

DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD ÓPTIMA DE COAGULANTE DE ORIGEN  
VEGETAL COMO COADYUVANTE EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN-  
FLOCULACIÓN PARA LA PLANTA DE TRATAMIENTOS DE AGUA POTABLE DE  
ECAAAS-ESP.

NICOLAS ANDRES SANTAMARIA ARENAS

1116869061

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURAS

PROGRAMA DE INGENEIRIA QUIMICA

2020

DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD ÓPTIMA DE COAGULANTE DE ORIGEN  
VEGETAL COMO COADYUVANTE EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN-  
FLOCULACIÓN PARA LA PLANTA DE TRATAMIENTOS DE AGUA POTABLE DE  
ECAAAS-ESP.

NICOLAS ANDRES SANTAMARIA ARENAS

1116869061

DIRECTOR: DR. JACIPT RAMON VALENCIA

TRABAJO PARA OBTENER EL TITULO DE INGENIERO QUIMICO

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURAS

PROGRAMA DE INGENEIRIA QUIMICA

2020

## CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS .....	9
LISTA DE ANEXOS .....	10
DEDICATORIA .....	11
AGRADECIMIENTOS .....	12
ABSTRACT.....	13
RESUMEN .....	14
INTRODUCCION.....	15
JUSTIFICACIÓN .....	19
1. MARCO REFERENCIAL.....	21
2. MARCO TEÓRICO.....	27
3. MARCO LEGAL .....	49
4. OBJETIVOS .....	52
4.1. <i>Objetivo General</i> .....	53
4.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	53
5. METODOLOGÍA.....	54
6. RESULTADOS Y ANALISIS .....	57
6.1. <i>CARACTERIZACIÓN A TRAVÉS DE LOS PARÁMETROS COLOR, TURBIEDAD Y PH DEL AGUA DEL RIO SATOCA, UBICADO EN EL MUNICIPIO DE SARAVERA, ARAUCA.</i> .....	57

6.2.	<i>DOSIS ÓPTIMA DEL COAGULANTE VEGETAL.....</i>	<i>61</i>
6.3.	<i>CONDICIONES ACTUALES DE LA PLANTA .....</i>	<i>75</i>
6.4.	<i>DISEÑO DE LA CÁMARA DE LA CÁMARA DE AQUIETAMIENTO .....</i>	<i>78</i>
6.5.	<i>MEZCLA RAPIDA – CANAL CON CAIDA TIPO ESCALON .....</i>	<i>80</i>
6.6.	<i>DISEÑO DEL FLOCULADOR DEL FLUJO HORIZONTAL .....</i>	<i>86</i>
	6.6.1 DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL ECUACION DE CAMP PARA EL DISEÑO DEL FLOCULADOR.,UTILIZANDO LOS DATOS DEHIDROXICLORURO DE ALUMINIO Y ALMIDÓN DE PLATANO COMO COADYUVANTE.....	86
	6.6.2 DISEÑO DEL PRIMER COMPARTIMIENTO DE FLOCULACIÓN. ....	89
	6.6.3 DISEÑO DEL SEGUNDO COMPARTIMIENTO DE FLOCULACIÓN ....	93
	6.6.4 DISEÑO DEL TERCER COMPARTIMIENTO DE FLOCULACIÓN .....	97
6.7.	<i>DISEÑO DE UN SEDIMENTADOR DE ALTA TASA .....</i>	<i>100</i>
6.8.	<i>DISEÑO DE FILTRO RAPIDO DE ARENA.....</i>	<i>105</i>
	6.8.1 NUMERO DE FILTROS.....	105
	6.8.2 CAUDAL UNITARIO .....	105
	6.8.3 ÁREA SUPERFICIAL .....	105
6.9.	<i>MODELAMIENTO DEL SULFATO DE ALUMINIO Y EL COADYUVANTE VEGETAL... </i>	<i>106</i>
	CONCLUSIONES.....	111

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	114
ANEXOS.....	116
RECOMENDACIONES.....	124

## LISTA DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACION 1. TREN DE FLOCULADORES Y SEDIMENTADORES.....	35
ILUSTRACION 2. IMAGEN DE SEDIMENTARES DE TIPO PANAL .....	36
ILUSTRACION 3. ESTRUCTURA DE LA SEDIMENTACION .....	40
ILUSTRACION 4. FILTROS DE LA PTAP DE ECAAAS ESP.....	42
ILUSTRACION 5. ACTIVIDADES DE MANTEINIMIENTO .....	43
ILUSTRACION 6. SISTEMA DE CLORACION.....	44
ILUSTRACION 7. SISTEMA DE DOSIACION DE OXIDO DE CALCIO.....	45
ILUSTRACION 8. VISTA AEREA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DE ECAAAS ESP .....	46
ILUSTRACION 9. SISTEMA DE CAPTACION- BOCOTOMA .....	47
ILUSTRACION 10. BOCATOMA DEL RIO SATOCA EN EL MUNICIPIO DE SARAVENA, ARAUCA.	47
ILUSTRACION 11. DIAGRAMA DE PROCESO DE ECAAAS-ESP .....	76
ILUSTRACION 12. VISTA SUPERIOR DE LA PTAP DE ECAAAS-ESP.....	77
ILUSTRACION 13. ENTRADA DEL AGUA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO, ECAAAS ESP .....	78
ILUSTRACION 14. MEZCLA RAPIDA- ECAAAS -ESP .....	78

## LISTA DE TABLAS

TABLA 1. RANGOS ESTABLECIDOS.....	51
TABLA 2. QUÍMICAS DE SUSTANCIAS QUE TIENEN RECONOCIDO EFECTO ADVERSO EN LA SALUD HUMANA.....	51
TABLA 3. QUÍMICAS QUE TIENEN IMPLICACIONES SOBRE LA SALUD HUMANA .....	51
TABLA 4. QUÍMICAS QUE TIENEN CONSECUENCIAS ECONÓMICAS E INDIRECTAS SOBRE LA SALUD HUMANA.....	52
TABLA 5. PARÁMETROS FÍSICOS DEL AGUA, DE ACUERDO A LA ESTACIÓN DEL AÑO. ....	58
TABLA 6. DOSIS OPTIMAS DE HIDROXICLORURO DE ALUMINIO Y ALMIDÓN DE PLÁTANO .....	62
TABLA 7. PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE COLOR, CON RELACIÓN AL HIDROXICLORURO DE ALUMINIO Y ALMIDÓN .....	63
TABLA 8. PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE TURBIEDAD, CON RELACIÓN AL HIDROXICLORURO DE ALUMINIO Y ALMIDÓN .....	65
TABLA 9. PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE PH, CON RELACIÓN AL HIDROXICLORURO DE ALUMINIO Y ALMIDÓN .....	65
TABLA 10. DOSIS OPTIMAS DE SULFATO DE ALUMINIO Y ALMIDÓN DE PLÁTANO .....	68
TABLA 11. PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE PH, CON RELACIÓN AL SULFATO DE ALUMINIO Y ALMIDÓN .....	69
TABLA 12. PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE COLOR, CON RELACIÓN AL SULFATO DE ALUMINIO Y ALMIDÓN .....	70

TABLA 13. PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE TURBIEDAD, CON RELACIÓN AL SULFATO DE ALUMINIO Y ALMIDÓN .....	71
TABLA 14. COCIENTE DE $T_{FINAL}/T_{INICIAL}$ TIEMPOS Y REVOLUCIONES DISTINTAS. ....	86
TABLA 15. GRADIENTE OPTIMO .....	87
TABLA 16. AJUSTE DE MÍNIMOS CUADRADOS. ....	87
TABLA 17. CUADRO DE CONVECCIONES.....	89
TABLA 18. DATOS DE INICIO PRIMER COMPARTIMIENTO DEL FLOCULADOR.....	89
TABLA 19 RESULTADOS DE DISEÑO DEL PRIMER COMPARTIMIENTO DEL FLOCULADOR.....	90
TABLA 20 DATOS DE DISEÑO DEL SEGUNDO COMPARTIMIENTO DEL FLOCULADOR. ....	93
TABLA 21. RESULTADOS DE DISEÑO DEL SEGUNDO COMPARTIMIENTO DEL FLOCULADOR....	94
TABLA 22. DATOS DE DISEÑO DEL TERCER COMPARTIMIENTO DEL FLOCULADOR.....	97
TABLA 23. RESULTADOS DE DISEÑO DEL TERCER COMPARTIMIENTO DEL FLOCULADOR. ....	97
TABLA 24. TURBIEDADES FRENTE A DISTINTOS TIEMPOS Y GRADIENTES DE VELOCIDAD ....	106
TABLA 25. AJUSTES DE KIS GRADIENTES DE VELOCIDAD .....	106
TABLA 26. AJUSTE DE MÍNIMOS CUADRADOS PARA LOS DATOS DE SULFATO DE ALUMINIO Y ALMIDÓN DE PLÁTANO.....	107
TABLA 27. DATOS DE INICIO PARA EL DISEÑO DEL PRIMER COMPARTIMIENTO.....	108
TABLA 28. RESULTADOS DE DISEÑO PARA EL PRIMER COMPARTIMIENTO .....	108
TABLA 29. DATOS DE INICIO PARA EL DISEÑO DEL SEGUNDO COMPARTIMIENTO .....	109
TABLA 30. RESULTADOS DE DISEÑO PARA EL SEGUNDO COMPARTIMIENTO .....	109
TABLA 31. DATOS DE INICIO PARA EL DISEÑO DEL TERCER COMPARTIMIENTO .....	109
TABLA 32. RESULTADOS DE DISEÑO PARA EL TERCER COMPARTIMIENTO .....	110

## LISTA DE FIGURAS

FIGURE 1. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA 2019 .....	59
FIGURE 2. DOSIS OPTIMA DEL ALMIDON HIDRO.....	62
FIGURE 3. PORCENTAJES DE REMOCIÓN DEL HIDRO, ALMIDÓN .....	66
FIGURE 4. DOSIS OPTIMA DEL ALMIDÓN CON SULFATO .....	68
FIGURE 5. PORCENTAJE DE REMOCION DEL SULFATO, ALMIDON.....	72
FIGURE 6. HIDROXICLORURO DE ALUMNIO .....	72
FIGURE 7. SULFATO DE ALUMINIO.....	73
FIGURE 8. COAGULANTE VEGETAL .....	75

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO. 1 HIDROXICLORURO DE ALUMINIO, SULFATO Y ALMIDÓN.....	116
ANEXO. 2 TEST DE JARRAS .....	116
ANEXO. 3 TURBIDIMETRO .....	117
ANEXO. 4 DOSIFICACION .....	117
ANEXO. 5 ADECUACION DEL TEST .....	118
ANEXO. 6 HIDROXICLORURO DE ALUMINIO – 40 % ALMIDÓN DE PLÁTANO.	118
ANEXO. 7 HIDROXICLORURO DE ALUMINIO, 50 % ALMIDÓN DE PLÁTANO...	119
ANEXO. 8 HIDROXICLORURO DE ALUMINIO, 60 % ALMIDÓN DE PLÁTANO...	119
ANEXO. 9 30 % HIDROXICLORURO DE ALUMINIO, 70 % ALMIDÓN DE PLÁTANO.....	120
ANEXO. 10 10 % HIDROXICLORURO DE ALUMINIO, 90 % ALMIDÓN DE PLÁTANO.....	120
ANEXO. 11 60 % SULFATO DE ALUMINIO, 30 % ALMIDÓN DE PLÁTANO.....	121
ANEXO. 12 50 % SULFATO DE ALUMINIO, 50 % ALMIDÓN DE PLÁTANO.....	121
ANEXO. 13 40 % SULFATO DE ALUMINIO, 60 % ALMIDÓN DE PLÁTANO.....	122
ANEXO. 14 30 % SULFATO DE ALUMINIO, 70 % ALMIDÓN DE PLÁTANO.....	122
ANEXO. 15 10 % SULFATO DE ALUMINIO, 90 % ALMIDÓN DE PLÁTANO.....	123

## **DEDICATORIA**

Cumplir objetivos en la vida, siempre genera grandes satisfacciones. Hoy logró culminar mi proyecto de grado, en donde dedico este triunfo a mi madre Laura, mi tía María y mi abuela Cruz Delina, quienes con amor y ejemplo me enseñaron que la educación es el mejor camino para lograr adquirir siempre grandes conocimientos.

