ ml}} = 0,999 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{\text{almidón de plátano}} = \frac{m_{\text{almidón de plátano}}}{V_{\text{Picnómetro}}} = \frac{24,9912 \text{ ml}}{25 \text{ ml}} = 0,999 \text{ g/cm}^3$$

A partir de este procedimiento se obtuvieron los valores para la magnitud evaluada.

$$\text{Densidad almidón de yuca (Manihot esculenta)} = 0,999 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Densidad almidón de plátano (Musa AAB Simmonds)} = 0,999 \text{ g/cm}^3$$

3.3.1.4 Preparación almidón de yuca (Manihot esculenta)

A continuación, se describe el proceso para realizar conversión de unidades de la concentración inicial.

$$\% P/V = \% P/P * \rho$$

Dónde:

$\%P/V$ = Concentración peso / volumen

$\%P/P$ = Concentración peso / peso

ρ = Densidad

Se reemplazan los valores en la ecuación, así:

$$\% P/V = \frac{63 \text{ g}}{100 \text{ g}} * 0,999 \text{ g/cm}^3$$

$$\% P/V = 0.629 \text{ g/cm}^3$$

Luego se realiza la conversión a mg/L

$$0.629 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * \frac{1000 \text{ cm}^3}{1 \text{ L}} * \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} = 629.370 \text{ mg/L}$$

Al haber obtenido el valor de la concentración del almidón de yuca en unidades de mg/L se procedió a calcular la concentración del coagulante de trabajo (almidón de yuca), teniendo en cuenta el volumen del recipiente donde se realiza la preparación 2.500 ml, la concentración del almidón 629.370 mg/L y el volumen del almidón de yuca. Para obtener este último valor se despejo de la magnitud densidad, así:

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Dónde: ρ : Densidad
m: Masa
v: Volumen

Entonces,

$$v = \frac{m}{\rho}$$

Luego se reemplazan los valores:

$$v = \frac{25 \text{ g}}{0,999 \text{ g/cm}^3}$$

$$v = 25,03 \text{ cm}^3$$

Una vez conocido este valor se continuó con la determinación de la concentración para hallar la dosis óptima en el test de jarras, de la siguiente manera.

$$V_1 * C_1 = V_2 * C_2$$

Dónde:

V_1 = Volumen almidón de yuca

C_1 = Concentración en mg/L

V_2 = Volumen del aforo en el recipiente

C_2 = *Concentración* de la solución de almidón de yuca de trabajo

Reemplazando en la ecuación:

$$25,03 \text{ ml} * 629.370 \text{ mg/L} = 2.500 \text{ ml} * C_2$$

Para hallar la C_2 o concentración de trabajo se despeja de la ecuación

$$C_2 = \frac{25,03 \text{ ml} * 629.370 \text{ mg/L}}{2.500 \text{ ml}}$$

$$C_2 = 6.301 \text{ mg/L}$$

Es así como se obtuvo la concentración del coagulante natural (yuca) usado para las pruebas de jarras.

3.3.1.5 Preparación almidón plátano (Musa AAB Simmonds.)

A continuación, se describe el proceso para realizar conversión de unidades de la concentración inicial.

$$\%P/V = \%P/P * \rho$$

Dónde:

$\%P/V$ = Concentración peso / volumen

$\%P/P$ = Concentración peso / peso

ρ = Densidad

Se reemplazan los valores en la ecuación:

$$\%P/V = \frac{68 \text{ g}}{100 \text{ g}} * 0,999 \text{ g/cm}^3$$

$$\% P/V = 0,67932 \text{ g/cm}^3$$

Luego se realiza la conversión a mg/L

$$0,67932 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * \frac{1.000 \text{ cm}^3}{1 \text{ L}} * \frac{1.000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} = 679.320 \text{ mg/L}$$

Al haber obtenido el valor de la concentración del almidón de plátano en unidades de mg/L se procedió a calcular la concentración del coagulante de trabajo (almidón de plátano), teniendo en cuenta el volumen del recipiente donde se realiza la preparación 2.500 ml, la concentración del almidón 679.320 mg/L y el volumen del almidón de plátano. Para obtener este último valor se despeja de la magnitud densidad, así:

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Dónde: ρ : Densidad
m: Masa
v: Volumen

Entonces,

$$v = \frac{m}{\rho}$$

Luego se procede a despejar de la siguiente manera

$$v = \frac{25 \text{ g}}{0,999 \text{ g/cm}^3}$$

$$v = 25,03 \text{ cm}^3$$

Una vez conocido este valor se continuó con la determinación de la concentración para hallar la dosis óptima en el test de jarras, de la siguiente manera.

$$V_1 * C_1 = V_2 * C_2$$

V_1 = Volumen almidón de plátano

C_1 = Concentración en mg/L

V_2 = Volumen del aforo en el recipiente

C_2 = Concentración de la solución de almidón de plátano de trabajo

Se reemplaza en la ecuación:

$$25,03 \text{ ml} * 679.320 \text{ mg/L} = 2.500 \text{ ml} * C_2$$

Para hallar la C_2 o concentración de trabajo se despeja la ecuación:

$$C_2 = \frac{25,05 \text{ ml} * 679.320 \text{ mg/L}}{2.500 \text{ ml}}$$

$$C_2 = 6.801 \text{ mg/L}$$

Es así como se obtuvo la concentración del coagulante natural (plátano) usado para las pruebas de jarras.

3.3.2 Actividad 2. Preparación del coagulante alternativo hidroxiclورو de aluminio

Conforme al volumen requerido en el ensayo, se diluyó la solución de hidroxiclورو de aluminio $[\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}]$ a partir del reactivo cuya concentración es de 25% y su densidad se encuentra entre $1,33 \pm 0,03 \text{ g/cm}^3$ (Ficha técnica del producto - Anexo 3), a partir de estos datos se obtuvo la concentración ideal para la dosificación en planta, a través del test de jarras.

El coagulante viene en presentación líquida en envases de 25 L, la preparación es realizada en un bidón plástico (500 L), el cual sirve de suministro para la operación de la planta, la dosificación y concentración siempre depende de las condiciones de calidad que trae el agua que entra a la unidad coaguladora, por lo tanto, a diario se realizan pruebas de jarras para determinar la dosis óptima para la operación.

3.3.3 Actividad 3. Test de Jarras

Esta técnica es ampliamente usada para determinar la dosis óptima, en este caso, la de los coagulantes evaluados: almidón de yuca (*Manihot esculenta*) y plátano (*Musa AAB Simmonds.*) y del coagulante alternativo (hidroxiclورو de aluminio); se realizaron varias

repeticiones hasta que se obtuvieron clarificaciones aceptables, estos ensayos se efectuaron en el laboratorio de la PTARD PAO.

Para el desarrollo del test de jarras se tomó como fuente la metodología establecida en la Norma Técnica Colombiana NTC 3903 (ICONTEC, 2010), los recursos usados fueron, equipos: agitador múltiposición (se dispuso de agitador de dos puestos), pH-metro, multiparámetro colorímetro portátil; materiales: vasos de precipitado de 500 ml, jeringas de 1 ml, 5 ml y 10 ml y reactivos: almidón de yuca (*Manihot esculenta*), almidón de plátano (*Musa AAB Simmonds.*) y coagulante alternativo (hidroxicloruro de aluminio).

Antes y después de la aplicación del test de jarras a las muestras de agua recolectadas se les determinaron los parámetros de pH, color, turbiedad y SST; durante el test de jarras se tuvo en cuenta los tiempos de formación del floc y el índice de Willcomb, el cual permite evaluar de forma cuantitativa y cualitativa la formación del floc (Tabla 15).

Tabla 15. Índice de floculación de Willcomb.

Índice de Willcomb	Descripción
0	Ausente: Floc Coloidal: Ningún signo de aglutinación.
2	Visible: Floc muy pequeño; casi imperceptible para observador no entrenado.
4	Disperso. Floc bien formado pero distribuido en toda la columna de agua (sedimentación excesivamente lenta o nula)
6	Claro. Floc de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud.
8	Bueno. Floc que se deposita fácil y completamente.
10	Excelente. Floc que se deposita totalmente, dejando el agua cristalina.

La determinación de las dosis óptimas se realizó de la siguiente manera:

- a. A todas las muestras de agua se les determinó los parámetros de: pH, color, turbiedad y SST.



Fuente: Autores, 2016.

Fotografía 27. Medición pH.

- b. Llenado de vasos de precipitado con 1 L de muestra y se ubicaron bajo los agitadores del equipo, sumergiendo las paletas en las muestras.



Fuente: Autores, 2016.

Fotografía 28. Muestras de agua en equipo de jarras.

- c. Para simular la mezcla rápida, se puso el aparato a funcionar a 100 RPM y se inyectó la dosis de coagulante con la ayuda de jeringas, con el fin que el coagulante penetre profundamente la muestra de agua; la mezcla se realizó durante 30 segundos.
- d. Para simular la mezcla lenta o floculación, se puso el aparato a 40 RPM durante 2 minutos y se registraron los tiempos de formación de los flóculos y los tamaños de los mismos, haciendo uso del índice de Willcomb.



Fuente: Autores, 2016.

Fotografía 29. Formación de flóculos durante test de jarras.

- e. Para suponer la sedimentación, se detuvo la mezcla y se extrajeron las paletas cuidadosamente para no disturbar el agua, dejando los vasos en quietud durante 15 minutos.



a) Formación de flóculos



b) Formación de flóculos



Fuente: Autores, 2016.

Fotografía 30. Sedimentación de flóculos formados.

- f. Empleando una jeringa se extrajeron las muestras de agua tratada para cada vaso, cuidando de efectuar esta operación a la misma velocidad de succión y a la misma profundidad (5 a 10 cm).
- g. Se determinaron parámetros de pH, color, turbiedad y SST de cada una de las muestras tratadas y se eligió la dosis óptima de acuerdo a las eficiencias obtenidas.



Fuente: Autores, 2016.

Fotografía 31. Medición de parámetros después de test de jarras.

3.4 Etapa 4. Análisis y Procesamiento de la Información

Se realizó análisis detallado de los resultados obtenidos en las pruebas de tratabilidad para los dos coagulantes naturales evaluados, confrontados con los resultados obtenidos del coagulante alternativo, a través de tabulaciones y gráficos, por medio del uso de Microsoft Excel (2013); este análisis permitió definir la eficiencia de cada uno de los coagulantes y permitió dar un concepto de la evaluación realizada.

3.4.1 Análisis estadístico

Todas las pruebas de jarras se realizaron por triplicado, con el fin de minimizar los errores experimentales que se pudieran presentar durante los ensayos; con lo cual se garantiza la precisión de los datos reportados; en este sentido todos los datos que se entregan como resultados corresponden a la media aritmética (promedio simple) de las tres lecturas realizadas en cada test; el cálculo fue realizado a partir de la siguiente fórmula:

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n}$$

En el Anexo 4 se presentan la totalidad de datos registrados para todos los ensayos realizados.

3.5 Etapa 5. Entrega de Resultados

Una vez confrontados los resultados obtenidos en las etapas anteriores se procedió a documentar de manera detallada el análisis efectuado y las conclusiones de la evaluación propuesta, se utilizaron tablas para sintetizar resultados y gráficas para demostrar comportamientos en los parámetros de calidad seleccionados, se usó Microsoft Word (2013) y Microsoft Excel (2013); en el numeral 4 se presentan los resultados y discusión.