## **AGRADECIMIENTOS**

Gracias a los profesores que durante la carrera me enseñaron lo gratificante que es aprender y hacer las cosas bien, a mi director por el apoyo que brindo a mi pasantía. A mis compañeros que estuvieron ahí cuando los necesite.

## ABSTRACT

This investigation consisted of characterizing the physicochemical parameters of color, turbidity and pH of the water from the Satocá river, located in the Saravena municipality, Arauca. In addition to this, a step was taken to analyze the efficiency of a vegetable coagulant, obtained from banana starch, to be used as an aid in the coagulation-flocculation process of a drinking water treatment plant (PTAP). This was carried out in the aforementioned municipality, in the company ECAAAS-ESP (community aqueduct, sewer and toilet company), for 4 months. This was divided into two parts, the first one was to extract the banana starch. The second was to perform the starch tests, which resulted in the use of this as an adjuvant achieving removal efficiencies of 95.65% and 96.92%, in color and turbidity respectively, this referring to Aluminum Hydroxychloride, in relation to aluminum sulfate, removal efficiencies of 99.23% in color and 90.49% in turbidity were obtained. It should be noted that the use of chemical coagulants is reduced by 20%, generating a positive impact on operating costs for the drinking water treatment plant, in addition to helping to reduce the environmental footprint left by the extraction of aluminum. Banana starch already as a coagulant achieves a removal of 55% in color and 55.13% in turbidity. Finally, the treatment plant was designed to meet the needs of banana starch, as an aid in the flocculation coagulation process, taking into account the design methodology established by ras 2017.

## RESUMEN

Esta investigación consistió en la caracterización de los parámetros fisicoquímicos de color, turbiedad y pH, del agua proveniente del río Satocá, ubicado en el municipio de Saravena, Arauca. Además de esto, se dio paso a analizar la eficiencia de un coagulante vegetal, obtenido a partir del almidón de plátano, para utilizarlo como coadyuvante en el proceso de coagulación-floculación de una planta de tratamiento de agua potable (PTAP). Esto se llevó a cabo en el municipio ya mencionado, en la empresa ECAAAS-ESP (empresa comunitaria acueducto, alcantarillado y aseo), durante 4 meses. Esto se dividió en tres partes, la primera consistió en extraer el almidón de plátano, esta se realizó obteniendo la pulpa y exponiéndola a un secado y tamizado. La segunda, fue realizar las pruebas al almidón, analizando color, turbiedad y pH al agua luego de la floculación, estos dieron como resultado, que la utilización de este como coadyuvante logra eficiencias en la remoción del 95,65 % y del 96,92 %, en el color y la turbiedad respectivamente, esto referente al Hidroxicloruro de aluminio, con relación al sulfato de aluminio se obtuvieron eficiencias en la remoción del 99,23 % en el color y 90,49 % en la turbiedad. Cabe resaltar que se logra disminuir la utilización de coagulantes de tipo químico en un 20 %, generando un impacto positivo en costos de operación para la planta de tratamiento de agua potable, además de ayudar a disminuir la huella ambiental dejada por la extracción del aluminio. El almidón de plátano ya como coagulante logra una remoción del 55% en el color y 55,13 % en la turbiedad. Por último, se realizó el diseño de la planta de tratamiento que se ajustara a las necesidades del

almidón de plátano, como coadyuvante en el proceso de coagulación floculación, teniendo en cuenta la metodología de diseño que establece el ras 2017.

## **INTRODUCCION**

El cólera es una enfermedad que se ha relacionado con el consumo de agua de baja calidad. La procuraduría general de la nación, en el 2002, publico un artículo. En el expone la siguiente problemática: la planta de tratamiento de agua potable ( PTAP) implícita en el desarrollo social de una comunidad, se enfoca en la calidad de agua distribuida a la zona urbana, sin tener en cuenta la calidad del agua suministrada a la población ubicada en la zona rural, afectando así, la salud de las personas que no se ven beneficiadas con el tratamiento de agua, al no contar con una red de suministro propia, la comunidad (zona rural) debe abastecerse directamente en la fuente (ríos, lagunas, aguas subterráneas), generando afecciones a la salud. Como es el caso de enfermedades de tipo diarreicas. La diarrea es un síntoma de infecciones ocasionadas por muy diversos organismos bacterianos, virales y parásitos, la mayoría de los cuales se transmiten por agua con contaminación fecal. La infección es más común cuando hay escasez de agua limpia para beber, cocinar y lavar. Las dos causas más frecuentes de enfermedades diarreicas son los rotavirus y la bacteria *Escherichia coli*.

La caracterización de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, relacionados con la calidad del agua, son de gran utilidad para suministrar un buen servicio del líquido preciado

(agua) a la comunidad, ya que, a través de estos, se establece un tratamiento óptimo y eficaz a la fuente analizada. Estas caracterizaciones no son llevadas a cabo en regiones de difícil acceso como el campo colombiano, por ello las personas no cuentan con el conocimiento técnico para un previo tratamiento al agua antes de su consumo, al no tener claro una ruta para la purificación del agua, las personas están expuestas a afecciones relacionadas con las bacterias que producen enfermedades como el cólera, afectando con más frecuencia los niños, ya que son ellos los más vulnerables a las enfermedades diarreicas, debido a su bajo nivel de anticuerpos para combatir estas bacilos. A su vez, cada episodio de diarrea empeora su estado nutricional, en la mayoría de países en vías de desarrollo los niños cuentan con un nivel nutricional muy precario. La diarrea es la segunda mayor causa mundial de malnutrición en niños menores de cinco años. Otro factor desencadenante de enfermedades, es el exceso de agentes químicos, en los procesos relacionados al tratamiento de aguas, al no usar las cantidades óptimas, establecidas previamente por medio del test de jarras. Las cantidades residuales de los compuestos sintéticos pueden afectar la salud de los consumidores, estos rangos los establece la resolución 2115 del 2007 del estado Colombia.

Arauca es un departamento mayoritariamente agrícola y ganadero, por ende, la población tiene la necesidad de desplazarse hacia el campo en busca de mejores oportunidades laborales. El agua en estas zonas no cuenta con las condiciones fisicoquímicas y microbiológicas aptas para el consumo humano, por lo cual es necesario la tecnificación de plantas portátiles, que utilicen bases naturales para su tratamiento. Esta iniciativa tiene como finalidad demostrar la importancia de los recursos naturales con los que cuenta Colombia, el

plátano más conocido como musaparadisica pertenece a la familia de las plantas herbáceas, esta se desarrolla en climas tropicales. Colombia es un país mayoritariamente tropical, por ende, el clima y la tierra son idónea para el cultivo del plátano, el municipio de Saravena, Arauca, cuenta con grandes cultivos de este fruto. Estudios previos demuestran que este es un gran agente coagulante para procesos de floculación-coagulación, en el tratamiento de agua potable. Los avances de estos estudios tienen como finalidad la utilización de agentes coagulantes de origen natural como coadyuvante en la coagulación-floculación y así disminuir la huella ambiental dejada por la obtención de los agentes coagulantes químicos utilizados tradicionalmente en el tratamiento de aguas. Saravena se encuentra en un lugar con vías de difícil acceso al resto del país, por ello el transporte genera costos excesivos en los productos de abastecimiento, a esto se suma la violencia que prevalece en la región, lo cual genera zozobra para las personas ajenas al municipio, estos factores sin duda incrementan el precio de la materia prima, utilizada en el tratamiento de agua, afectando directamente el costo del servicio.

Por todo esto, el desarrollo de nuevas tecnologías en el tratamiento de aguas es necesario en la región. La PTAP de ECAAAS-ESP ubicada en Saravena genera un impacto positivo a la sociedad y a la economía, por años la empresa ha brindado el servicio de agua potable a toda la comunidad saravenence, cumpliendo a cabalidad con lo establecido en la resolución 2115 del 2007, la cual establece los máximos rangos permisibles físico-químicos y microbiológicos a los cuales puede ser sometida el agua luego de ser tratada. ECAAAS-ESP actualmente genera más de 140 empleos directos en el municipio, logrando la activación de la economía en la región. otro factor que se puede ver beneficiado en estos estudios es el

agro, ya que los agricultores de la región se ven constantemente afectados por la caída de los precios de sus cultivos, esta iniciativa aumentaría la demanda de plátano para fines industriales, con ello acrecentaría la demanda del cultivo y se mitigaría la problemática de los bajos precios de venta del producto agrícola.

## JUSTIFICACIÓN

La utilización de agentes coagulantes de origen químico acarrear problemas ambientales, ya que estos son derivados del aluminio y este se extrae mayormente de rocas como la bauxita, la extracción de esta roca genera deforestación alrededor del lugar, relacionado a la zona de explotación; además de generar excesivos gastos energéticos e hídricos. Por el contrario, los coagulantes vegetales generan un impacto positivo a nivel ambiental, debido a que su extracción no requiere técnicas energéticas exageradas que aumenten el depósito de CO<sub>2</sub> en la atmósfera.

El crecimiento de la población del municipio de Saravena-Arauca, conlleva a un aumento en el consumo y gasto del líquido preciado (agua), ocasionando que la empresa ECAAS-ESP, la cual es la encargada del tratamiento de agua potable, tenga que hacer un uso mayor en el consumo de químicos para el tratamiento de la misma, Utilizando productos como el hidroxiclورو de aluminio, el cual es utilizado como agente coagulante en la planta de tratamiento de agua potable de la empresa encargada del servicio, este coagulante tiene un costo económico considerablemente elevado, según estudios económicos realizados a la empresa en el 2017 se consumió un total de 67.962 kg de hidroxiclورو de aluminio, esta cantidad de agente coagulante generó un costo económico para la empresa de \$ 122.331.600 pesos. A esto se suma el uso de coagulantes como sales de hierro, aluminio y compuestos sintéticos puede ocasionar cambios en el pH del agua, debido a que estos aportan iones encargados de acidificar el medio.

Algunos tipos de sustancias residuales ( $\text{Al}^+$ ) depositadas en los lodos, producto de la coagulación de no son biodegradables; Loreto Sua en el 2002 menciona, que una de las causas de la enfermedad de alzheimer está relacionada con el agua tratada, debido a que esta puede contener residuos de aluminio, Perl DP en 1985 demuestra la existencia de aluminio a nivel celular en personas que padecieron esta enfermedad y enmarca la relación de aluminio con la mencionada neuropatología. De acuerdo a esta problemática, es necesario buscar alternativas que puedan sustituir total o parcialmente las sales de hierro, aluminio y algunos polímeros orgánicos sintéticos. En cumplimiento de la resolución 2115 del 2007 para la utilización de coagulantes químicos en el proceso de coagulación-floculación, las dosis óptimas alcanzadas establece los valores de color y turbiedad están dentro de los rangos permisibles. Para poder alcanzar los rangos de pH que establece la ley, es necesario la utilización de agentes estabilizantes, los cuales genera gastos operativos, debido al exceso consumo de óxido de calcio necesario como agente neutralizador de pH. Sin duda, estos procesos requieren la intervención de nuevas técnicas, por esto, se ha demostrado que los coadyuvantes naturales son muy buenos coagulantes, según Carrasquero en el 2017, estos logran la remoción del 99,6 % en la turbiedad, esta base teórica hace invertir esfuerzos en la innovación de recursos naturales para el tratamiento de aguas, en el mismo estudio se demuestra como la utilización de estos coadyuvantes disminuyen la cantidad necesaria del óxido de calcio en el proceso de estabilización, la resolución 2115 del 2007 no restringe el uso de agentes coagulantes de origen químico, la única exigencia que hace la ley es el cumplimiento de los rangos en los parámetros fisicoquímicos.

## 1. MARCO REFERENCIAL

Según Revelo, Proaño y Banchón (2015), en su artículo “Biocoagulación de aguas residuales de industria textilera mediante extractos de *Caesalpinia spinosa*”, propone el uso de *Caesalpinia spinosa* comúnmente conocida como guarango o tara, en el tratamiento de aguas residuales textiles, las muestras de agua para el tratamiento fueron tomadas de del río Pelileo, Tungurahua Ecuador, para la obtención del biocoagulante se usó el método de pulverización de la tara y preparación concentrada de esta, la coagulación-floculación se realizó mediante el equipo de Flocumetric (Selecta-España), durante el proceso se utilizaron dos velocidades de agitación de 200 y 40 rpm en intervalos de 3, 5, 15 y 20 minutos; de igual modo se usaron las concentraciones de 9.0, 5.7, 23.3, 18.0, 11.4 y 45.0 g/L. Se concluyó que la efectividad de remoción de turbidez oscila entre 24-52%, con la concentración de 45.0 g/L siendo esta la más eficiente, en cuanto al tiempo se determinó que el mejor tiempo de agitación es el de 15 minutos en el equipo correspondiente.

Según Kumar, et al (2015), en su artículo “Coagulation performance evaluation of natural and synthetic coagulants in waster water treatment”, propone el uso de la *Caesalpinia spinosa* (tara), *aloe chinensis* (aloe vera-penca sábila) y *Carica papaya* (papaya) para el tratamiento de aguas turbias, la muestras de agua están preparadas con arcilla común en un laboratorio teniendo las turbidez de 80-90-100 NTU, las pruebas se realizaron mediante la preparación de una solución concentrada de 500 mg de cada coagulante-floculante natural en un litro de agua para poder diluirla, a una velocidad rápida de 80 rpm durante 5 minutos para luego aplicar una velocidad lenta de 40 rpm durante 25 minutos, los resultados fueron

favorables logrando una reducción de la turbidez en un 65.25% en el caso de la tara, un 50% en el caso de la penca sábila y 45.80% en el caso de la papaya, tomando como turbidez inicial 100 NTU llegando a la conclusión que el coagulante vegetal tara y aloe vera son los más eficientes en el tratamiento de aguas con turbidez moderada, las cuales pueden recibir tratamientos secundarias en cuanto a filtración y desinfección si se quisiera consumir.

Según Ramírez y Jaramillo (2015), en su artículo “Agentes naturales como alternativa para el tratamiento del agua”, propone el uso de diversos coagulantes de origen vegetal para el tratamiento de clarificación del agua, teniendo como objetivo realizar el análisis de información existente referente a este tipo de coagulantes de origen natural, evaluando la eficacia y mecanismos que se pueden emplear para remover la turbidez de aguas, mediante la prueba de jarras se pudo determinar la eficacia de estas especies, que en su mayoría se tomaron en cuenta parámetros como la velocidad de agitación entre 100 y 200 rpm, el tiempo de contacto usando de 15-20-30 minutos; entre las principales coagulantes estudiados se encuentran, Moringa Oleífera, aloe vera, cactus, almidones y taninos, llegando a concluir que el uso de materiales naturales minimizaría el impacto de coagulantes químicos, minimizando los costos de tratamiento de aguas, si se dispone de estos a nivel local, en general el coagulante vegetal Moringa Oleífera y el cactus son los que arroja los mejores resultados de efectividad de hasta el 95 % de remoción de turbidez.

Según Contreras, et al (2015), en su artículo “El Nopal (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural complementario en la clarificación del agua”, propone el uso del nopal como coagulante natural, comúnmente llamado tuna, teniendo como objetivo principal medir la eficacia del mucilago extraído del nopal para usarlo como complementario del sulfato de

aluminio en el proceso de tratamiento para clarificar el agua del Río Magdalena en Sucre, mediante la prueba de jarras se realizó la clarificación, aplicando dos concentraciones de 35 y 40 mg/L a velocidades de 100 y 200 rpm aplicando dos tiempos de agitación de 20 y 30 minutos, teniendo en cuenta el pH, la porción y concentración del coagulante y la velocidad a la que se agitará la muestra; de este modo se determinó una eficiencia superior al 50%, siendo las concentraciones más efectivas 96 – 98% de coagulante nopal, este a su vez no afectó el pH de manera significativa, manteniendo las características iniciales de este, obteniendo como conclusión la alta efectividad del coagulante de nopal, reduciendo altamente la coloración y turbidez del agua, llegando a un aproximado de 80% de efectividad.

Según Olivero, et al (2014), en su artículo “Utilización de Tuna (*opuntia ficusindica*) como coagulante natural en la clarificación de aguas crudas”, propone en uso de la mucilago de tuna para la clarificación del agua del río Magdalena en Magangué – Colombia, teniendo como objetivo comprobar la efectividad del producto natural, comparándolo con el coagulante comercial sulfato de aluminio; se extrajo el mucílago de la tuna mediante la trituración de su corteza, llevándola luego a un secado al vacío a 70°C, para finalmente agregarle alcohol etílico con el propósito de extraer los pigmentos, los cuales se evaporaron y concentraron en un horno eléctrico obteniendo el polvo final. Se probaron dos tipos de concentraciones del producto vegetal, 35 y 40 mg/L a velocidades de 100 y 200 rpm, teniendo como tiempo de contacto de 15, 20 y 40 minutos. Se llegó a la conclusión de que a velocidades de 200 rpm se denota mayor efectividad en ambos coagulantes tanto el comercial como el vegetal, siendo un 83.66% la efectividad del mucílago de tuna, denotando alta competitividad contra el sulfato de aluminio. Según López, et al (2014), en su artículo

“Evaluación de almidones de malanga (*Colocasia esculenta*) como agente coadyuvante en la remoción de turbiedad en proceso de potabilización de agua”, pretende evaluar la eficacia de las mezclas de almidón de malanga con sulfato de aluminio para remover la turbiedad, para la extracción del almidón se molieron 30 kg de fruto en una licuadora hasta su completa pulverización, para luego mezclar con agua a 40 °C obteniendo hasta tres veces su volumen, para luego centrifugar y filtrar y dejar reposar por 48 horas, el sobrenadante se retiró y dejó secar en una estufa a 50°C por 24 horas, la demostración de su efectividad se realizó mediante la prueba de jarras en agua controlando la turbidez, probándola en 50-60-70-80- 90-100 NTU, en donde se obtuvieron resultados favorables y significativos al mezclar el sulfato de aluminio con el almidón de malanga para remover la turbidez del agua.

Según Ramírez y Jaramillo (2014), en su artículo “Uso potencial de agentes clarificantes y desinfectantes de origen de origen natural para el tratamiento integral del agua caracterizado por pisos térmicos”, pretende aportar un método para que las poblaciones puedan tener conocimientos y hacer uso de sus recursos, creando un compuesto natural vinculando dos agentes coagulantes - desinfectantes que ofrezcan una solución integral para las comunidades. Mediante el método de jarras se determinó la efectividad del aloe vera, tuna y las semillas de frejoles, haba, maíz, maracuyá, papa y durazno, siendo estos los más destacados, estas semillas fueron secadas, molidas, tamizadas, para luego agregarles agua destilada como disolvente; para ello se tuvo en cuenta el pH, color y turbidez para determinar las dosis óptimas de aplicación del coagulante, recolectando agua del río Combeima (Ibagué, Tolima) para la aplicación de coagulantes vegetales, usando de 40 mg/L a una velocidad de

200 rpm, se obtuvo como resultados previos la alta eficacia como coagulante a las semillas de frejol, de maíz y de maracuyá, y a su vez se obtuvo gran eficacia en el uso de vegetales como aloe vera y tuna.

Según Guzmán, et al (2013), en su artículo “Reducción de la turbidez del agua usando coagulantes naturales: una revisión”, se estudió la eficacia de algunos coagulantes vegetales, mediante revisiones bibliográficas de estudios anteriores, se analizó como principales coagulantes el cactus del genero *Opuntia* (familia *Cactaceae*) comúnmente conocido como tuna, aloe vera conocida comúnmente como penca sábila, semillas de roble turco (*Q. Cerris*), *Moringa Oleífera* conocida comúnmente como jacinto, los cuales demostraron tener alta eficiencia en cuanto al tratamiento de aguas con alta turbidez, se realizaron pruebas controladas mediante el método de jarras para cada uno de los estudios realizados que determinaron la efectividad de estos coagulantes, usando velocidades de 250 rpm a 30 minutos de agitación en dosis de 50 ml/L; de este modo se llegó a la conclusión de que el uso de estos coagulantes vegetales economiza el costo de tratamiento en un 25-30%, reduciendo la dosis del coagulante químico a usar en el caso de tratamientos para potabilizar agua usada para consumo y brindando lodos biodegradables libres de agentes químico, los cuales pueden ser usados como abono.

Según Anyela Patricia Másmela rozo, 2017 Al comparar las eficiencias de los almidones de yuca y plátano, con respecto a la eficiencia del hidroxiclورو 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 % por encima.

## 2. MARCO TEÓRICO

Los agentes coagulantes utilizados tradicionalmente son de tipo químico y su utilización es bastante arraigada a los procesos de potabilización de aguas, estos agentes representan riesgos para la salud, ya que se ha demostrado por estudios realizados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en donde menciona que aplicando 0,1 mg/L hidroxocloruro de aluminio residual genera un alto potencial de desarrollar la enfermedad del Alzheimer, el cual es un trastorno progresivo en donde se deterioran las células nerviosas del cerebro, causando demencia, disminución en las habilidades de pensamiento y comportamiento. El aluminio no es un mineral que se encuentra puro en el medio, sino que está presente en otros minerales o rocas compuestas como algunas arcillas, caolines o feldespatos. La bauxita es la roca de donde se extrae más aluminio (20/30% en masa), puesto que está compuesta por óxidos hidratados de aluminio. El proceso de extracción de la bauxita es por minería a cielo abierto y son diversos los procesos que se aplican para conseguir el aluminio licuado, que es con el que obtendremos el aluminio como materia delgada. Durante estos procesos, la bauxita se disuelve con hidróxido de sodio (proceso Bayer) y finalmente se separan los elementos por electrólisis.

Actualmente, las minas de bauxita se sitúan a nivel mundial en países como Guinea, Brasil, Jamaica y Australia, en donde se desarrolla mayoritariamente climas tropicales y subtropicales que favorece la extracción de este mineral. Se calcula que, para conseguir una tonelada de aluminio, se necesita procesar unas cuatro toneladas de bauxita. Esto permite la

emisión de residuos tóxicos, entre ellos el barro cáustico, que contamina gravemente el medio ambiente.

La contaminación que genera la industria del aluminio es preocupante, porque vierte a la atmosfera millones de toneladas al año de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono, y gases que están presentes también en la lluvia ácida como el óxido de azufre y el óxido de nitrógeno. Además, el proceso de transformación de la bauxita en aluminio requiere de grandes cantidades de energía y agua. Además de esto, esta actividad es causa indirecta de la deforestación de la zona cercana a la mina, puesto que una vez se han creado caminos de acceso a la mina en el espacio natural, normalmente otras industrias aprovechan este acceso como la industria carpintera, productores de carbón y otras actividades que contribuyen a la deforestación de zonas boscosas o selváticas; como ejemplo tenemos las minas de bauxita en Jamaica, donde según indica el medio digital el Polvorín en el 2007, serían responsables indirectos de la deforestación que ha traído al deterioro de más de un tercio de las cuencas jamaicanas, secando diversidad de acuíferos y produciendo restricciones severas de agua en pueblos y ciudades en los últimos años.

Los agentes coagulantes de origen vegetal fueron utilizados muchos antes que los coagulantes de origen químico, esto lo demuestran diversos estudios etnográficos realizados por la OMS (2006) a culturas nativas en diversas partes del mundo, en estos informes demuestra como las culturas siguen realizando el tratamiento de sus aguas, utilizando biocuagulantes que se encuentran de forma natural en su entorno, como es el caso de la cultura Wayuu situada en la guajira, Colombia, la cual utiliza Yosú (*Stenocereus griseus*), esta planta autóctona de la región es considerada un potencial agente coagulante de origen

vegetal, ya que logra la remoción de altas cantidades de sólidos contenidos en el agua. Diversos estudios de los biocoagulantes han demostrado la viabilidad del uso de agentes coagulantes de origen vegetal. Según Revelo, Proaño y Banchón (2015), en su artículo “Biocoagulación de aguas residuales de industria textilera mediante extractos de *Caesalpinia spinosa*”, propone el uso de *Caesalpinia spinosa* comúnmente conocida como guarango o tara, en el tratamiento de aguas residuales textiles, las muestras de agua para el tratamiento fueron tomadas de del río Pelileo, Tungurahua-Ecuador, para la obtención del biocoagulante se usó el método de pulverización de la tara y preparación concentrada de esta, la coagulación-floculación se realizó mediante el equipo de Flocumetric (Selecta-España); Se concluyó que la efectividad de remoción de turbidez oscila entre 24-52%, con la concentración de 45.0 g/L siendo esta la más eficiente, en cuanto al tiempo se determinó que el mejor tiempo de agitación es el de 15 minutos en el equipo correspondiente.

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).

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)

Suspensiones coloidales son partecules mayoritariamente compuestas por color y turbiedad, se encuentran suspendidas en el agua en forma de coloides estables. 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).