4 Resultados y Discusión

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en los test de jarras para cada uno de los coagulantes evaluados, así como para el hidroxicloriguro de aluminio; cada tabla representa las seis (6) jarras evaluadas en cada sesión de trabajo, dónde se aplicaron diferentes dosis de coagulante a un mismo pH, tomando lectura de los parámetros de pH, color, turbiedad y SST.

4.1 Almidón de Yuca (*Manihot esculenta*)

Test 1

En el primer test no se aplicó soda caustica, solo se evaluó la acción de las diferentes dosis del coagulante con el pH que trae el agua; a continuación, se presentan las condiciones antes (condiciones iniciales) y después (condiciones finales) de la realización del test de jarras para cada uno de los parámetros evaluados.

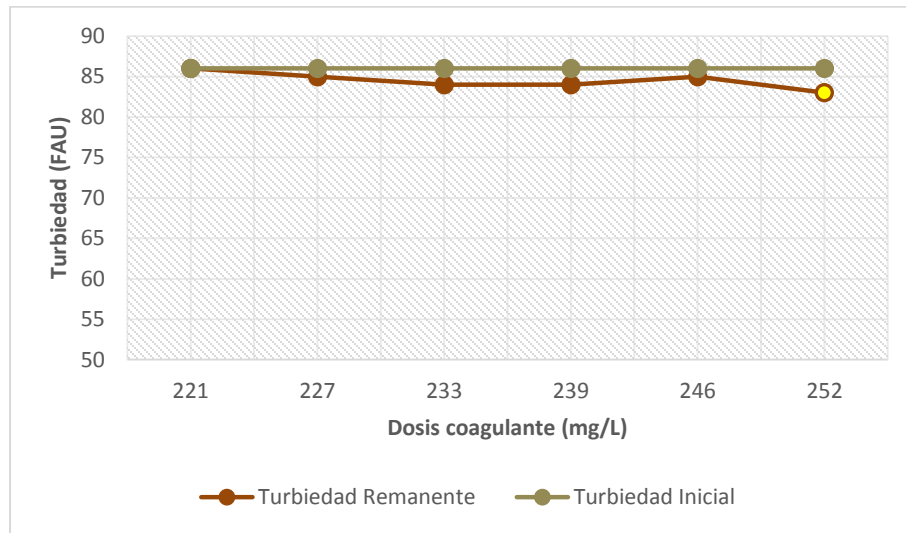
Condiciones iniciales

No. Jarra	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
Blanco	7,10	621	86	89

Condiciones finales

No. Jarra	Dosis aplicada de coagulante (ml)	Concentración (ppm)	Índice de Willcomb	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
1	17,5	221	0	614	86	86
2	18,0	227	0	610	85	85
3	18,5	233	0	610	84	89
4	19,0	239	0	593	84	86
5	19,5	246	0	599	85	87
6	20,0	252	0	613	83	84

La Gráfica 1 representa los resultados obtenidos en términos de turbiedad para cada una de las dosis usadas en cada una de las jarras; la que presentó mejor remoción en este primer test fue la jarra número 6, en la cual se aplicó coagulante con concentración [252 ppm], obteniendo una turbiedad final de 83 FAU (eficiencia de 3,5%).



Fuente: Autores, 2016.

Gráfica 1. Test 1 – Almidón de yuca

Test 2

Es importante mencionar que en condiciones normales la PTARD PAO opera en la fase de coagulación con la adición de hidroxiclورو de aluminio, cuyo funcionamiento se activa al estar en condiciones básicas, por lo tanto, es necesario el uso de soda caustica para regular estos niveles de pH.

Considerando lo mencionado en el párrafo anterior y teniendo en cuenta el bajo resultado en la disminución de la turbiedad del primer test, se buscó con los siguientes test evaluar si la eficiencia de los almidones naturales mejoraba con el aumento del pH, al igual que sucede con el coagulante químico.

Por lo tanto, en el segundo test se adicionó 1 ml de soda caustica con el fin de subir aproximadamente una unidad el pH y nuevamente evaluar la acción coagulante a diferentes dosis.

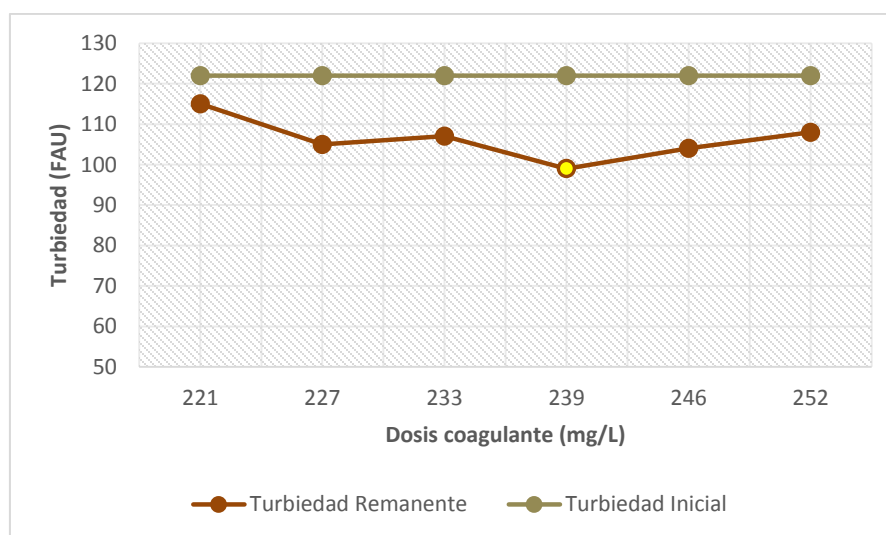
Condiciones iniciales

No. Jarra	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
Blanco	6,85	635	122	112

Condiciones finales

No. Jarra	Dosis aplicada de coagulante (ml)	Concentración (ppm)	Índice de Willcomb	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
1	17,5	221	2	8,50	591	115	104
2	18,0	227	2	8,15	592	105	103
3	18,5	233	2	8,19	587	107	93
4	19,0	239	4	8,84	574	99	86
5	19,5	246	2	7,89	570	104	90
6	20,0	252	2	8,87	574	108	95

La Gráfica 2 representa los resultados obtenidos en términos de turbiedad para cada una de las dosis usadas en cada una de las jarras; la que presentó mejor remoción en este test fue la jarra número 4, en la cual se aplicó coagulante con concentración [239 ppm], obteniendo una turbiedad final de 99 FAU (eficiencia de 18,9%).



Fuente: Autores, 2016.

Gráfica 2. Test 2 – Almidón de yuca

Test 3

Nuevamente para el tercer test se adicionaron 2 ml de soda caustica con el fin de subir una unidad más el pH y volver a evaluar la acción coagulante a diferentes dosis.

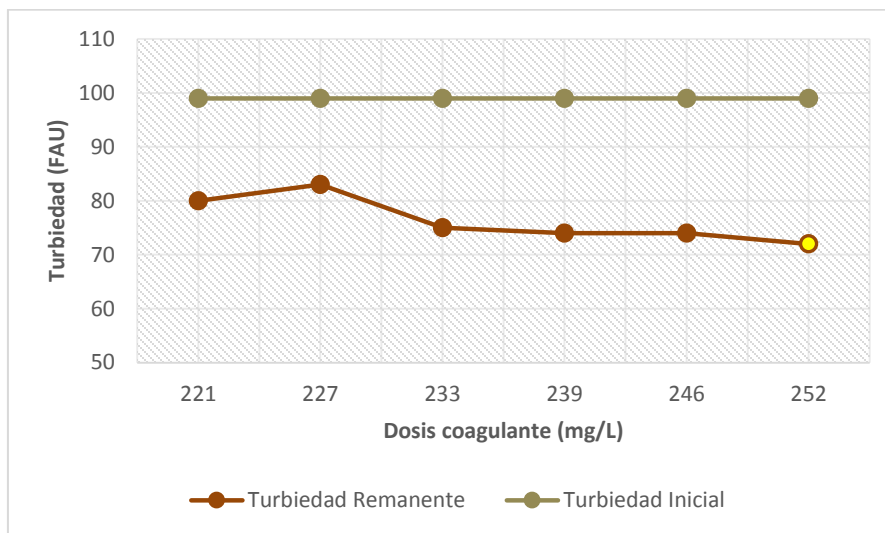
Condiciones iniciales

No. Jarra	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
Blanco	7,18	637	99	95

Condiciones finales

No. Jarra	Dosis aplicada de coagulante (ml)	Concentración (ppm)	Índice de Willcomb	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
1	17,5	221	2	9,40	584	80	71
2	18,0	227	2	9,47	597	83	72
3	18,5	233	4	9,62	546	75	61
4	19,0	239	4	9,71	568	74	66
5	19,5	246	4	9,76	563	74	70
6	20,0	252	4	10,20	566	72	66

La Gráfica 3Gráfica 2 representa los resultados obtenidos en términos de turbiedad para cada una de las dosis usadas en cada una de las jarras; la que presentó mejor remoción en este test fue la jarra número 6, en la cual se aplicó coagulante con concentración [252 ppm], obteniendo una turbiedad final de 72 FAU (eficiencia de 27,3%).



Fuente: Autores, 2016.
Gráfica 3. Test 3 – Almidón de yuca

Test 4

En el cuarto test se adicionaron 3 ml de soda caustica:

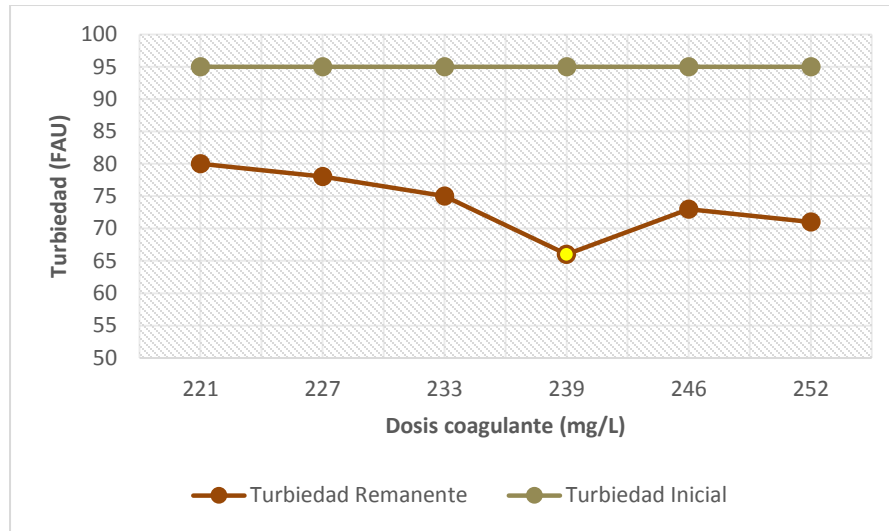
Condiciones iniciales

No. Jarra	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
Blanco	6,94	612	95	86

Condiciones finales

No. Jarra	Dosis aplicada de coagulante (ml)	Concentración (ppm)	Índice de Willcomb	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
1	17,5	221	2	10,27	578	80	69
2	18,0	227	2	10,85	549	78	65
3	18,5	233	4	10,57	541	75	63
4	19,0	239	6	10,95	539	66	61
5	19,5	246	4	10,87	541	73	63
6	20,0	252	4	10,60	552	71	62

La Gráfica 4 representa los resultados obtenidos en términos de turbiedad para cada una de las dosis usadas en cada una de las jarras; la que presentó mejor remoción en este test fue la jarra número 4, en la cual se aplicó coagulante con concentración [239 ppm], obteniendo una turbiedad final de 66 FAU (eficiencia de 30,5%).