Las plantas de tratamiento de agua potable de tipo convencional cuentan con los siguientes procesos: pretratamiento, coagulación-floculación, sedimentación, desinfección.

**Desarenador.** Es una estructura hidráulica que tiene como función remover las partículas de cierto tamaño que la captación de una fuente superficial permite pasar.

Cuenta con dos trenes en paralelo de desarenación, cada uno con dos pozos, a este componente le llega las dos tuberías de PVC en 12” provenientes de la bocatoma, cada una suministra agua a cada tren del desarenador, esta estructura cuenta con un vertedero de excesos y lavado, los cuales conducen el agua mediante tubería de gress de 10” al río Satocà, al igual que se cuenta con un sistema de Bypass. El caudal de entrada enfrenta una pantalla deflectora antes de entrar al cuerpo del desarenador. Cuatro canaletas laterales, adosadas a los muros longitudinales recogen el agua desarenada y la entregan a un canal de salida a través de un tubo de 6”. El canal, a su vez entrega a la estructura de salida mediante unos vertederos; su capacidad es de 133,26 Litros por segundo

### **INSPECCIÓN PRELIMINAR**

1. Verificar los niveles de agua en cada uno de los dos módulos.
2. Comprobar el estado y funcionamiento de las válvulas de entrada, salida y by-pass del tanque desarenador.
3. Inspeccionar la estructura del tanque desarenador para detectar posibles fugas y/o daños.
4. Verificar el estado y funcionamiento de los reboses del tanque desarenador.

### **OPERACION DIARIA**

1. Verificar el nivel de agua cada uno de los módulos del tanque desarenador, asegurándose que estén en igualdad de nivel y que este sea el requerido en la planta de tratamiento de agua.
2. Comprobar que no haya descompensación de agua en el tanque.
3. Verificar el funcionamiento de las válvulas.
4. Manipular las válvulas de entrada y salida, según se requiera en caso de descompensación.
5. Retirar material (hojas, palos, etc), que haya logrado pasar de las rejillas en la bocatomá.
6. Revisar si existe presencia de fugas, filtraciones o daños en las válvulas y la estructura del tanque.

7. Reportar al coordinador de plata todas las novedades o anomalías presentes en el sistema de aducción para que se realizase la respectiva reparación

8. Verificar el estado de los reboses del tanque desarenador.

9. Realizar orden y aseo al área.

**Coagulación.** Una vez adicionados los coagulantes y auxiliares de la coagulación deben dispersarse rápida y homogéneamente en el cuerpo de agua, para lo cual deben emplearse las unidades de mezcla rápida. Estos equipos pueden ser hidráulicos o mecánicos. Entre las unidades hidráulicas de mezcla rápida que pueden usarse se encuentran el resalto hidráulico, los vertederos, los mezcladores estáticos y los difusores; entre las unidades mecánicas de mezcla rápida que pueden emplearse se encuentran los mezcladores mecánicos. Para los niveles de complejidad de sistema bajo y medio, no se recomienda el empleo de mezcladores mecánicos sino hidráulicos. Para garantizar la eficiencia del proceso de coagulación, debe vigilarse la correcta operación de los procesos de dosificación y mezcla rápida. Para garantizar que la coagulación - floculación esté realizándose correctamente, deben verificarse los siguientes parámetros:

- La eficiencia de remoción de la turbiedad en el agua decantada o filtrada, si se trata de un tratamiento por filtración directa.

- La eficiencia de remoción del color en el agua decantada o filtrada, o del carbono orgánico total (COT).

- La concentración residual de Al (+++) o Fe (+++) del agua filtrada o efluente de la planta, la cual debe cumplir con los valores máximos aceptables establecidos en el artículo 7° de la Resolución 2115 de 2007, o la norma que la modifique o reemplace. De la eficiencia de este proceso dependen los rendimientos de todos los tratamientos posteriores al agua, como la sedimentación, la filtración y la desinfección.

**Floculación.** es donde se va dar origen al floc, el cual es la aglomeración de sólidos orgánicos e inorgánicos suspendidos en el agua, por medio de un movimiento helicoidal realizado por el flujo de agua. Existen floculadores de tipo hidráulico y mecánico.

**Floculadores hidráulicos.** Los floculadores hidráulicos utilizan el cambio de dirección de flujo del agua, inducido por diferentes mecanismos, para producir la turbulencia necesaria para promover la formación del floc y derivan su energía de la carga de velocidad que el líquido adquiere en su tránsito por un conducto. Entre los floculadores hidráulicos que pueden ser implementados están los de:

- a. Flujo horizontal.
- b. Flujo vertical.
- c. El floculador Alabama.
- d. Flujo helicoidal.
- e. El floculador de lechos porosos.

**Floculadores mecánicos.** Los floculadores mecánicos son aquellos que requieren de un equipo electromecánico para mover un agitador de paletas o álabes. En el nivel de

complejidad del sistema Bajo, se deben evitar en lo posible este tipo de floculadores.

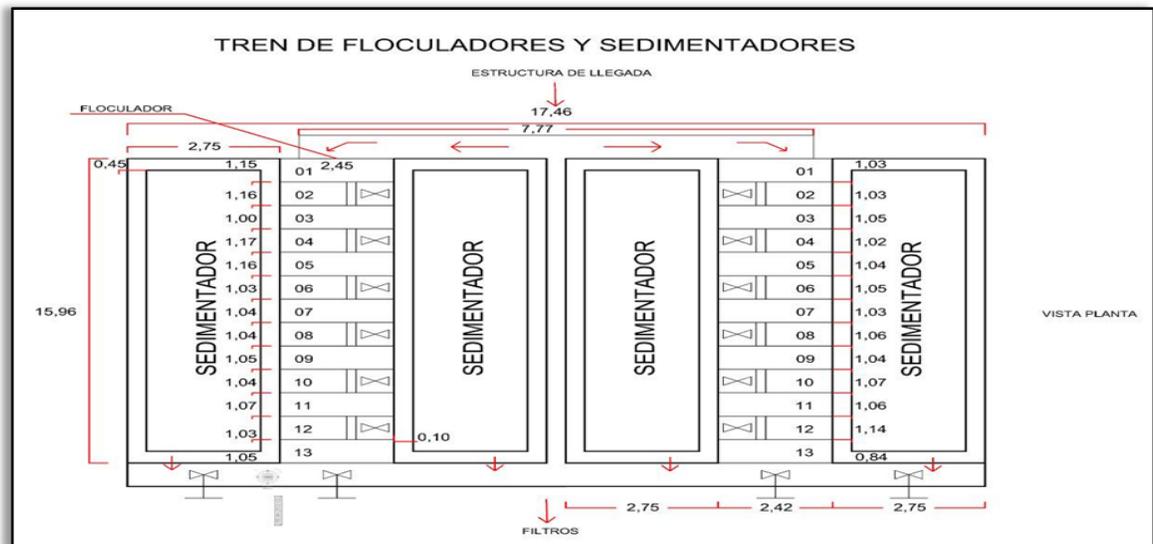
Clasificados como floculadores mecánicos están:

a. Giratorios, en donde la agitación se produce por el giro de paletas alrededor de un eje horizontal o vertical.

b. De turbina, en donde la agitación se produce mediante grupos de álabes o turbinas dispuestos a lo largo de un eje horizontal que se instalan en tanques alargados y pueden comunicar un movimiento de rotación a la masa de agua a diferentes velocidades.

c. Recíprocantes, en donde la agitación se produce por desplazamiento vertical hacia arriba y abajo de unas parrillas dentro del agua.

S



ilustracion 1. Tren de Floculadores y Sedimentadores



Ilustracion 2. Imagen de Sedimentares de Tipo Panal

## **OPERACIÓN**

1. Revisar el estado de los compartimientos de cada tren de floculadores, verificando el estado y funcionalidad de las válvulas.
2. Informar al coordinador de PTAP, si existen daños en la estructura o cualquier anomalía presentada.

## **OPERACIÓN DIARIA**

1. Verificar la aplicación del coagulante en el sistema de mezcla rápida (resalto hidráulico).
2. Mantener el caudal requerido según el consumo diario de la población, garantizando, el adecuado desarrollo el proceso de floculación.
3. Revisar la formación del floc y verificar que la dosis aplicada sea la correcta.
4. Verificar que el tiempo de contacto y el movimiento del agua en la unidad de mezcla lenta, sea suficiente e idónea para la formación de los flóculos; garantizando buen tamaño y peso adecuado.

### **Problemas eventuales**

Cuando existe una mala formación del floc o falta de peso se debe tener en cuenta:

1. La inspección visual del agua floculada con el fin de identificar el tamaño del floc.
2. Inadecuada determinación de la dosis, puede presentar exceso de dosis o dosis menor a la requerida.
3. Debido al diseño, se presenta una diferencia de caudal entre el módulo 1 y el módulo 2; por tanto, se presenta floculación tardía en el módulo 2.
4. Daños en las redes de conducción y redes principales de distribución, causando cambios bruscos de caudal para mantener el nivel de reserva en el tanque de distribución.

5. Las altas y bajas temperaturas, producen rompimiento del floc formado. (ver efectos de temp en floculación).

6. La suspensión de uno de los módulos de la PTAP, aumenta la velocidad del agua, alterando la formación del floc.

## **MONITOREO**

El operador de la PTAP debe verificar:

1. Los floculadores están operando bajo el caudal requerido.
2. Informar al coordinador de PTAP, daños en la unidad o anomalías presentadas.

## **ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO**

La unidad, se debe lavar y desinfectar cada 15 días, efectuando el lavado de un módulo por día (jueves y viernes) y/o cuando sea necesario; se deben tener en cuenta las condiciones climáticas (aguas con altas turbiedades), ya que pueden afectar la operatividad de la planta.

**Sedimentación.** El proceso de sedimentación debe realizarse siempre que se tiene que producir coagulación de barrido o por adsorción, para poder remover la turbiedad. En otros casos es opcional de acuerdo con los ensayos de laboratorio o planta piloto. Las unidades de sedimentación deben constar de:

- a. zona de entrada,
- b. zona de sedimentación,

c. zona de salida y

d. zona de recolección de lodos. Los sedimentadores que pueden emplearse son el de flujo horizontal y flujo vertical. También puede realizarse la sedimentación en unidades con manto de lodos, los que a su vez se dividen en sedimentadores de manto de lodos de suspensión hidráulica y sedimentadores de manto de lodos de suspensión mecánica. Puede además emplearse los sedimentadores de alta tasa.

Para niveles de complejidad bajo y medio se recomienda el empleo del sedimentador de flujo horizontal o de alta tasa. En estos niveles no se aceptan en ningún caso los sedimentadores de manto de lodos, de suspensión mecánica o hidráulica. Sin importar el nivel de complejidad todas las unidades sedimentadoras deben tener por lo menos 2 módulos. El agua sedimentada puede recolectarse mediante un sistema de tubos perforados sumergidos, canaletas o vertederos de rebose, organizados de modo que garanticen un caudal uniforme a lo largo de estos. La proporción de desborde del flujo sobre el vertedero debe ser de 6 a 12 m<sup>3</sup>/h por metro lineal. Los valores más bajos dentro de este rango hacen que el vertedero sea más eficiente. El nivel máximo del agua en el interior de la canaleta debe estar

a una distancia mínima de 5 cm abajo del borde libre de la canaleta. No deben emplearse canaletas lisas, todas deben ser dentadas o con orificio.



Ilustración 3. Estructura de la Sedimentación

### **Monitoreo**

El operador de la planta debe:

1. Realizar una inspección visual sobre las canaletas de recolección de agua clarificada, no se debe observar gran cantidad de floc en ellas, solo floc liviano y de menor tamaño.
2. Verificar que no existan fugas, daños en la infraestructura.
3. Verificar el estado de los paneles de sedimentación, estos deben estar nivelados y no deben presentar rupturas.
4. Solicitar al coordinador de la PTAP, las labores de mantenimiento y reparación necesarias.
5. Informar al coordinador de la PTAP, oportunamente los problemas presentados.

### **Actividades de mantenimiento**

1. Limpieza del sedimentador, esta se realiza cuando se observa que están colmatados por su actividad operativa, es decir se observa gran cantidad de floc sobre los paneles.

2. Para realizar el lavado de la unidad de sedimentación se debe programar con anterioridad y preferiblemente en época de verano.