Fuente: Autores, 2016.

Gráfica 4. Test 4 – Almidón de yuca

Test 5

Finalmente, en el quinto test se adicionaron 4 ml de soda caustica, siendo esta la dosis más elevada que se utilizó (alcanzando niveles de pH cercano a 12); puesto que al adicionar mayores dosis (entre 5 y 6 ml) no se evidenció que el pH aumentará más unidades, esto debido a que se llegaba a un nivel de saturación ocasionado por el mismo regulador de pH usado; adicionalmente es importante recordar que para estas pruebas se tomó como punto de referencia el coagulante que usa normalmente la PATRD PAO (hidroxicloruro de aluminio) y este tiene un pH óptimo de funcionamiento que se encuentra entre 5.0 y 9.0 (Cogollo Flórez, 2011), por lo tanto las pruebas se realizaron 3 unidades de pH por encima de lo que teóricamente funcional el coagulante polimérico.

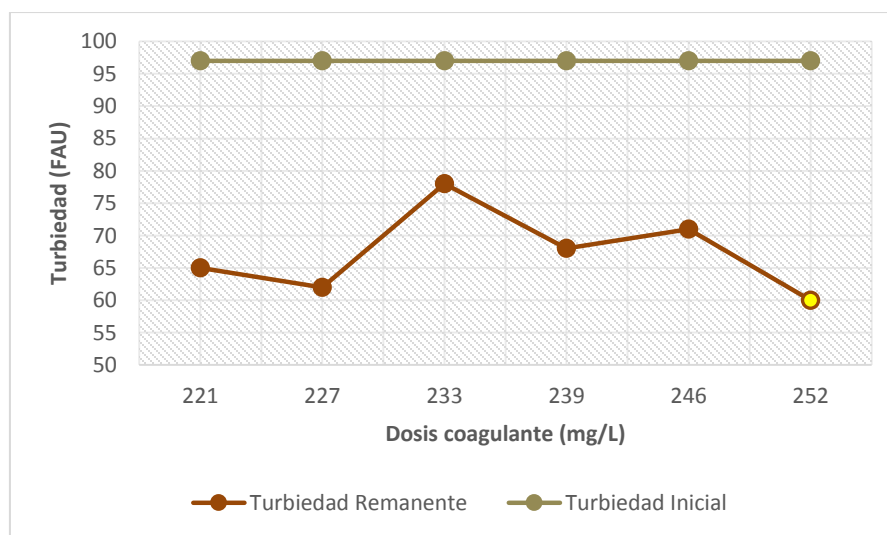
Condiciones iniciales

No. Jarra	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
Blanco	7,23	647	97	102

Condiciones finales

No. Jarra	Dosis aplicada de coagulante (ml)	Concentración (ppm)	Índice de Willcomb	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
1	17,5	221	6	11,24	537	65	74
2	18,0	227	6	11,28	528	62	77
3	18,5	233	4	11,03	536	78	64
4	19,0	239	6	11,12	532	68	76
5	19,5	246	4	10,65	532	71	73
6	20,0	252	8	11,45	508	60	62

La Gráfica 5Gráfica 3Gráfica 2 representa los resultados obtenidos en términos de turbiedad para cada una de las dosis usadas en cada una de las jarras; la dosis óptima para el almidón de yuca se presentó en la jarra 6, pues fue la que mejor remoción presentó, la dosis aplicada fue de 20 ml de coagulante que equivale a una concentración de [252 ppm], se obtuvo una turbiedad final de 60 FAU (eficiencia de 38,1%).



Fuente: Autores, 2016.

Gráfica 5. Test 5 – Almidón de yuca

4.2 Almidón de Plátano (*Musa AAB Simmonds.*)

En el caso del almidón de plátano se realizaron la misma cantidad de pruebas que se hicieron con el almidón de yuca e igualmente se tuvieron en cuenta las mismas consideraciones descritas en el numeral 4.3.1.

Test 1

En el primer test no se aplicó soda caustica, solo se evaluó la acción de las diferentes dosis del coagulante con el pH que trae el agua; a continuación, se presentan las condiciones antes (condiciones iniciales) y después (condiciones finales) de la realización del test de jarras para cada uno de los parámetros evaluados.

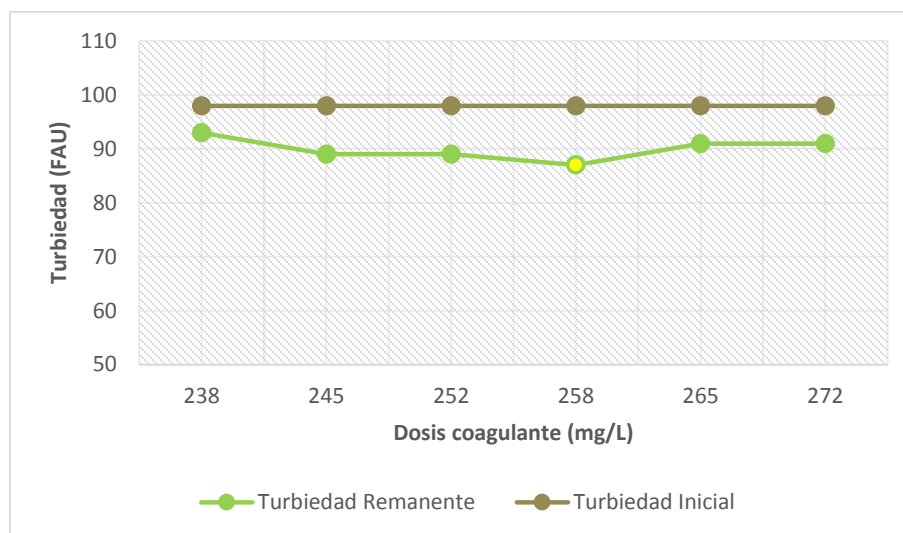
Condiciones iniciales

No. Jarra	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
Blanco	6,88	617	94	90

Condiciones finales

No. Jarra	Dosis aplicada de coagulante (ml)	Concentración (ppm)	Índice de Willcomb	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
1	17,5	238	0	611	93	89
2	18	245	0	604	89	87
3	18,5	252	0	607	89	83
4	19	258	0	589	87	84
5	19,5	265	0	577	91	86
6	20	272	0	575	91	88

La Gráfica 6 representa los resultados obtenidos en términos de turbiedad para cada una de las dosis usadas en cada una de las jarras; la que presentó mejor remoción en este primer test fue la jarra número 4, en la cual se aplicó coagulante con concentración [258 ppm], obteniendo una turbiedad final de 87 FAU (eficiencia de 7,4%).



Fuente: Autores, 2016.

Gráfica 6. Test 1 – Almidón de plátano

Test 2

Para el segundo test se adicionó 1 ml de soda caustica con el fin de subir aproximadamente una unidad el pH y nuevamente evaluar la acción coagulante a diferentes dosis.

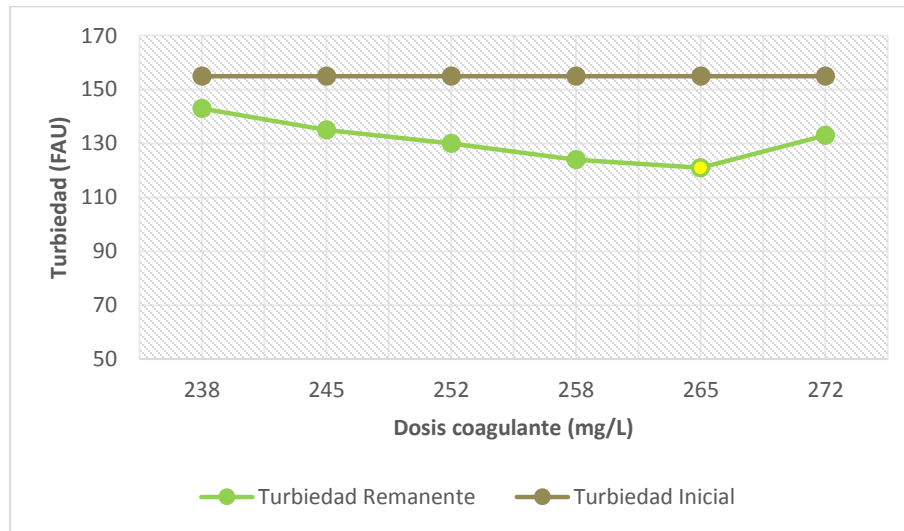
Condiciones iniciales

No. Jarra	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
Blanco	7,09	613	155	142

Condiciones finales

No. Jarra	Dosis aplicada de coagulante (ml)	Concentración (ppm)	Índice de Willcomb	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
1	17,5	238	2	7,52	584	143	133
2	18	245	2	8,35	581	135	126
3	18,5	252	2	7,56	576	130	127
4	19	258	4	8,16	553	124	111
5	19,5	265	4	8,47	589	121	115
6	20	272	2	8,24	596	133	123

La Gráfica 7 representa los resultados obtenidos en términos de turbiedad para cada una de las dosis usadas en cada una de las jarras; la que presentó mejor remoción en este test fue la jarra número 5, en la cual se aplicó coagulante con concentración [265 ppm], obteniendo una turbiedad final de 121 FAU (eficiencia de 21,9%).



Fuente: Autores, 2016.

Gráfica 7. Test 2 – Almidón de plátano

Test 3

Nuevamente para el tercer test se adicionaron 2 ml de soda caustica con el fin de subir una unidad más el pH y volver a evaluar la acción coagulante a diferentes dosis.

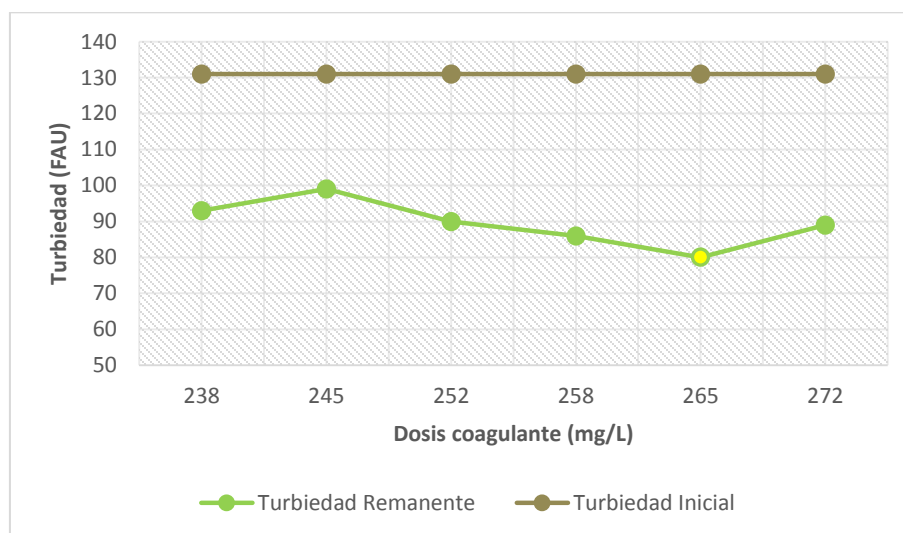
Condiciones iniciales

No. Jarra	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
Blanco	7,05	627	131	145

Condiciones finales

No. Jarra	Dosis aplicada de coagulante (ml)	Concentración (ppm)	Índice de Willcomb	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
1	17,5	238	6	9,24	563	93	111
2	18	245	4	8,57	562	99	114
3	18,5	252	6	8,44	561	90	108
4	19	258	6	9,31	513	86	99
5	19,5	265	6	9,45	487	80	97
6	20	272	6	9,37	551	89	102

La Gráfica 8 representa los resultados obtenidos en términos de turbiedad para cada una de las dosis usadas en cada una de las jarras; la que presentó mejor remoción en este test fue la jarra número 5, en la cual se aplicó coagulante con concentración [80 ppm], obteniendo una turbiedad final de 99 FAU (eficiencia de 38,9%).