3. Lavar canaletas de recolección de agua sedimentada.

4. Cerrar válvulas una vez terminado el lavado.

A continuación, se describen las actividades de mantenimiento del sedimentador:

1. El lavado se inicia deteniendo el funcionamiento total PTAP, luego abriendo la válvula de entrada. Posteriormente cuando la unidad este completamente vacía, iniciar con la zona depósito de lodos y revisar canal de desagüe, empezando con el lavado usando agua a media presión de abajo hacia arriba y de arriba hacia abajo para remover el lodo de cada uno de los paneles.

2. Lavar canaletas de recolección de agua sedimentada.

3. Desinfectar aplicando una solución de hipoclorito de calcio al 70%.

4. Cerrar válvulas una vez terminado el lavado.



2. Verificar el funcionamiento de los filtros con respecto a la calidad de agua (color y turbiedad) y el nivel del agua en cada uno de los filtros.
3. Verificar que los procedimientos de lavado se ejecuten de manera adecuada.



Ilustracion 5. Actividades de Mantenimiento

1. Lavar una unidad cuando se alcanza el nivel máximo en todos los filtros o cuando se está produciendo agua con turbiedad  $> 1$  UNT (o en su defecto el valor que se establezca como límite superior que en ningún caso debe ser  $> 5$ UNT).
2. Verificar que las válvulas estén funcionando en forma adecuada.
3. Lavar los filtros cada 24 horas o cuando sea necesario.
4. Turbiedad del efluente.

**Desinfección.** Es un proceso encaminado a la eliminación de los microorganismos que causan infecciones y afectaciones a la salud humana, como virus, hongos y/o bacterias, La desinfección se realiza mediante dos equipos dosificadores de cloro, con capacidad de descarga de 200 lb/día (clorador marca hydro) y 250 lb/día (clorador siemens), los cuales permiten graduar la descarga requerida; se en la recamara en el sitio de salida del agua hacia la red de conducción, se agrega por medio de tubería de 1”, la cual lleva agua clorada, con una concentración total determinada, según la descarga requerida, esta se hace en lb/día. Esta es la última etapa del proceso. Esquema de la planta de la planta de tratamiento de ECAAAS-ESP.



Ilustracion 6. Sistema de Cloracion

#### AJUSTE DE PH:

En el tratamiento químico del agua, la coagulación altera el equilibrio del sistema carbonato, tendiendo a disminuir el pH, cuando el coagulante se diluye, Igualmente, la desinfección con cloro reduce la alcalinidad y el pH, por las propiedades ácido-base del cloro que, al hidrolizarse, forma el ácido hipocloroso, que se disocia en iones de hidrógeno (WHO, 2011). Estos fenómenos hacen necesario reajustar el balance químico del agua al final del

tratamiento, para asegurar su estabilidad en el sistema de distribución del agua – SDA (Trejo Vázquez & García Díaz, 2007; Edzwald, 2010).

Objetivo: Se realiza con fin de ajustar el pH.

Descripción: se realiza la dilución de la cantidad en (Kg) de cal tipo N, según sea el caso, en un recipiente plástico; el cual se mantiene en constante agitación mediante un sistema de hélices o aspas, para garantizar su completa disolución, seguidamente se realiza su dosificación regulada por un sistema de dosificación por bombeo según se requiera, el punto de aplicación es la entrada del tubo de 16” de salida.



Ilustración 7. Sistema de Dosificación de Oxido de Calcio

En la planta de tratamiento realiza los procesos concernientes a la potabilización del agua, desarrollando procesos establecidos dentro de la normativa colombiana en cuanto a calidad del agua y Buenas prácticas sanitarias. Dentro de las cuales indica que los operadores deben estar certificados en las normas colombianas de competencia laboral de la titulación

180201002 operación de sistemas de potabilización de agua - Nivel 3, lo cual permite observar el compromiso que tiene la empresa ECAAAS. E.S.P para la prestación del servicio de agua potable en el municipio de saravena.

La importancia de este manual es documentar todos los procesos que se llevan a cabo en la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) desde la bocatoma hasta el tanque de



Ilustracion 8. Vista Aerea de la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Ecaaaas ESP



Ilustración 9. Sistema de Captacion- Bocatoma

Conjunto de obras o estructuras necesarias para obtener o “captar” el agua de una fuente de abastecimiento; de acuerdo con el tipo de fuente, pueden existir captaciones superficiales, subterráneas y de agua de lluvia.

**Objetivo:** Captar el agua cruda requerida para la posterior potabilización.

**Descripción:** Cuenta con dos estructuras bien definidas, la primera encausa el flujo del río construida en concreto ciclópeo conformado por dos secciones con diseño geométrico diferente, con un dique y un muro de contención que forman un canal que inicialmente tiene el mismo sentido de la corriente del río y luego gira 90° hacia la izquierda, formando una curva de gran radio que remata en un tanque ahogado o piscina y que sirve para conducir el agua hasta la bocatoma lateral, antes de continuar su curso aguas abajo. La primera sección del canal, paralela a la corriente del agua, forma parte del vertedero lateral de crecidas.

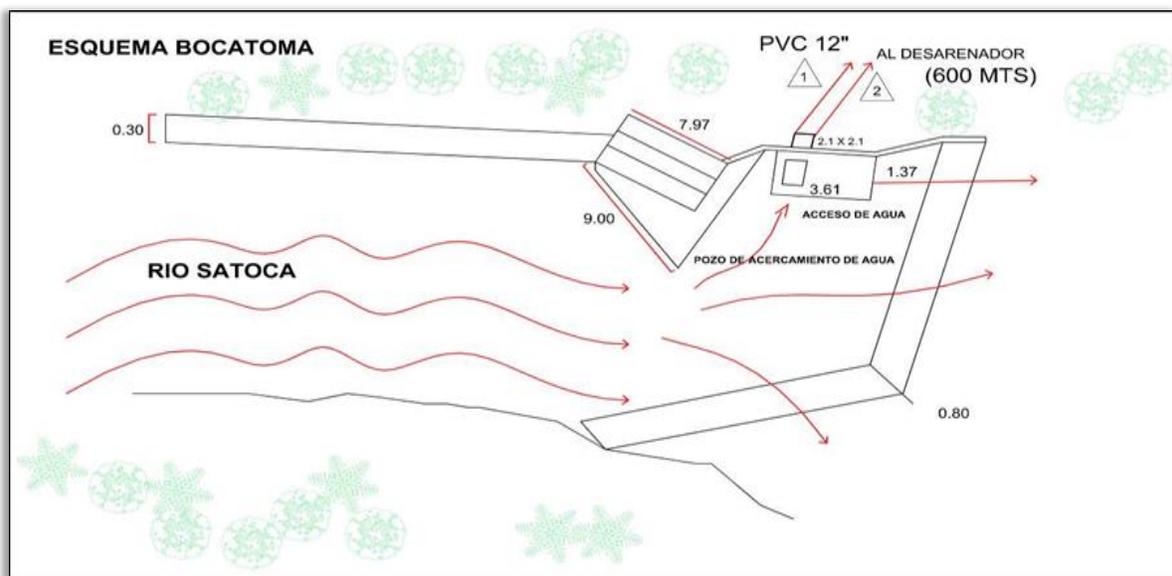


Ilustración 10. Bocatoma del Río Satoca en el municipio de Saravena, Arauca

Se encuentra ubicada en un predio de propiedad de ECAAAS - ESP, cuenta con un área de 5 hectáreas, delimitada con cerca en alambre de púa, dificultando el acceso a personal no autorizado, animales rumiantes, entre otros. Se cuenta con una casa donde habita el fontanero rural, de igual manera es usada para el almacenamiento de material y herramientas propios de la actividad; la cual está en estado óptimo con servicio de electricidad, agua y teléfono celular, el cual permite tener comunicación con el personal de la planta de tratamiento de agua y el personal del área técnico operativo, con el propósito de coordinar actividades en caso de emergencia y otras.

### 3. MARCO LEGAL

Caracterizar el agua con el fin de establecer un tratamiento que permita entregar a la población agua en la calidad que exige el Decreto 1575 de 2007 y sus resoluciones reglamentarias, en particular la Resolución 2115 de 2007, expedida por los entonces Ministerios de la Protección Social y Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial o aquella que las modifique o reemplace. En este orden de ideas, es necesario conocer y controlar para la fuente de agua cruda los valores de las características físicas, químicas y microbiológicas básicas definidas en la Resolución mencionada anteriormente, complementadas por las características resultantes de la elaboración del mapa de riesgo de la calidad del agua, según el procedimiento definido en la Resolución 4716 de 2010 ó en su ausencia, las características mencionadas en el Decreto 1594 de 1984 en el artículo 20 que se presuman estén presentes en la fuente abastecedora.

Características de análisis básicos que deben realizarse al agua tratada según Resolución 2115 de 2007: menciona: Características de análisis básicos que deben realizarse al agua tratada:

1. Turbiedad
2. Color Aparente
3. pH
4. Cloro residual libre

5. Residual de desinfectante usado

6. Coliformes totales

7. Escherichia coli (e-coli)

Características de análisis complementarios:

1. Alcalinidad

2. Dureza Total

3. Hierro Total

4. Cloruros

5. Sulfatos

6. Nitratos y Nitritos

7. Residual del coagulante

8. COT

9. Fluoruros

10. Todas aquellas adicionales que se identifiquen en el mapa de riesgo.

Rangos para el agua tratada

Microbiológicas	Valores permisibles
Coliformes totales UFC/100 cm <sup>3</sup>	0
Escherichia coli UFC/100 cm <sup>3</sup>	0

Físicas	Valores permisibles
Ph	6,5 – 9
Turbiedad NTU	≤2
Color aparente UPC	≤15
Conductividad μS/cm	1.000
Olor y sabor	Aceptable

Tabla 1. Rangos Establecidos

QUÍMICAS DE SUSTANCIAS QUE TIENEN RECONOCIDO EFECTO ADVERSO EN LA SALUD HUMANA	Valores permisibles
Antimonio – mg/l	0,02
Arsénico – mg/l	0,01
Bario – mg/l	0,7
Cadmio – mg/l	0,003
Cianuro libre y disociable – mg/l	0,05
Cobre – mg/l	1,0
Cromo total – mg/l	0,05
Mercurio – mg/l	0,001
Níquel – mg/l	0,02
Plomo – mg/l	0,01
Selenio	0,01
Thihalometanos Totales	0,2
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	0,01

Tabla 2. Químicas de Sustancias que tienen reconocido efecto adverso en la Salud Humana

QUÍMICAS QUE TIENEN IMPLICACIONES SOBRE LA SALUD HUMANA	Valores permisibles
Carbono Orgánico Total – mg/l	5,0
Nitritos – mg/l	0,1
Nitratos – mg/l	10
Fluoruros – mg/l	1,0

Tabla 3. Químicas que tienen implicaciones sobre la salud humana

QUÍMICAS QUE TIENEN CONSECUENCIAS ECONÓMICAS E INDIRECTAS SOBRE LA SALUD HUMANA	
Calcio – mg/l	60
Alcalinidad Total – mg/l	200
Cloruros – mg/l	250
Aluminio – mg/l	0,2
Dureza Total – mg/l	300
Hierro Total – mg/l	0,3
Magnesio – mg/l	36
Manganeso – mg/l	0,1
Molibdeno – mg/l	0,07
Sulfatos – mg/l	250
Zinc – mg/l	3
Fosfatos – mg/l	0,5

Tabla 4. Químicas que tienen consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana

#### 4. OBJETIVOS

#### **4.1. Objetivo General**

Analizar la eficiencia del coagulante vegetal obtenido a partir del almidón de plátano como coadyuvante en el proceso de coagulación-floculación.

#### **4.2. Objetivos específicos**

Evaluar el comportamiento de calidad del agua superficial a través de la caracterización fisicoquímicas de los parámetros pH, turbidez, color, utilizando métodos estandarizados.

Determinar la cantidad optima de agente coagulante de origen vegetal que se puede utilizar en el proceso de coagulación, cumpliendo con las normativas establecidas en el decreto el decreto 1575 2007 y la resolución 2115 del 2007.

Diseñar un sistema de coagulación-floculación que se adapte a las necesidades del almidón de plátano como coadyuvante, a través de la metodología establecida en el RAS 2017 .

## 5. METODOLOGÍA

Inicialmente al ingresar a la PTAP se caracterizó el agua, proveniente del río Satoca, ubicado en el municipio de Saravena, Arauca, por medio de los parámetros color, turbiedad y pH. Luego se estandarizó un patrón de comportamiento para proyectar la posible llegada de las temporadas de lluvias, ya que en esta es donde se da inicio a la utilización de coagulantes.