Fuente: Autores, 2016.

Gráfica 8. Test 3 – Almidón de plátano

Test 4

En el cuarto test se adicionaron 3 ml de soda caustica, alcanzado valores de pH entre 10 y 11 unidades aproximadamente.

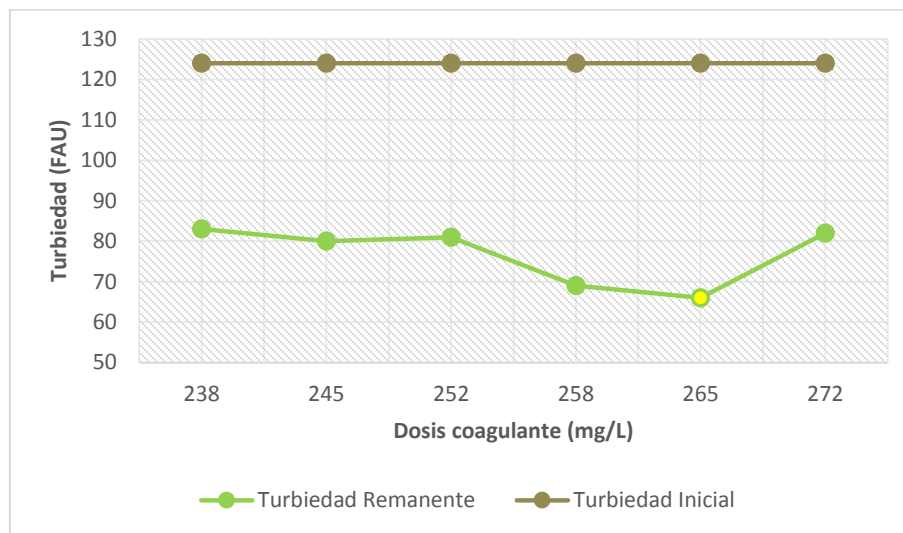
Condiciones iniciales

No. Jarra	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
Blanco	6,92	617	124	135

Condiciones finales

No. Jarra	Dosis aplicada de coagulante (ml)	Concentración (ppm)	Índice de Willcomb	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
1	17,5	238	6	10,18	503	83	95
2	18	245	6	10,35	487	80	97
3	18,5	252	6	10,22	469	81	92
4	19	258	8	10,26	482	69	93
5	19,5	265	8	10,36	538	66	86
6	20	272	6	10,43	519	82	94

La Gráfica 9 representa los resultados obtenidos en términos de turbiedad para cada una de las dosis usadas en cada una de las jarras; la que presentó mejor remoción en este test fue la jarra número 5, en la cual se aplicó coagulante con concentración [265 ppm], obteniendo una turbiedad final de 66 FAU (eficiencia de 46,8%).



Fuente: Autores, 2016.

Gráfica 9. Test 4 – Almidón de plátano

Test 5

Finalmente, en el quinto test se adicionaron 4 ml de soda cáustica, alcanzando un valor máximo de pH de 11,29.

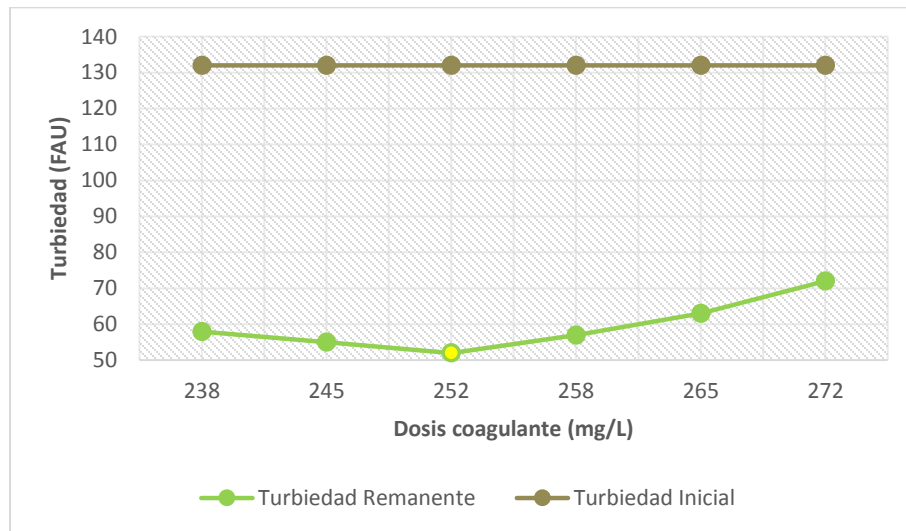
Condiciones iniciales

No. Jarra	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
Blanco	6,98	617	132	123

Condiciones finales

No. Jarra	Dosis aplicada de coagulante (ml)	Concentración (ppm)	Índice de Willcomb	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
1	17,5	238	8	11,08	467	58	65
2	18	245	8	11,11	482	55	62
3	18,5	252	8	11,29	447	52	59
4	19	258	8	11,16	460	57	69
5	19,5	265	8	11,06	502	63	63
6	20	272	8	10,66	538	72	73

La Gráfica 10 representa los resultados obtenidos en términos de turbiedad para cada una de las dosis usadas en cada una de las jarras; la dosis óptima para el almidón de plátano se presentó en la jarra 3, pues fue la que mejor remoción presentó, la dosis aplicada fue de 18,5 ml de coagulante que equivale a una concentración de [252 ppm], se obtuvo una turbiedad final de 52 FAU (eficiencia de 60,9%).



Fuente: Autores, 2016.

Gráfica 10. Test 5 – Almidón de plátano

4.3 Hidroxicloruro de aluminio

Con el fin de finalizar la evaluación de las eficiencias planteadas en el presente proyecto, se realizaron los test de jarras usando el coagulante polimérico: hidroxicloruro de aluminio; a diferencia de los almidones naturales en todas las pruebas con este coagulante se reguló el pH con soda caustica, pues según las recomendaciones dadas por la operación de la PTARD PAO a este coagulante siempre se le adiciona el regulador de pH, para garantizar su óptimo funcionamiento.

Test 1

El primer test incluyó la adición de 1 ml de soda caustica, para subir en una unidad aproximadamente el pH que trae el agua.

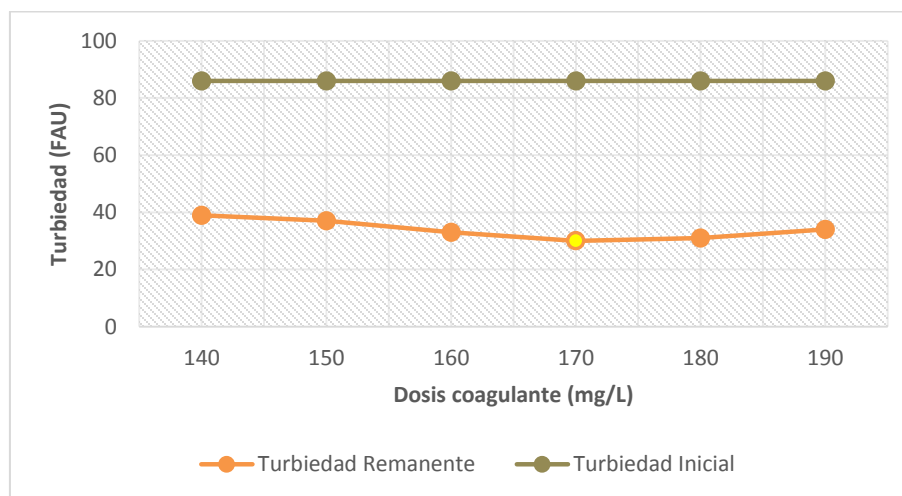
Condiciones iniciales

No. Jarra	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
Blanco	7,12	621	86	76

Condiciones finales

No. Jarra	Dosis aplicada de coagulante (ml)	Concentración (ppm)	Índice de Willcomb	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
1	0,2	140	4	7,42	161	39	19
2	0,2	150	4	7,25	154	37	21
3	0,3	160	4	7,36	148	33	22
4	0,4	170	4	8,06	138	30	21
5	0,5	180	4	8,27	139	31	23
6	0,6	190	4	8,14	149	34	21

La Gráfica 11 Gráfica 1 representa los resultados obtenidos en términos de turbiedad para cada una de las dosis usadas en cada una de las jarras; la que presentó mejor remoción en este primer test fue la jarra número 4, en la cual se aplicó coagulante con concentración [170 ppm], obteniendo una turbiedad final de 30 FAU (eficiencia de 65,1%).



Fuente: Autores, 2016.

Gráfica 11. Test 1 – Hidroxicloruro de aluminio

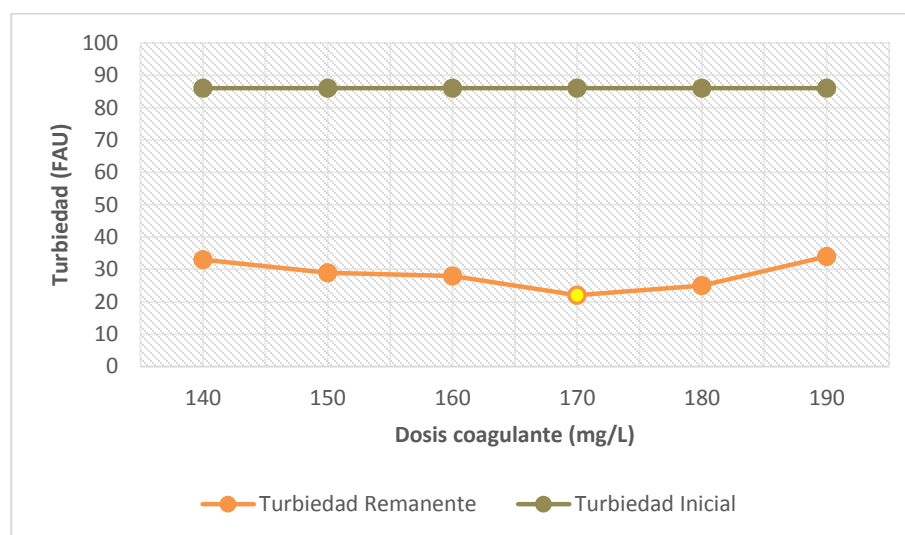
Test 2**Condiciones iniciales**

No. Jarra	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
Blanco	7,12	621	86	76

Condiciones finales

No. Jarra	Dosis aplicada de coagulante (ml)	Concentración (ppm)	Índice de Willcomb	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
1	0,2	140	4	9,32	124	33	12
2	0,2	150	4	9,27	119	29	19
3	0,3	160	4	9,52	114	28	18
4	0,4	170	4	9,61	125	22	17
5	0,5	180	4	9,76	123	25	20
6	0,6	190	4	9,28	136	34	22

La Gráfica 12 representa los resultados obtenidos en términos de turbiedad para cada una de las dosis usadas en cada una de las jarras; la que presentó mejor remoción en este test fue la jarra número 4, en la cual se aplicó coagulante con concentración [170 ppm], obteniendo una turbiedad final de 22 FAU (eficiencia de 74,4%).



Fuente: Autores, 2016.

Gráfica 12. Test 2 – Hidroxicloruro de aluminio

Test 3

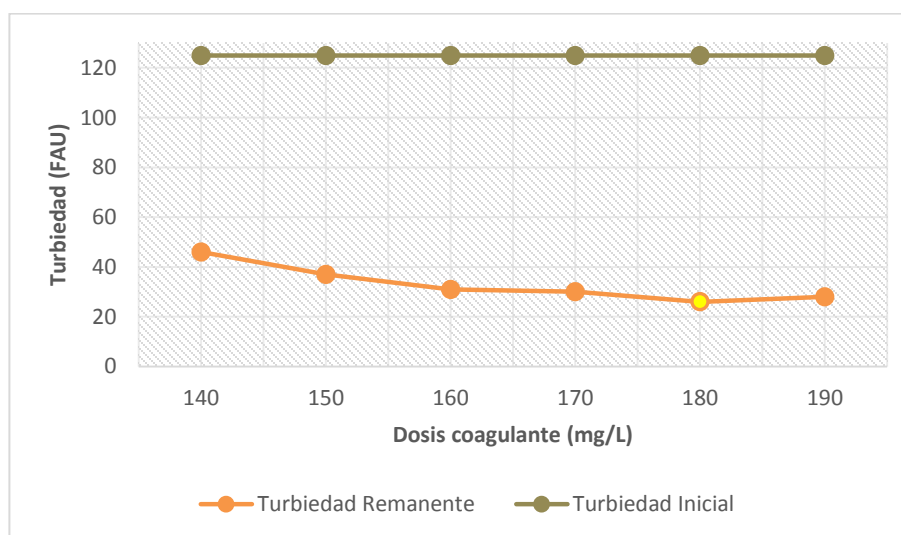
Condiciones iniciales

No. Jarra	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
Blanco	6,53	655	125	132

Condiciones finales

No. Jarra	Dosis aplicada de coagulante (ml)	Concentración (ppm)	Índice de Willcomb	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
1	0,2	140	4	10,52	143	46	27
2	0,2	150	6	10,44	112	37	19
3	0,3	160	6	10,27	120	31	20
4	0,4	170	6	10,31	112	30	15
5	0,5	180	6	10,36	110	26	16
6	0,6	190	6	10,33	109	28	16

La Gráfica 13Gráfica 2 representa los resultados obtenidos en términos de turbiedad para cada una de las dosis usadas en cada una de las jarras; la que presentó mejor remoción en este test fue la jarra número 5, en la cual se aplicó coagulante con concentración [180 ppm], obteniendo una turbiedad final de 26 FAU (eficiencia de 79,2%).



Fuente: Autores, 2016.

Gráfica 13. Test 3 – Hidroxicloruro de aluminio

Test 4

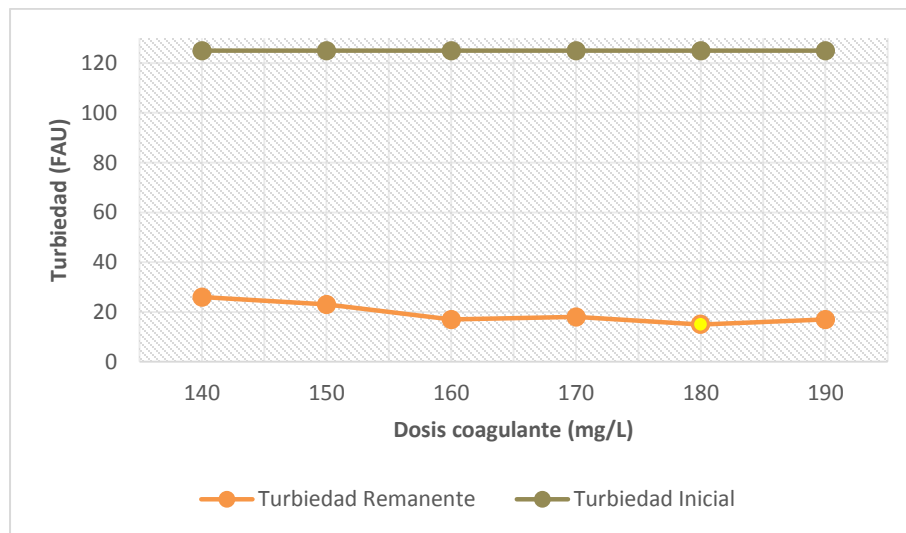
Condiciones iniciales

No. Jarra	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
Blanco	6,53	655	125	132

Condiciones finales

No. Jarra	Dosis aplicada de coagulante (ml)	Concentración (ppm)	Índice de Willcomb	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
1	0,2	140	6	11,34	112	26	14
2	0,2	150	8	11,38	109	23	17
3	0,3	160	8	11,27	107	17	14
4	0,4	170	8	11,46	104	18	15
5	0,5	180	8	10,65	101	15	12
6	0,6	190	8	11,45	104	17	19

La Gráfica 14Gráfica 2 representa los resultados obtenidos en términos de turbiedad para cada una de las dosis usadas en cada una de las jarras; la que presentó mejor remoción en este test fue la jarra número 5, en la cual se aplicó coagulante con concentración [180 ppm], obteniendo una turbiedad final de 15 FAU (eficiencia de 88,0%); esta fue la mejor eficiencia alcanzada en la remoción de turbiedad con el uso del hidroxiclورو de aluminio.



Fuente: Autores, 2016.

Gráfica 14. Test 4 – Hidroxiclورو de aluminio

Ahora bien, después de que se obtuvieron las mejores eficiencias para cada uno de los coagulantes evaluados, se procedió a comparar cada uno de estos resultados, como se muestra en la Tabla 16:

Tabla 16. Eficiencias coagulantes evaluadas

Coagulante Evaluado	Eficiencia obtenida
Almidón de Yuca	38,1%
Almidón de Plátano	60,6%
Hidroxicloriguro de Aluminio	88,0%

Fuente: Autores, 2016.

Para el caso del almidón de yuca se realizaron los siguientes cálculos simples:

$$\text{Eficiencia almidón de yuca} - \text{Eficiencia almidón de plátano}$$

Reemplazando se obtiene:

$$38,1\% - 60,6\% = -22,5 \text{ puntos porcentuales con respecto al almidón de plátano}$$

$$\text{Eficiencia almidón de yuca} - \text{Eficiencia hidroxicloriguro de aluminio}$$

Reemplazando se obtiene:

$$38,1\% - 88,0\% = -49,9 \text{ puntos porcentuales con respecto al hidroxicloriguro de aluminio}$$

Y para el caso del almidón de plátano se realizaron los siguientes cálculos:

$$\text{Eficiencia almidón de plátano} - \text{Eficiencia almidón de yuca}$$

Reemplazando se obtiene:

$$60,6\% - 38,1\% = 22,5 \text{ puntos porcentuales con respecto al almidón de yuca}$$

$$\text{Eficiencia almidón de plátano} - \text{Eficiencia hidroxicloriguro de aluminio}$$

Reemplazando se obtiene

$$60,6\% - 88,0\% = -27,4 \text{ puntos porcentuales con respecto al hidroxicloriguro de aluminio}$$

De lo anterior se concluye entonces que la eficiencia del almidón de yuca se encuentra 22,5 puntos porcentuales por debajo que la del almidón de plátano y 49,9 puntos porcentuales por debajo de la del hidroxiclورو de aluminio.

A su vez la eficiencia del almidón plátano se encuentra 22,5 puntos porcentuales por encima que la del almidón de yuca y 27,4 puntos porcentuales por debajo de la del hidroxiclورو de aluminio.

5 Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

A continuación, se describen las principales conclusiones obtenidas a través del desarrollo del presente proyecto de investigación; las mismas reflejan el cumplimiento de los objetivos planteados.

- A través de los parámetros fisicoquímicos: pH, color, turbiedad y SST se evaluó y comparó de forma cuantitativa y cualitativa (índice de Willcomb) la capacidad coagulante de los almidones de origen natural (yuca y plátano) en las aguas residuales domésticas de la PTARD PAO; el principal parámetro que se consideró para la determinación de la dosis óptima fue la turbiedad, ya que es el principal indicador de presencia de material coloidal en el agua.
- Es posible realizar la extracción de los almidones naturales de forma artesanal a través de protocolos establecidos para este fin; no obstante, la extracción industrial (tecnificada) garantiza que el contenido de almidón se llegue a rangos altos (92 - 96%); quiere decir que concentraciones menores pueden llegar a afectar las características propias de estos polímeros entre ellas sus propiedades coagulantes.
- Se determinó que la dosis óptima del almidón de yuca es de 20 ml a una concentración de 252 ppm, obteniéndose una turbiedad remanente de 60 FAU, color residual de 508 (455 nm PtCo), SST de 62 (mg/L) y pH de 11,45; eficiencia total de 38,1%.

- Se determinó que la dosis óptima del almidón de plátano es de 18,5 ml a una concentración de 252 ppm, obteniéndose una turbiedad remanente de 52 FAU, color residual de 447 (455 nm PtCo), SST de 59 (mg/L) y pH de 11,29; eficiencia total de 60,6%.
- Se determinó que la dosis óptima del Hidroxicloruro de Aluminio es de 0,5 ml a una concentración de 180 ppm, obteniéndose una turbiedad remanente de 15 FAU, color residual de 101 (455 nm PtCo), SST de 12 (mg/L) y pH de 10,65; eficiencia total de 88,0%.
- Al comparar las eficiencias de los almidones de yuca y plátano con respecto a la eficiencia del hidroxicluro de aluminio, se encontró que ambos se encuentran por debajo de este (49,9 y 27,4 puntos porcentuales, respectivamente); de igual forma al comparar la eficiencia entre ambos almidones, se encontró que el almidón de plátano es más eficiente que el de yuca, pues se encuentra 22,5 puntos porcentuales por encima.
- La investigación permitió determinar que las características coagulantes de los almidones evaluados no poseen la eficiencia necesaria para ser usados como coagulante principal, sin embargo los resultados permiten inferir que es viable el uso de los mismos como coayudantes en el proceso de coagulación.