La obtención del almidón de plátano se realizó de la siguiente forma: inicialmente se extrajo la pulpa de musaparadisiaca, luego se cortó en pedazos iguales con dimensiones de 2 cm de grosor, después se dejó en una mufla a 150 °C por 24 horas, seguidamente se trituró en una licuadora Oster, hasta obtener un polvo fino. Finalmente se tamizó el producto en diferentes tamaños, para esto se utilizaron mallas número 70, 50, 100 y 200. El estudio fue realizado con el producto obtenido en el tamiz número 200. La selección de este tamaño está relacionado con la solubilidad, ya que las partículas de gran tamaño poseen baja solubilidad en el agua, al no mezclarse quedarán suspendidas en el medio ocasionando problemas en la caracterización del agua. Estas partículas de gran tamaño pueden ser interpretadas como turbidez en el proceso.

Después de obtener el almidón, el siguiente paso fue analizar sus propiedades coagulantes en el tratamiento de aguas. Para ellos se tomaron pequeñas muestras del almidón de diferentes pesajes, posteriormente se aforaron veakers hasta 800 mL, luego se realizó el montaje del test de jarras. A cada veaker se adicionó cierta cantidad del coagulante vegetal, posteriormente se agitó a 335 rpm durante 1 minuto y luego a 25 rpm por 15 minutos. Lo

anterior, simula el proceso de mezcla rápida y mezcla lenta respectivamente, realizado en la planta de tratamiento. Esto se realiza para la formación del floc. El mismo procedimiento fue realizado para la determinación de la dosis óptimas de los coagulantes de origen químico, como lo son el hidroxicloriguro de aluminio y sulfato de aluminio.

Luego de obtener las dosis óptimas de los coagulantes de origen químico y el coagulante de origen vegetal, se realizó el estudio para la utilización del coagulante de origen vegetal como coadyuvante en el proceso de coagulación-floculación. Esto se realizó variando las cantidades de coagulantes tanto de origen químico como las de origen vegetal, se tomaron los siguientes porcentajes: 90 % coagulante químico y 10 % coagulante vegetal, luego 80% químico y 20% vegetal, 70% químico y 30 % vegetal, 60% químico y 40% vegetal, 50 % químico y 50 % vegetal, 40 % químico y 60 % vegetal, 30 % químico y 70 % vegetal, 20 % químico y 80 % vegetal, 10 % químico y 90 % vegetal. Esto se hizo con los dos coagulantes de origen químico en relación con el coagulante de origen vegetal. Por último, se estudiaron los resultados y las posibles combinaciones óptimas.

El caudal de diseño fue lo primero en plantearse, se seleccionó 40 l/S. el diseño se realizó en el siguiente orden cronológico: primero la cámara de quietamiento, esta se diseñó teniendo en cuenta las velocidades de entrada que establecían las heurísticas de diseño (ras 2017), segundo la mezcla rápida, esta se modeló teniendo en cuenta los valores para el gradiente de velocidad que establece los parámetros de diseño. Esta se desarrolló siguiendo la metodología para un canal con caída tipo escalón, luego se diseñaron tres compartimientos de floculación, el floculador fue de flujo horizontal. La metodología para el diseño de este se realizó de la siguiente manera: Se estudió el diseño de un sistema de coagulación

floculación que se adaptara al coagulante vegetal, se tomó como base teórica el sistema adaptado a la PTAP de ECAAAS-ESP. Para el diseño, inicialmente, se estudiaron los datos obtenidos en el laboratorio (turbiedad, color, pH, tiempos de mezcla lenta, gradientes de velocidad), con el fin, de utilizar estos, para el diseño de las operaciones de la planta de tratamiento de agua potable, con los datos de turbiedad, se realizó un cociente entre el valor final e inicial de este parámetro, relacionando estos, a diferentes datos de tiempos de mezcla lenta y a distintos gradientes de velocidad, con el propósito de establecer una ecuación experimental para el gradiente de velocidad, inicialmente se realizaron los ajustes a los datos del hidroxiclورو de aluminio como coagulante y el almidón de plátano como coadyuvante, estableciendo la ecuación de Camp. Luego de realizar los ajustes de estos datos, se realizó el mismo procedimiento descrito anteriormente, a los datos de sulfato de aluminio como coagulante y almidón de plátano como coadyuvante. Estableciendo la ecuación experimental de camp. Se compararon con los valores teóricos, hallados por medio de las ecuaciones de diseño. De esta forma se verifico si el diseño cumplía con las pautas establecidas en el ras 2017. Después se realizó el diseño de un sedimentador de alta tasa. Y por último se modelo un filtro rápido de arena, las heurísticas de diseño se ciñeron a los parámetros establecidos en el ras 2017.

## 6. RESULTADOS Y ANALISIS

### 6.1. CARACTERIZACIÓN A TRAVÉS DE LOS PARÁMETROS COLOR, TURBIEDAD Y PH DEL AGUA DEL RIO SATOCA, UBICADO EN EL MUNICIPIO DE SARAVERA, ARAUCA.

MES	PH	COLOR	TURBIEDAD	ESTACIÓN
Enero	$7,28 \pm 0,13$	$15 \pm 0$	$0,63 \pm 0,08$	verano

Febrero	$7,18 \pm 0,06$	$8 \pm 0$	$0,67 \pm 0,09$	verano
Marzo	$7,27 \pm 0,09$	$12 \pm 0$	$0,95 \pm 1,29$	verano
Abril	$7,18 \pm 0,08$	$20,75 \pm 88,18$	$2,29 \pm 3,74$	verano
Mayo	$6,96 \pm 0,06$	$212,29 \pm 4,32$	$0,78 \pm 0,13$	invierno
Junio	$6,36 \pm 0,35$	$302,083 \pm 69,90$	$33,21 \pm 16,46$	invierno
Julio	$6,83 \pm 0,28$	$85,17 \pm 39,43$	$51,63 \pm 43,61$	invierno
Agosto	$6,76 \pm 0,23$	$98,58 \pm 45,44$	$5,08 \pm 2,81$	invierno
Septiembre	$7,02 \pm 0,11$	$37,33 \pm 3,24$	$2,12 \pm 0,19$	invierno
Octubre	$7,04 \pm 0,08$	$38,54 \pm 4,94$	$2,75 \pm 0,79$	invierno
Noviembre	$6,79 \pm 0,09$	$51,08 \pm 8,22$	$2,74 \pm 0,74$	invierno
Diciembre	$6,79 \pm 0,14$	$47,5 \pm 10,43$	$4,01 \pm 1,24$	invierno

Tabla 5. Parámetros físicos del agua, de acuerdo a la estación del año.

Durante el verano, la fuente posee un valor promedio de color 13,94 UPC y la turbiedad enmarca un valor promedio de 1,13NTU, el pH se encuentra en un valor promedio de 6,94. En esta estación, la purificación del agua no requiere un tratamiento con coagulantes, ya que el proceso de filtración logra la adecuación al agua cruda, por ende, el tratamiento al agua es mucho menos costoso con relación al invierno, en temporada de lluvias la situación es muy distinta, ya que según muestra la anterior tabla, los parámetros superan por mucho a los valores estudiados en verano, con estos valores, la filtración por sí sola no tiene la capacidad

de remover los materiales suspendidos en el agua, en estos valores se requiere la intervención de coagulantes químicos, los cuales logran un mayor porcentaje de remoción (99,6 %) de suciedad, contenida en el agua. En general la calidad de la fuente es óptima para un tratamiento convencional. El valor de la desviación estándar en invierno es alta para cada uno de los parámetros fisicoquímicos, ya que la fuente del río Satocá, ubicado en el municipio de Saravena, Arauca, es muy pequeña, ocasionando pronunciadas crecientes en muy corto tiempo, y volviendo a estabilizarse en valores de color, pH y turbiedad bajos.

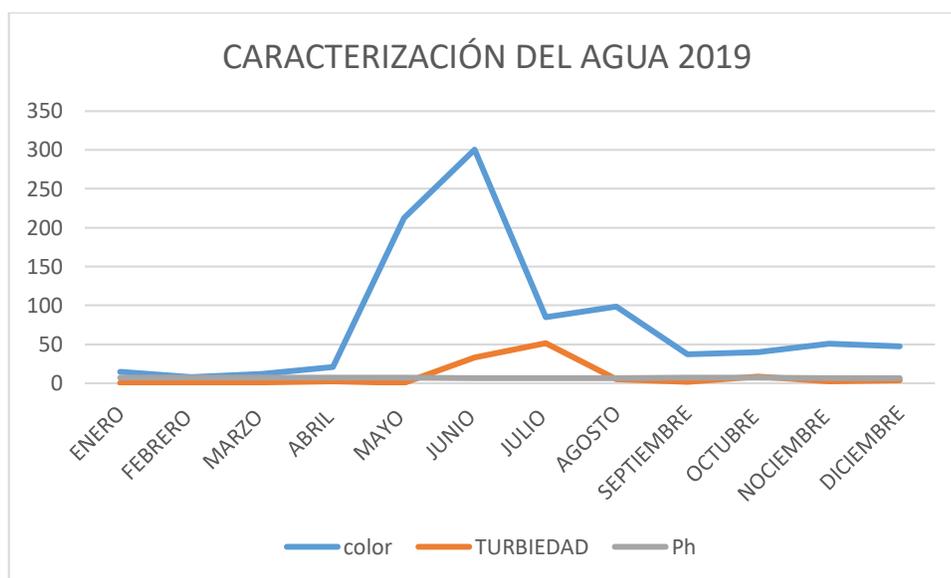


Figure 1. Caracterización del Agua 2019

La caracterización del agua, del río Satoca, fue realizada con los datos del año 2019, los datos fueron tomados diariamente durante todo el año. El color fue analizado con un multiparametro HI 83200 marca HHANNAINSTRUMENTS, la turbiedad se analizó con un turbidimetro 2100 P y el pH con un pH-metro de la marca HHANNAINSTRUMENTS, la

toma de muestras se realizó según lo establece el manual de buenas prácticas que brinda los lineamientos para la toma de muestras. Antes de los análisis los medidores fueron calibrados.

Todos los datos arrojados durante el lapso de un mes se promediaron para tener un dato único de cada parámetro analizado. En referencia al color, durante los meses de enero a abril, se establece en valores  $\leq 20$  UPC, esto se debe a la estación que prevalece en estos meses, la cual es verano, en esta época el material orgánico (color) contenido en el agua, es mínimo, ya que el agua no se ve expuesta a agitaciones causadas por condiciones meteorológicas severas. Ya entrado el invierno el color varía desde 30 UPC hasta 300 UPC. El análisis para la turbiedad expone, en los meses de enero, febrero, marzo y mayo valores  $\leq 2$  NTU. En junio de alcanza su máximo en un valor de 51.62 NTU, este valor tan alto, se debe, a que para esta fecha, el invierno prevalece, ocasionando perturbación en las condiciones del agua. En temporada de lluvias por acción de escorrentía se arrastran altas cantidades de material inorgánico (turbiedad), aumentando los valores de turbiedad contenidos en la fuente. Según establece la resolución 2115 del 2007, el valor presentado para pH durante todos los meses del año está dentro del rango permitido para este parámetro, es decir su valor varía entre 6.0 - 8.5.

Realizando un mapa de riesgo (ver anexo 16), se observa que las únicas personas aguas arriba de la planta, pertenecen a la comunidad indígena u'wa, estos poseen cultivos como yuca, plátano y piña, también realizan la actividad ganadera, pero sus bovinos no sobrepasan las 30 reses. La calidad de la fuente no se ve afectada, por las actividades de la comunidad, ya que no utilizan fertilizantes para sus cultivos ni insumos químicos para sus animales.

Según el ras 2017, la calidad de la fuente durante los meses de enero a marzo, se establece en una fuente aceptable. Durante los meses de abril se considera una fuente regular, en los meses de septiembre, octubre y diciembre, la fuente es considerada deficiente, y durante mayo, junio, julio y agosto la fuente se considera muy deficiente. Las anteriores caracterizaciones se realizan teniendo en cuenta pH, color y turbiedad.