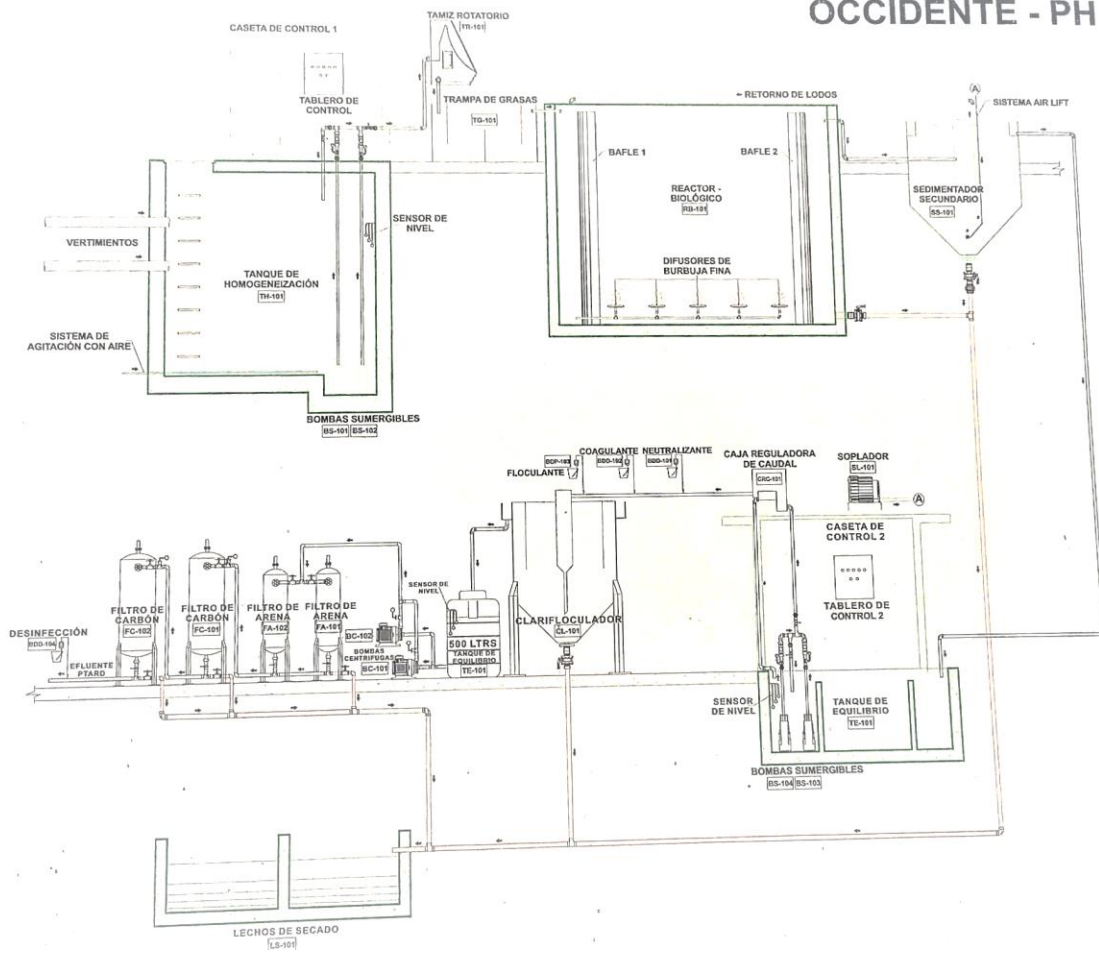
5.2 Recomendaciones

- Evaluar los almidones naturales como coadyuvantes de coagulantes convencionales y alternativos.
- Evaluar el potencial coagulante de los almidones naturales en condiciones ácidas.
- Realizar los test de jarras para los almidones naturales y para el hidroxiloruro de aluminio el mismo día para tener las mismas condiciones en el agua.
- Realizar pruebas con los almidones naturales a nivel planta y evaluar su comportamiento, no solo test de jarras.
- Usar métodos que garanticen la pureza de los almidones, pues esto incide en el potencial coagulante, por ejemplo usar almidones que hayan sido extraídos a nivel industrial.
- Además de la evaluación técnica de la aplicabilidad de este tipo de coagulantes naturales, incluir una evaluación económica que permita cuantificar la efectividad de los mismos.
- Evaluar otras especies naturales maíz, trigo, arroz, sorgo, papa, semillas de leguminosas (frijoles, lentejas, arvejas, garbanzo).

A. Anexos

Anexo 1. Plano de la PTARD PAO

OCCIDENTE - PH



Fuente: Baying SAS, 2015.

Anexo 2. Carta de autorización Baying SAS

Bogotá D.C. 16 de julio de 2016

Señores:

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD –
Escuela De Ciencias Agrícolas, Pecuarias Y Del Medio Ambiente – ECApMA –
CEAD José Acevedo y Gómez
Programa Ingeniería ambiental
Ciudad

Asunto. Permiso de trabajo PTARD PAO

A través de la presente me permito informar que la empresa *Baying S.A.S.* encargada de la operación y mantenimiento de la planta de tratamiento de agua residual doméstica, ubicada dentro del Parque Agroindustrial De Occidente PAO, autoriza el acceso a las instalaciones de la misma para adelantar el proyecto de investigación “Evaluación de almidón de *Manihot esculenta* (yuca) y *Musa AAB Simmonds*. (Plátano) en procesos de coagulación y floculación para el tratamiento de aguas residuales en la PTARD del Parque Agroindustrial de Occidente – PAO” a las estudiantes; Anyela Patricia Másmela Rozo identificada con cedula de ciudadanía 1.030.562.822 y Nathaly Aguilar Cristancho identificada con cedula de ciudadanía 1.022.947.497.

La visita de las estudiantes a la planta deberá ser anunciada con anterioridad, de tal manera que la administración de PAO tenga conocimiento de la visita, para lo cual cada una deberá enviar con anterioridad la planilla actual de aportes parafiscales, adicionalmente deberán ser supervisadas por el operador de la planta, para garantizar la seguridad de las estudiantes y la integridad del proceso efectuado.

Cualquier duda adicional con gusto será atendida.

Cordialmente

Jorge Eduardo Bernal
Coordinador de Proyectos
Email. jbernal@bayingsas.com
Tel. 318 290 92 37

Anexo 3. Fichas técnicas

Hidroxiclорuro de aluminio - $Al_2(OH)5Cl_2 \cdot 5H_2O$

HIDROXICLORURO DE ALUMINIO (HIDROX-CLAL-QUIN)

Es un polinuclear de aluminio líquido (Hidroxiclорuro de Aluminio) que se desempeña efectivamente como coagulante inorgánico para aguas tanto potables como residuales.

VENTAJAS:

- Económico, efectivo a dosis muy bajas.
- No altera el pH del sistema.
- Bajo volumen de lodos
- Fácil de dosificar y manejar.
- Trabaja en rango amplio de pH.
- Velocidad de alta sedimentación
- Mayor carrera de filtros
- No requiere el uso de alcalinizantes

FORMULA: $Al_n(OH)_m Cl_{(3n-m)}$ $0 < m < 3n$

ESPECIFICACIONES:

Contenido Al_2O_3 (%):	18.0 - 24.0
Basicidad (%):	≥ 70
Acidez (%):	11.0 – 12.5
Turbiedad (NTU):	50 máximo
Densidad:	1.30 – 1.40 g/ml
Fecha de vencimiento:	12 meses

PRESENTACIÓN: El Hidroxiclорuro de Aluminio se despacha en isotanques, tambores plásticos, garrafas y a granel.

USO DEL PRODUCTO: empleado como coagulante-floculante en clarificación para condiciones de alta turbiedad sin disminuir el pH. En la industria del papel para el proceso de encolado, piscinas, en la industria petrolera y tratamiento de aguas residuales industriales.

CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO: Se debe almacenar en tanques cerrados de fibra de vidrio, polietileno, polipropileno, en garrafas, tambores y contenedores plásticos.

PRECAUCIONES PARA EL USO Y SEGURIDAD: Es astringente, se requiere de gafas protectoras, guantes de Neopreno o plásticos. No es un producto tóxico, pero puede producir leve resequedad e irritación en la piel y ojos por tratarse de un producto de carácter ácido.

Fuente: Química Integrada S.A. - Quinsa

Hidróxido de Sodio (Soda Caustica) - NaOH

DATOS DEL PRODUCTO / PRODUCT DATA

Lejía o Soda Cáustica es el nombre comercial del Hidróxido de Sodio, es una solución acuosa que contiene entre 48.5 y 52.0% en peso de NaOH aproximadamente.

Bleach or Caustic Soda is the technical name of the Sodium Hydroxide; it is a solution that contains 48.5 to 52.0 % of NaOH in water.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS / TECHNICAL SPECIFICATIONS


ANÁLISIS <i>Analysis</i>	ESPECIFICACIÓN <i>Specification</i>	MÉTODO DE ENSAYO <i>Test Method</i>
Apariencia <i>Appearance</i>	Líquido viscoso; translucido a ligeramente turbio. <i>Viscous liquid; revealed to lightly turbid</i>	Visual <i>Visual</i>
Olor <i>Odor</i>	Inoloro <i>No Smell</i>	Visual <i>Visual</i>
Hidróxido de Sodio <i>Sodium Hydroxide</i>	48.5 -52.0%	ME-CC-049
Carbonato de Sodio <i>Sodium Carbonate</i>	0.10 – 0.20	ME-CC-037
Oxido de Sodio <i>Sodium Oxidize</i>	37.2 – 39.5	ME-CC-002
Cloruro de Sodio <i>Sodium Chloride</i>	100ppm	ME-CC-038
Sulfato de Sodio <i>Sodium Sulfate</i>	80ppm	ME-CC-029
Hierro <i>Iron</i>	12 ppm Máximo <i>12 ppm Maximum</i>	ME-CC-021
Densidad <i>Density</i>	1,514 – 1,546 g/cm ³	ME-CC-033

Los Métodos de ensayo usados en este caso se basan en la NORMA TECNICA COLOMBIANA NTC – 2139 vigente.

The Testing methods used in this case are based on the TECHNICAL COLOMBIAN NORM NTC - 2139.