## 6.2. DOSIS ÓPTIMA DEL COAGULANTE VEGETAL

N° DE ENSAYOS	COLOR (UPC)		TURBIEDAD (NTU)		pH		(mg/L)	DOSIS OPTIMA HIDRO	PARTICIPACIÓN % DE	
	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL			ALMIDÓN	ALMIDÓN
1	350	78	23,60	0,61	7,05	6,68	1,51	13,56	10	90
2	180	10	15,6	0,79	7,03	6,43	2,30	20,7	10	90
3	220	23	10,8	0,91	6,98	6,89	2,40	21,6	10	90
4	278	8	19,9	1,02	7,10	6,68	2,60	23,4	10	90
5	328	6	30,9	1,54	6,64	5,67	2,90	26,1	10	90
6	100	16	35,80	2,07	6,64	5,67	3,10	27,9	10	90
7	150	14	25,78	2,12	6,68	6,35	2,70	24,3	10	90
8	200	24	26,0	4,19	6,89	6,29	2,70	24,3	10	90
9	354	12,6	23,9	1,19	6,75	6,57	2,04	18,4	20	80

10	565	26,25	35,9	1,55	6,88	6,57	2,13	19,2	20	80
11	452	10,15	45,8	2,93	6,98	6,91	2,58	23,2	20	80
12	590	21	63,7	3,93	7,10	6,93	2,76	24,8	20	80
13	890	18,90	23,6	4,028	7,20	6,96	2,40	21,6	20	80
14	789	23,1	10,6	4,46	7,09	6,9	2,22	20	20	80

Tabla 6. Dosis óptimas de hidroxiclورو de aluminio y almidón de plátano

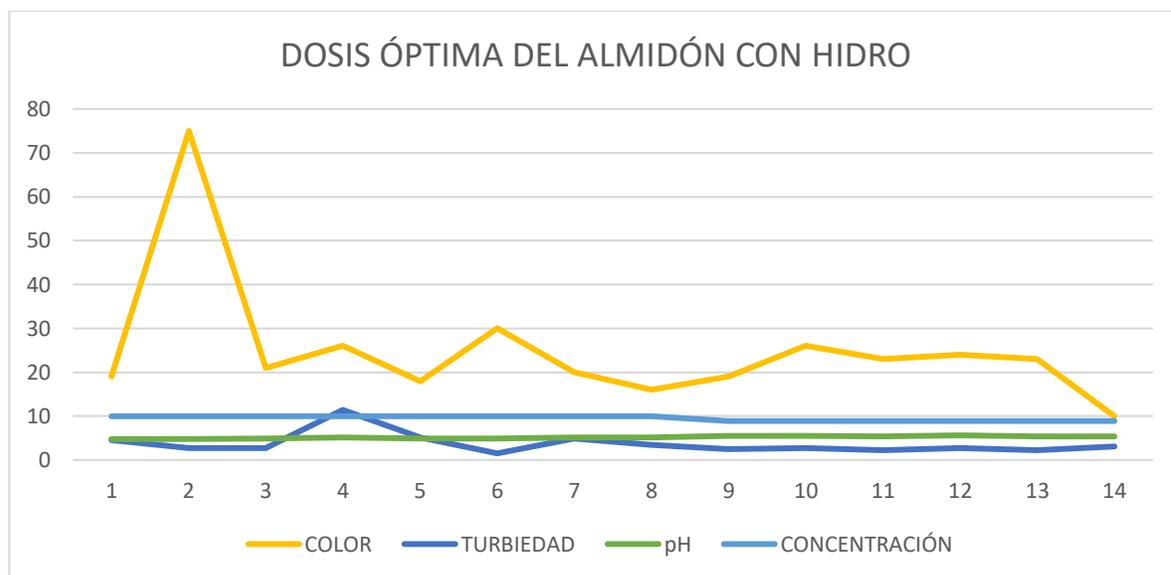


Figure 2. Dosis Optima del Almidon Hidro

La dosis óptima alcanzada para el almidón de plátano como coadyuvante en el proceso de coagulación-floculación, se establece en un rango de 1,51 mg/L a 3,10 mg/L, en estos valores se logró la máxima remoción de color y turbiedad, esto se logra debido al rompimiento de los enlaces intermoleculares que tienen lugar en las moléculas de agua (enlaces débiles, puentes de hidrogeno, fuerzas de van der Valls), estos son capaces de retener la suciedad entre las moléculas de agua, en conjunto con el hidroxiclورو de aluminio (hidro), en un rango de

concentraciones que van desde 13,56 mg/L hasta 27,9 mg/L, se logra el rompimiento de estos enlaces, provocando la desestabilización de las partículas. En este punto, la función del coagulante entra en vigor, aglomerando las partículas y formando los llamados flocs, el cual es la aglomeración de partículas sólidas tales como arenas, arcillas, material suspendido en el agua.

Aumentando la concentración de coadyuvante vegetal a un 30 %, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% y disminuyendo proporcionalmente el coagulante químico, no ocurre formación del floc, ver anexos.

N° DE ENSAYOS	COLOR INICIAL (UPC)	COLOR FINAL (UPC)	% REMOCIÓN
1	350	78	77,17
2	180	10	94,44
3	220	23	89,54
4	278	8	97,12
5	328	6	98,17
6	100	16	84
7	150	14	90,67
8	200	24	88
9	354	12,6	96,44
10	565	26,25	95,35
11	452	10,15	97,75
12	590	21	96,44
13	890	18,9	97,87
14	789	23,1	97,07

Tabla 7. Porcentaje de remoción de color, con relación al hidroxloruro de aluminio y almidón

Utilizando almidón como coadyuvante en el proceso de coagulación-floculación, sujeto bajo la condición de utilizar un 10 % de almidón y un 90% hidroxiclورو de aluminio en el proceso (primera condición). Se evidencia que el rango comprendido entre 13,56 ppm a 27,9 ppm (concentración de hidroxiclورو de aluminio) y para rangos de 1,51 ppm a 3,10 ppm (concentración del almidón de plátano), el porcentaje de remoción de color se establece en un categoría del 77,17 % a 94,44 %. Bajo la situación de utilizar 20 % almidón y 80 % coagulante químico (segunda condición), se enmarcan un porcentaje de remoción de color que va desde el 88% hasta el 97,84 %, al compararse con la remoción de las condiciones iniciales, se observa, que la eficiencia, de acuerdo al rango de remoción, mejora en un 10,83 % en el mínimo rango y 3,4 % en el máximo rango. Esto hace destacar que utilizando un 20 % de almidón con un 80 % de hidroxiclورو se logran más altos porcentajes de remoción.

N° DE ENSAYOS	TURBIEDAD INICIAL (NTU)	TURBIEDAD FINAL (NTU)	% REMOCIÓN
1	23,6	0,61	97,42
2	15,6	0,79	94,94
3	10,8	0,91	91,57
4	19,9	1,02	94,87
5	30,9	1,54	95,02
6	35,8	2,07	94,22
7	25,78	2,12	91,78
8	26	4,19	83,88
9	23,9	1,19	95,02
10	35,9	1,55	95,68
11	45,8	2,93	93,60
12	63,7	3,93	93,83
13	23,6	4,028	82,93
14	10,6	4,46	57,92

Tabla 8. Porcentaje de remoción de turbiedad, con relación al hidroxiclورو de aluminio y almidón

La reducción en la turbiedad es equivalente a un rango de 83,88 % a 95,42 %, esto con relación a utilizar 10 % almidón, 90 % hidroxiclورو. Al compararse con los porcentajes de remoción de la turbiedad (57,92 % hasta 95,68 %.), obtenidos utilizando 20 % almidón y 80 % hidroxiclورو. Demuestra que utilizando las condiciones iniciales, mejora la eficiencia en la remoción de la turbiedad en un 0,7505%.

Desde el punto de vista económico, se reduciría la utilización de hidroxiclورو de aluminio en un 20,91 %, esto reduciría costos en insumos químicos, ya que en el proceso de estabilización se utilizaría una cantidad menor de óxido de calcio para la regulación del pH del agua tratada.

N° DE ENSAYOS	pH INICIAL	pH FINAL	% REMOCIÓN
1	7,05	6,68	5,25
2	7,03	6,43	8,53
3	6,98	6,89	1,29
4	7,1	6,68	5,92
5	6,64	5,67	14,61
6	6,64	5,67	14,61
7	6,68	6,35	4,94
8	6,89	6,29	8,71
9	6,75	6,57	2,67
10	6,88	6,57	4,51
11	6,98	6,91	1,00
12	7,1	6,93	2,39
13	7,2	6,96	3,33
14	7,09	6,9	2,68

Tabla 9. Porcentaje de remoción de pH, con relación al hidroxiclورو de aluminio y almidón

La reducción de pH con el almidón es notoria, ya que al realizar un análisis desde punto de vista operacional, se puede lograr disminuir la utilización de óxido de calcio, en el proceso de estabilización del agua, el óxido de calcio aporta iones que logran neutralizar la acidez, dejada por el uso del coagulante químico. Utilizando un 10 % almidón y 90 % del coagulante químico, se establece que el porcentaje de remoción de pH es 7,98 % (promedio). Utilizando 20 % almidón y 80 % hidroxiclорuro de aluminio, el porcentaje de remoción es equivalente a 2,76 %. Esto hace resaltar que el porcentaje de la primera condición esta 5,22 % por encima de la segunda condición.

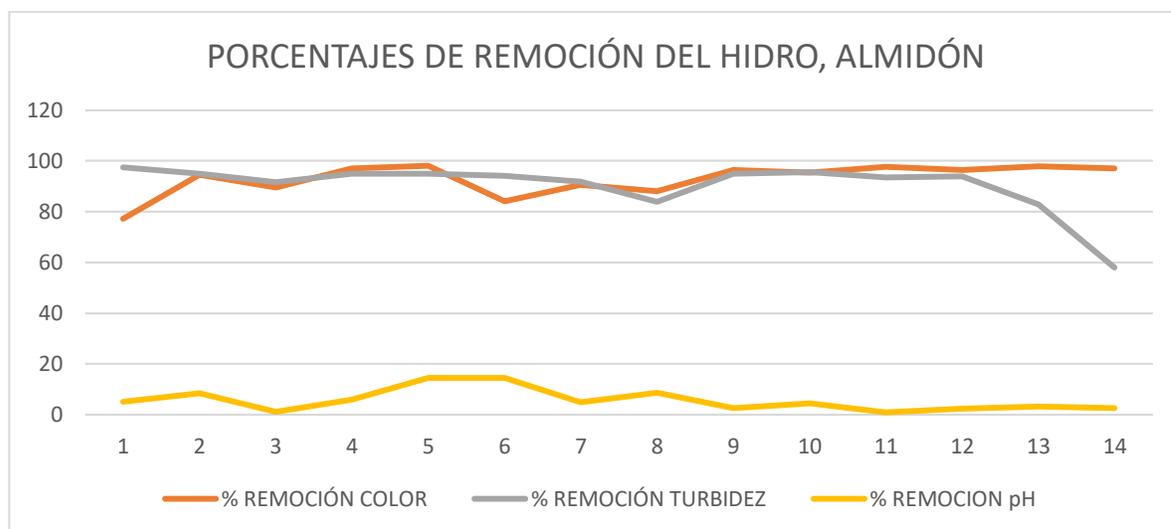


Figure 3. Porcentajes de remoción del Hidro, Almidón

Bajo la condición de establecer la dosis óptima del almidón de plátano, como coadyuvante en el proceso de coagulación-floculación, se establece que los máximos valores de remoción, son logrados en los parámetros de turbiedad y color (84 % a 99,87 %). Mientras que en el pH se logran remociones menos pronunciadas (5,75 %). Según muestra la gráfica.