Fuente: Mexihem Clor Vinilo

Anexo 4. Formato de registro de datos en laboratorio

 Universidad Nacional Abierta y a Distancia		FORMATO ENSAYO DE JARRAS								CÓDIGO: 01			
		Proyecto de Investigación: Evaluación de almidón de <i>Manihot esculenta</i> (yuca) y <i>Musa AAB Simmonds</i> . (plátano) en procesos de coagulación y floculación para el tratamiento de aguas residuales en la PTARD del Parque Agroindustrial de Occidente – PAO								VERSIÓN: 1-2016 PÁGINAS: 1 de 1			
Fecha toma de datos													
Vaso No.	Dosis aplicada de alcalizante (mg/L)	Dosis aplicada de coagulante (mg/L)	Dosis aplicada de coadyudante (mg/L)	Tiempo de formación del floc (s)	Índice de Willcomb	ph del agua (Unidades)		Color del agua (UPC)		Turbiedad del agua (FAU)		SST del agua (mg/L)	
						Cruda	Tratada	Cruda	Tratada	Cruda	Tratada	Cruda	Tratada
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													
13													
14													
15													
16													
17													
18													
19													
20													
21													
22													
23													
24													
25													

Índice de Willcomb

0. Ausente. Floc Coloidal: Ningún signo de aglutinación.

2. Visible. Floc muy pequeño; casi imperceptible para observador no entrenado.

4. Disperso. Floc bien formado pero distribuido en toda la columna de agua (sedimentación excesivamente lenta o nula)

6. Claro. Floc de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud.

8. Bueno. Floc que se deposita fácil y completamente.

10. Excelente. Floc que se deposita totalmente, dejando el agua cristalina.

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD
 Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente - ECAPMA
 Ingeniería Ambiental

Fuente: Autores, 2016

Anexo 5. Registro completo de datos pruebas de jarras

Almidón de Yuca (*Manihot esculenta*)

Test 1 – Sin adición de soda caustica

Fecha: 04-jun-2016

Condiciones Iniciales

No. Jarra	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
Blanco	7,10	621	86	89

Condiciones finales

TEST 1

No. Jarra	Repetición	Dosis aplicada de coagulante (ml)	Concentración (ppm)	Índice de Willcomb	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
1	1	17,5	221	0	613	85	87
	2			0	615	86	85
	Promedio			0	614	86	86
2	1	18	227	0	609	87	88
	2			0	611	85	85
	Promedio			0	610	85	85

TEST 1

No. Jarra	Repetición	Dosis aplicada de coagulante (ml)	Concentración (ppm)	Índice de Willcomb	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
3	1	18,5	233	0	610	83	88
	2			0	609	87	89
	Promedio			0	610	84	89
4	1	19	239	0	593	83	82
	2			0	592	84	90
	Promedio			0	593	84	86
5	1	19,5	246	0	597	86	85
	2			0	600	84	89
	Promedio			0	599	85	87
6	1	20	252	0	612	83	85
	2			0	614	84	83
	Promedio			0	613	83	84

Fuente: Autores, 2016

Test 2 – Adición de 1 ml de soda caustica

Fecha: 11-jun-2016

Condiciones Iniciales

No. Jarra	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
Blanco	6,85	635	122	112

Condiciones finales**TEST 2**

No. Jarra	Repetición	Dosis aplicada de coagulante (ml)	Concentración (ppm)	Índice de Willcomb	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
1	1	17,5	221	2	8,48	591	115	104
	2			2	8,51	590	114	103
	Promedio			2	8,50	591	115	104
2	1	18	227	2	8,13	593	106	101
	2			2	8,16	592	104	103
	Promedio			2	8,15	592	105	103
3	1	18,5	233	2	8,18	586	107	92
	2			2	8,19	588	107	93
	Promedio			2	8,19	587	107	93
4	1	19	239	4	8,82	576	102	82
	2			4	8,86	572	96	89
	Promedio			4	8,84	574	99	86

TEST 2

No. Jarra	Repetición	Dosis aplicada de coagulante (ml)	Concentración (ppm)	Índice de Willcomb	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
5	1	19,5	246	2	7,91	570	106	92
	2			2	7,87	569	102	89
	Promedio			2	7,89	570	104	90
6	1	20	252	2	8,74	577	112	99
	2			2	8,99	571	104	91
	Promedio			2	8,87	574	108	95

Fuente: Autores, 2016

Test 3 – Adición de 2 ml de soda caustica

Fecha: 18-jun-2016

Condiciones Iniciales

No. Jarra	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
Blanco	7,18	637	99	95

Condiciones finales**TEST 3**

No. Jarra	Repetición	Dosis aplicada de coagulante (ml)	Concentración (ppm)	Índice de Willcomb	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
1	1	17,5	221	2	9,44	586	83	76
	2			2	9,36	581	76	67
	Promedio			2	9,40	584	80	71
2	1	18	227	2	9,38	599	82	66
	2			2	9,55	594	83	79
	Promedio			2	9,47	597	83	72
3	1	18,5	233	4	9,65	537	79	63
	2			4	9,58	555	72	58
	Promedio			4	9,62	546	75	61
4	1	19	239	4	9,77	552	72	67
	2			4	9,65	585	76	64
	Promedio			4	9,71	568	74	66

TEST 3

No. Jarra	Repetición	Dosis aplicada de coagulante (ml)	Concentración (ppm)	Índice de Willcomb	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
5	1	19,5	246	4	9,68	548	73	77
	2			4	9,84	577	74	62
	Promedio			4	9,76	563	74	70
6	1	20	252	4	10,09	555	70	61
	2			4	10,30	576	74	71
	Promedio			4	10,20	566	72	66

Fuente: Autores, 2016

Test 4 – Adición de 3 ml de soda caustica

Fecha: 25-jun-2016

Condiciones Iniciales

No. Jarra	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
Blanco	6,94	612	95	86

Condiciones finales**TEST 4**

No. Jarra	Repetición	Dosis aplicada de coagulante (ml)	Concentración (ppm)	Índice de Willcomb	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
1	1	17,5	221	2	10,14	587	71	63
	2			2	10,39	569	89	74
	Promedio			2	10,27	578	80	69
2	1	18	227	2	10,93	558	81	62
	2			2	10,76	540	75	68
	Promedio			2	10,85	549	78	65
3	1	18,5	233	4	10,71	543	70	64
	2			4	10,42	539	80	63
	Promedio			4	10,57	541	75	63
4	1	19	239	6	11,03	536	62	56
	2			6	10,87	542	70	65
	Promedio			6	10,95	539	66	61

TEST 4

No. Jarra	Repetición	Dosis aplicada de coagulante (ml)	Concentración (ppm)	Índice de Willcomb	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
5	1	19,5	246	4	10,74	549	71	68
	2			4	10,99	532	75	57
	Promedio			4	10,87	541	73	63
6	1	20	252	4	10,27	540	64	55
	2			4	10,92	563	77	68
	Promedio			4	10,60	552	71	62

Fuente: Autores, 2016

Test 5 – Adición de 4 ml de soda caustica

Fecha: 02-jul-2016

Condiciones Iniciales

No. Jarra	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
Blanco	7,23	647	97	102

Condiciones finales**TEST 5**

No. Jarra	Repetición	Dosis aplicada de coagulante (ml)	Concentración (ppm)	Índice de Willcomb	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
1	1	17,5	221	6	10,99	531	60	69
	2			6	11,49	543	70	79
	Promedio			6	11,24	537	65	74
2	1	18	227	6	11,34	544	60	79
	2			6	11,21	512	64	75
	Promedio			6	11,28	528	62	77
3	1	18,5	233	4	11,18	540	76	57
	2			4	10,87	531	80	71
	Promedio			4	11,03	536	78	64
4	1	19	239	6	11,04	544	65	69
	2			6	11,19	519	71	82
	Promedio			6	11,12	532	68	76

TEST 5

No. Jarra	Repetición	Dosis aplicada de coagulante (ml)	Concentración (ppm)	Índice de Willcomb	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
5	1	19,5	246	4	11,01	522	65	80
	2			4	10,28	541	76	66
	Promedio			4	10,65	532	71	73
6	1	20	252	8	11,21	500	58	59
	2			8	11,69	516	63	65
	Promedio			8	11,45	508	60	62

Fuente: Autores, 2016

Almidón de Plátano (*Musa AAB Simmonds.*)

Test 1 – Sin adición de soda caustica

Fecha: 09-jul-2016

Condiciones Iniciales

No. Jarra	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
Blanco	6,88	617	94	90

Condiciones Finales

TEST 1

No. Jarra	Repetición	Dosis aplicada de coagulante (ml)	Concentración (ppm)	Índice de Willcomb	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
1	1	17,5	238	0	603	100	80
	2			0	619	85	97
	Promedio			0	611	93	89
2	1	18	245	0	610	92	96
	2			0	598	86	78
	Promedio			0	604	89	87
3	1	18,5	252	0	609	99	79
	2			0	605	78	87
	Promedio			0	607	89	83
4	1	19	258	0	583	90	96
	2			0	594	84	71
	Promedio			0	589	87	84

TEST 1

No. Jarra	Repetición	Dosis aplicada de coagulante (ml)	Concentración (ppm)	Índice de Willcomb	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
5	1	19,5	265	0	558	87	87
	2			0	595	95	85
	Promedio			0	577	91	86
6	1	20	272	0	588	90	96
	2			0	561	92	80
	Promedio			0	575	91	88

Fuente: Autores, 2016

Test 2 – Adición de 1 ml de soda caustica

Fecha: 16-jul-2016

Condiciones Iniciales

No. Jarra	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
Blanco	7,09	613	155	142

Condiciones Finales**TEST 2**

No. Jarra	Repetición	Dosis aplicada de coagulante (ml)	Concentración (ppm)	Índice de Willcomb	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
1	1	17,5	238	2	7,47	585	140	149
	2			2	7,57	583	147	117
	Promedio			2	7,52	584	143	133
2	1	18	245	2	8,01	592	142	110
	2			2	8,69	570	128	142
	Promedio			2	8,35	581	135	126
3	1	18,5	252	2	7,10	581	140	120
	2			2	7,99	571	120	134
	Promedio			2	7,56	576	130	127
4	1	19	258	4	8,10	556	112	116
	2			4	8,22	550	136	105
	Promedio			4	8,16	553	124	111
5	1	19,5	265	4	8,62	583	113	109
	2			4	8,32	594	129	120
	Promedio			4	8,47	589	121	115

TEST 2

No. Jarra	Repetición	Dosis aplicada de coagulante (ml)	Concentración (ppm)	Índice de Willcomb	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
6	1	20	272	2	8,09	599	127	119
	2			2	8,39	593	138	127
	Promedio			2	8,24	596	133	123

Fuente: Autores, 2016

Test 3 – Adición de 2 ml de soda caustica

Fecha: 23-jul-2016

Condiciones Iniciales

No. Jarra	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
Blanco	7,05	627	131	145

Condiciones Finales**TEST 3**

No. Jarra	Repetición	Dosis aplicada de coagulante (ml)	Concentración (ppm)	Índice de Willcomb	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
1	1	17,5	238	6	9,12	556	84	118
	2			6	9,35	570	102	104
	Promedio			6	9,24	563	93	111
2	1	18	245	4	8,87	552	89	112
	2			4	8,27	572	108	116
	Promedio			4	8,57	562	99	114
3	1	18,5	252	6	8,22	578	100	102
	2			6	8,65	543	80	113
	Promedio			6	8,44	561	90	108
4	1	19	258	6	9,15	535	79	89
	2			6	9,46	490	93	109
	Promedio			6	9,31	513	86	99
5	1	19,5	265	6	9,55	490	81	99
	2			6	9,34	483	80	94
	Promedio			6	9,45	487	80	97

TEST 3

No. Jarra	Repetición	Dosis aplicada de coagulante (ml)	Concentración (ppm)	Índice de Willcomb	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
6	1	20	272	6	9,18	545	94	104
	2			6	9,55	557	84	100
	Promedio			6	9,37	551	89	102

Fuente: Autores, 2016

Test 4 – Adición de 3 ml de soda caustica

Fecha: 30-jul-2016

Condiciones Iniciales

No. Jarra	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
Blanco	6,92	617	124	135

Condiciones Finales**TEST 4**

No. Jarra	Repetición	Dosis aplicada de coagulante (ml)	Concentración (ppm)	Índice de Willcomb	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
1	1	17,5	238	6	10,16	524	82	89
	2			6	10,2	482	92	92
	Promedio			6	10,18	503	83	95
2	1	18	245	6	10,30	479	75	96
	2			6	10,40	493	85	98
	Promedio			6	10,35	487	80	97
3	1	18,5	252	6	10,16	470	78	97
	2			6	10,28	466	83	88
	Promedio			6	10,22	469	81	92
4	1	19	258	8	10,24	476	75	79
	2			8	10,28	491	62	97
	Promedio			8	10,26	482	69	93

TEST 4

No. Jarra	Repetición	Dosis aplicada de coagulante (ml)	Concentración (ppm)	Índice de Willcomb	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
5	1	19,5	265	8	10,42	531	62	79
	2			8	10,30	545	69	92
	Promedio			8	10,36	538	66	86
6	1	20	272	6	10,38	516	85	82
	2			6	10,47	522	82	92
	Promedio			6	10,43	519	82	94

Test 5 – Adición de 4 ml de soda caustica

Fecha: 06-ago-2016

Condiciones Iniciales

No. Jarra	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
Blanco	6,98	617	132	123

Condiciones Finales**TEST 5**

No. Jarra	Repetición	Dosis aplicada de coagulante (ml)	Concentración (ppm)	Índice de Willcomb	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
1	1	17,5	238	8	11,08	466	55	51
	2			8	11,09	468	60	79
	Promedio			8	11,08	467	58	65
2	1	18	245	8	11,02	455	60	65
	2			8	11,19	508	49	58
	Promedio			8	11,11	482	55	62
3	1	18,5	252	8	11,09	452	49	63
	2			8	11,48	441	54	55
	Promedio			8	11,29	447	52	59
4	1	19	258	8	11,04	441	49	61
	2			8	11,27	488	64	76
	Promedio			8	11,16	460	57	69

TEST 5

No. Jarra	Repetición	Dosis aplicada de coagulante (ml)	Concentración (ppm)	Índice de Willcomb	pH del agua (Unidades)	Color del agua (455 nm PtCo)	Turbiedad (FAU)	SST del agua (mg/L)
5	1	19,5	265	8	10,91	497	49	66
	2			8	11,28	506	74	60
	Promedio			8	11,06	502	63	63
6	1	20	272	8	10,69	540	71	73
	2			8	10,64	536	72	72
	Promedio			8	10,66	538	72	73

6 Bibliografía

- Aguilar, M. (2002). Tratamiento físico-químico de aguas residuales. 1st ed. [Murcia]: Universidad de Murcia.
- Alvarado L. (2013). *Uso de las cáscaras de papa como coagulante natural en el tratamiento de aguas potables de la planta La Diana*. Tesis de especialización, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Duitama.
- Andía Cárdenas, Y. (2000). Tratamiento de Agua - Coagulación y Floculación. 1st ed. [ebook] Lima: SEDAPAL. Available at: http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154 [Accessed 12 Jan. 2017].
- Arboleda Valencia, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua*. 1st ed. Santa Fé de Bogotá: McGraw Hill.
- Aristizábal, J., Sánchez, T. and Mejía-Lorío, D.J. (2007). *Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca*. 1st ed. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Asrafuzzaman, M., Fakhruddin, A. and Hossain, M. (2011). *Reduction of Turbidity of Water Using Locally Available Natural Coagulants*. ISRN Microbiology, 2011, pp.1-6.
- Báez, L. O. (2010). *Determinación de la eficiencia de las características coagulantes y floculantes del Tropaeolum Tuberosum, en el tratamiento del agua cruda de la planta de Puengasí de la EPMAPS*. Quito, Ecuador.
- Beltrán-Heredia, J., Sánchez-Martín, J. and Dávila-Acedo, M. (2011). *Optimization of the synthesis of a new coagulant from a tannin extract*. Journal of Hazardous Materials, 186(2-3), pp.1704-1712.
- Beltrán-Heredia, J., Sánchez-Martín, J. and Gómez-Muñoz, M. (2010). *New coagulant agents from tannin extracts: Preliminary optimisation studies*. Chemical Engineering Journal, 162(3), pp.1019-1025.
- Bratby, J. (2006). *Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment*. 1st ed. London: IWA Publishing.

- Buitrago A, J. (1990). *La yuca en la alimentacion animal*. 1st ed. Cali: CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical).
- Campos, J. and Di Bernardo, L. (n.d.). *Uso de polimeros naturales en el tratamiento de agua para abastecimiento*. 1st ed. Cali: Cinara.
- Choy, S., Prasad, K., Wu, T. and Ramanan, R. (2015). *A review on common vegetables and legumes as promising plant-based natural coagulants in water clarification*. International Journal of Environmental Science and Technology, 12(1), pp.367-390.
- Choy, S., Prasad, K., Wu, T., Raghunandan, M. and Ramanan, R. (2014). *Utilization of plant-based natural coagulants as future alternatives towards sustainable water clarification*. Journal of Environmental Sciences, 26(11), pp.2178-2189.
- Cogollo Flórez, J. M. (2011). *Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: Caso del hidroxiclورو de aluminio*. Dyna, 18-27.
- Cooper, P. (2001). *Historical aspects of wastewater treatment*. In: P. Lens, G. Zeeman and G. Lettinga, ed., Decentralised Sanitation and Reuse, 1st ed. London: IWA, pp.11-36.
- Corpoamazonia, P. (2017). [online] Available at: http://www.corpoamazonia.gov.co/files/Protocolo_para_Toma_de_Muestras_de_Aguas_Residuales.pdf [Accessed 25 Jan. 2017].
- Diaz, A., Rincon, N., Escorihuela, A., Fernandez, N., Chacin, E. and Forster, C. (1999). *A preliminary evaluation of turbidity removal by natural coagulants indigenous to Venezuela*. Process Biochemistry, 35(3-4), pp.391-395.
- Guzmán, L., Taron, A. y Núñez, A. (2015). *Polvo de la semilla Cassia fistula como coagulante natural en el tratamiento de agua cruda*. Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial. Vol 13 No. 2 (123-129).
- Guzmán, L., Villabona, A., Tejada, C., & Garcia, R. (2013). *Reducción de la turbidez del agua usando coagulantes naturales*. U.D.C.A. Act & Div. Cient, 253-262.
- Hernández Muñoz, A. (2001). *Depuración y desinfección de aguas residuales*. 1st ed. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Kopytko M, Rueda E, y Rincón Y. (2014). *Application of Natural Product (Aloe Vera) in Coagulation-Flocculation Procedures, for Water Treatability Study*. Certified International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT), 3: 444-456, ISSN: 2319-5967.
- Lozano W. (2012). *Uso del extracto de Fique (furcraea sp.), como coadyuvante de coagulación en tratamiento de lixiviados*. Rev. Int. Contam. Ambie. 28 (3), 219-227.

- Manahan, S. (2007). *Introducción a la química ambiental*. 1st ed. Barcelona: Editorial Reverté.
- Martínez G., J. y González S., L.E. (2012). Evaluación del poder coagulante de la tuna (*Opuntia ficus indica*) para la remoción de turbidez y color en aguas crudas. Universidad de Cartagena
- Mazzeo M., M., Alzate G. y Marín M., M. (2008). Obtención de almidón a partir de residuos poscosecha del plátano dominico hartón (*Musa AAB Simmonds*). *Vector*, Vol. 3, 57-69.
- Metcalf & Eddy, INC. (1995). *Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización*. Madrid: McGraw Hill/Interamericana de España, S.A.
- Miller, S., Fugate, E., Craver, V., Smith, J. and Zimmerman, J. (2008). Toward Understanding the Efficacy and Mechanism of Opuntiaspp. as a Natural Coagulant for Potential Application in Water Treatment. *Environmental Science & Technology*, 42(12), pp.4274-4279.
- Noyola A., Morgan-Sagastume, J.M & Guereca L.P. (2013). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales. Guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ojeda Báez, L. F. (2012). Determinación de la eficiencia de las características coagulantes y floculantes del *Tropaeolum Tuberosum*, en el tratamiento del agua cruda de la planta de Puengasí de la EPMAPS. Quito, Ecuador.
- Oladoja, N. (2016). Advances in the quest for substitute for synthetic organic polyelectrolytes as coagulant aid in water and wastewater treatment operations. *Sustainable Chemistry and PHarmacy*, 3, pp.47-58.
- Ospina O, y Ramírez H. 2011. *Tratamiento casero alternativo de agua para consumo humano por medio de fitoquímicos* Escuela Colombiana de Ingeniería, 84: 7-17.
- Pérez, J.M. (s.f.). Estado del Arte – Coagulación. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y de Ciencias Ambientales (CEPIS).
- Ramalho, R., Jiménez Beltrán, D. and Lora, F. (1996). *Tratamiento de aguas residuales*. 1st ed. Barcelona: Reverté.
- Ramírez Arcila, H. and Jaramillo Peralta, J. (2015). Agentes Naturales como Alternativa para el Tratamiento del Agua. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 11(2), p.136.
- Ramírez L, Suárez J, y Quirama J. 2011. *Evaluación de las propiedades floculantes de Malvaviscus arboreus, Heliocarpus popayanensis e Hylocereus undatus para clarificación de aguas*. RIAA, 2(2): 33-42.

- RAS. (2000). Reglamento técnico de agua potable y saneamiento básico. RAS 2000. Título E. Tratamiento de Aguas residuales. Bogotá: Ministerio de Desarrollo Económico.
- Rigola Lapeña, M. (1999). Tratamiento de aguas industriales. 1st ed. México: Alfaomega.
- Rivas Mijares, G. (1978). Tratamiento de aguas residuales. 1st ed. Caracas: Vega.
- Rodríguez, J.P., Lugo, I.P., Rojas, A.V. and Malaver, C. (2007). Evaluación del proceso de coagulación para el diseño de una planta potabilizadora. Umbral Científico, 8-16.
- Salgar H., J.G. (2006). Naturaleza de los lodos producidos en el proceso de potabilización en la planta de Bosconia utilizando sulfato de aluminio líquido como coagulante. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander.
- Solís, R., Laines, J.R. and Hernández, J.R. (2012). Mezclas con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales. Revista internacional de contaminación ambiental, 28(3), 229-236.
- Soto A., V. (2010). Cuantificación de almidón total y de almidón resistente en harina de plátano verde (*Musa cavendishii*) y banana verde (*Musa paradisiaca*). Revista Boliviana de Química, Vol. 27, 94-99.
- Sperling, M. (2012). Introducción a la calidad del agua y al tratamiento de aguas residuales. 1st ed. San Juan de Pasto, Colombia: Universidad de Nariño.
- Trapote Jaume, A. (2013). Depuración y regeneración de aguas residuales urbanas. 1st ed. San Vicente del Raspeig: Publicaciones de la Universidad de Alicante.
- Trujillo, D., Duque, L.F., Arcila, J.S., Rincón, A., Pacheco, S. and Herrera, O.F. (2014). Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano. Revista ION, 17-34.
- UNEP, (2010). Sick Water? The central role of wastewater management in sustainable development. [online] Corcoran Emily. Available at: <http://www.citethisforme.com/es/cite/report> [Accessed 20 Dec. 2016].
- Villabona, A., Paz, I.C., Martínez, J. (2013). Caracterización de *Opuntia ficus-indica* para su uso como coagulante natural. Revista Colombiana de Biotecnología, 137-144.