N° DE ENSAYOS	COLOR (UPC)		TURBIEDAD (NTU)		pH		Mg/L	DOSIS OPTIMA SULFATO	PARTICIPACIÓN % DE	
	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL			ALMIDÓN	SULFATO
1	350	19	23,60	4,5	7,05	4,788	10	34,08	10	90
2	180	75	15,6	2,71	7,03	4,81	10	51,3	10	90
3	220	21	10,8	2,71	6,98	4,94	10	40,5	10	90
4	278	26	19,9	11,4	7,10	5,11	10	17,75	10	90
5	328	18	30,9	5,21	6,64	4,86	10	27,11	10	90
6	100	30	35,80	1,58	6,64	4,88	10	29,26	10	90
7	150	20	25,78	4,95	6,68	5,21	10	25,76	10	90
8	200	16	26,0	3,51	6,89	5,21	10,00	49,38	10	90
9	354	19	23,9	2,46	6,75	5,55	8,89	30,3	20	80
10	565	26	35,9	2,71	6,88	5,5	8,89	36	20	80
11	452	23	45,8	2,25	6,98	5,45	8,89	24,1	20	80

12	590	24	63,7	2,78	7,10	5,63	8,89	33,8	20	80
13	890	23	23,6	2,25	7,20	5,45	8,89	24,1	20	80
14	789	10	10,6	3,15	7,09	5,44	8,89	30,6	20	80

Tabla 10. Dosis óptimas de sulfato de aluminio y almidón de plátano

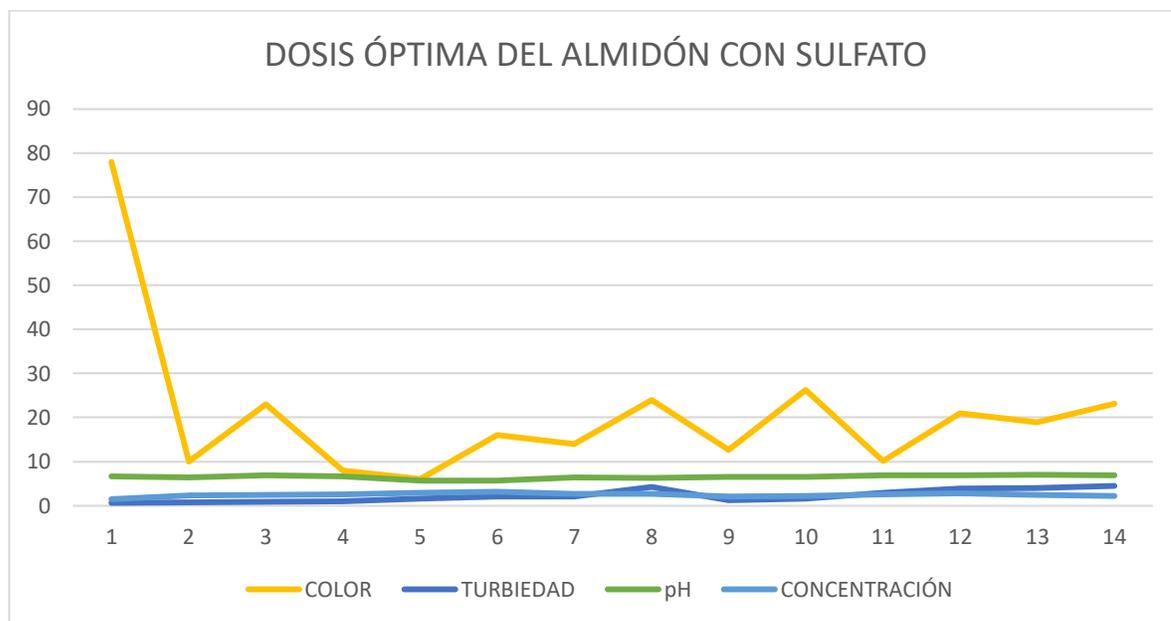


Figure 4. Dosis Optima del Almidón con Sulfato

Utilizando un 90 % de sulfato de aluminio y un 10% de almidón de plátano (condición inicial), con relación a la concentración total, se observa una disminución del 92,85 % en el color, 92,96% turbiedad y 7,98 % en el pH, estos porcentaje se alcanzan utilizando dosis que van desde 1,97 mg/L hasta 5,70 mg/L (almidón de plátano).

Al compararlo con el sulfato de aluminio sin coadyuvante (reducción del 99,23 %, en el color), se puede denotar que la eficiencia cae en 6,43 % con el coadyuvante. Aunque disminuye, sus valores están dentro del marco de la resolución 2115 del 2007, para color.

Aumentando la concentración de coadyuvante vegetal a un 30 %, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% y disminuyendo proporcionalmente el coagulante químico, no ocurre formación del floc, ver anexos.

N° DE ENSAYOS	pH INICIAL	pH FINAL	% REMOCIÓN
1	7,05	6,68	5,25
2	7,03	6,43	8,53
3	6,98	6,89	1,29
4	7,1	6,68	5,92
5	6,64	5,67	14,61
6	6,64	5,67	14,61
7	6,68	6,35	4,94
8	6,89	6,29	8,71
9	6,75	6,57	2,67
10	6,88	6,57	4,51
11	6,98	6,91	1,00
12	7,1	6,93	2,39
13	7,2	6,96	3,33
14	7,09	6,9	2,68

Tabla 11. Porcentaje de remoción de pH, con relación al sulfato de aluminio y almidón

Par un 90 % de sulfato de aluminio y 10 % coadyuvante, el ph logra una reducción de 7,98 % y para 80 % sulfato y 20 % almidón, se logra una disminución de 2,76 %. Es más eficiente utilizando 10 % almidón, esto parece algo contradictorio, ya que disminuyendo un 20 % del

coagulante químico, el cual aporta reducción en el pH, debido a que este, al contacto con el agua se hidroliza generando los iones que aportan acidez.

No se logra aumentar el pH en el agua, y utilizando más cantidad del coagulante lleva a mayores valores de reducción.

N° DE ENSAYOS	COLOR INICIAL (UPC)	COLOR FINAL (UPC)	% REMOCIÓN
1	350	19	94,57
2	180	75	58,33
3	220	21	90,45
4	278	26	90,65
5	328	18	94,51
6	100	30	70,00
7	150	20	86,67
8	200	16	92,00
9	354	19	94,63
10	565	26	95,40
11	452	23	94,91
12	590	24	95,93
13	890	23	97,42
14	789	10	98,73

Tabla 12. Porcentaje de remoción de color, con relación al sulfato de aluminio y almidón

Par un 90 % sulfato y 10 % coadyuvante vegetal, el color logra una reducción de 89,88 % y para 80 % sulfato y 20 % almidón, el color genera un descenso equivalente a 92,86 %. Al compararlos, se observa que en estas últimas concentraciones, se mejora la remoción en un 2,98 %.

N° ENSAYOS	DE	TURBIEDAD INICIAL (NTU)	TURBIEDAD FINAL (NTU)	% REMOCIÓN
1		23,6	4,5	80,93
2		15,6	2,71	82,63
3		10,8	2,71	74,91
4		19,9	11,4	42,71
5		30,9	5,21	83,14
6		35,8	1,58	95,59
7		25,78	4,95	80,80
8		26	3,51	86,50
9		23,9	2,46	89,71
10		35,9	2,71	92,45
11		45,8	2,25	95,09
12		63,7	2,78	95,64
13		23,6	2,25	90,47
14		10,6	3,15	70,28

Tabla 13. Porcentaje de remoción de turbiedad, con relación al sulfato de aluminio y almidón

Par un 90 % sulfato y 10 % coadyuvante vegetal, la turbiedad logra una reducción de 92,96 %. Para 80 % sulfato y 20 % almidón, la turbiedad genera un descenso equivalente a 84,29 %. Al compararlos, se observa que en el primer porcentaje de participación, se mejora la remoción en un 8,67 %.

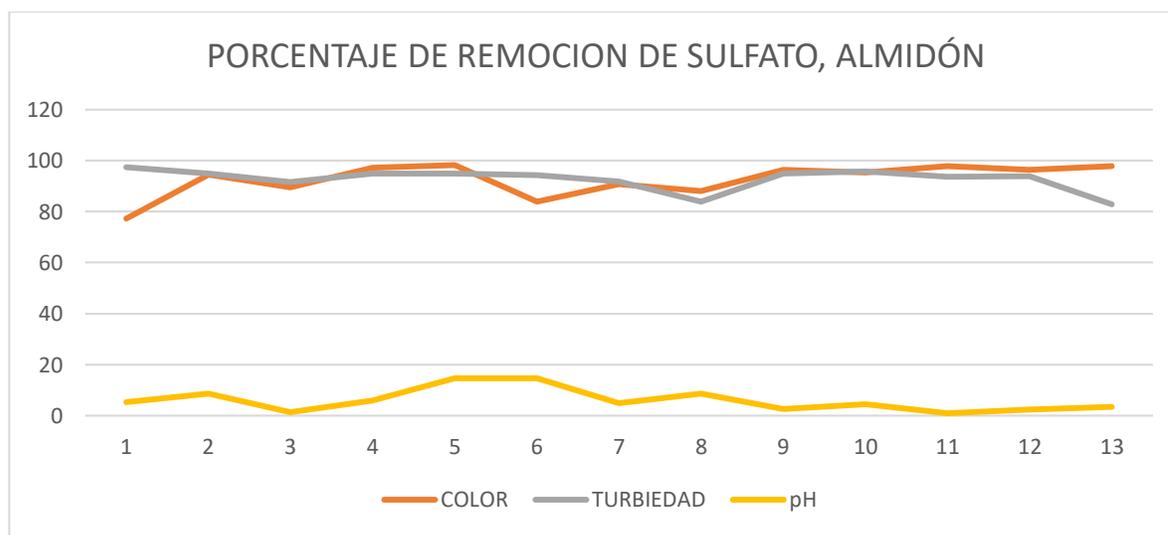


Figure 5. Porcentaje de Remocion del Sulfato, Almidon

La utilización de sulfato de aluminio como coagulante y almidón de plátano como coadyuvante, generan eficiencias en remoción de parámetros color (86,67 % a 98,73 %), pH (1 % a 14,61 %) y turbiedad (70,28 % a 95,64 %) para el tratamiento de aguas. Los valores alcanzados en las eficiencias, hace prever que el almidón podría ponerse en práctica en el proceso de coagulación-floculación. La disminución en estos parámetros son los aceptados en la resolución 2115 del 2007.

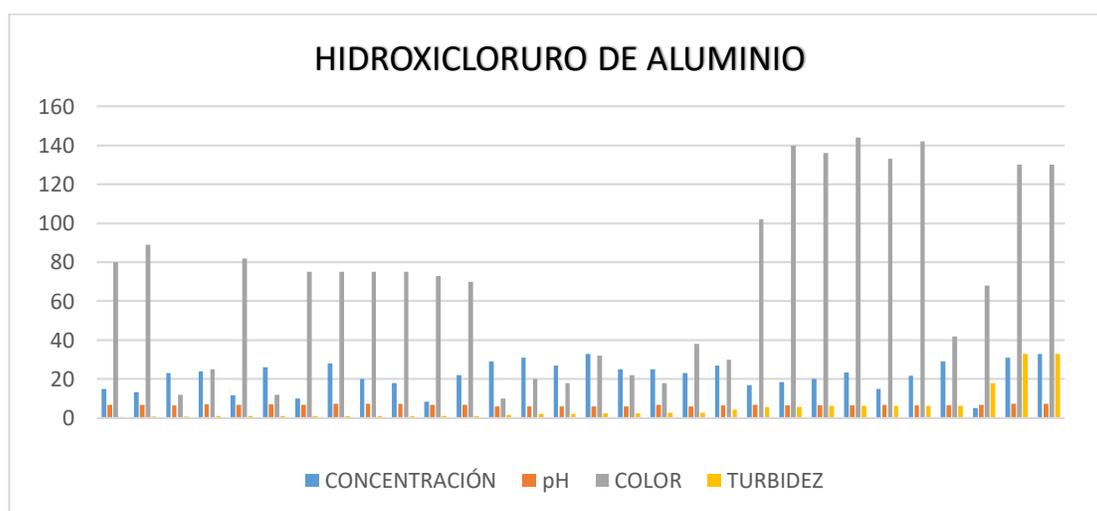


Figure 6. Hidroxicloruro de Alumnio

La grafica representa la utilización de hidroxiclорuro de aluminio en el proceso de coagulación-floculación para tratamiento de agua potable, en este modelamiento se puede observar como las concentraciones de hidroxiclорuro de aluminio comprendidas entre 25 ppm y 33 ppm disminuyen el color a un rango comprendido entre 10 UPC y 32 UPC, el anterior rango se compara con el máximo color registrado, el cual es equivalente a 140 UPC, denotando una disminución del color entre 82,14 % a 76,42 %. De igual forma se observa rangos óptimos de turbiedad, los cuales están limitados entre 1,05 NTU y 2,7 NTU. El

máximo valor de turbiedad registrada fue de 33 NTU, la eficiencia en la remoción de la turbiedad para los rangos anteriores se encuentra entre 96,818 % a 91,818 %, respectivamente. El pH del hidroxicloriguro de aluminio es de 2. 54, esto genera una disminuci3n del pH del agua a tratar, ya que al contacto con un medio neutro logra un descenso gradual del 2,53 % del pH, lo anterior es con base al agua a tratar (agua cruda).

Los anteriores rangos fueron hallados por medio del test de jarras, alcanzando así la dosis optima del hidroxicloriguro de aluminio, y logrando de esta forma cumplir con los rangos físicos establecidos en la resoluci3n 2115 del 2007 para el tratamiento de aguas.

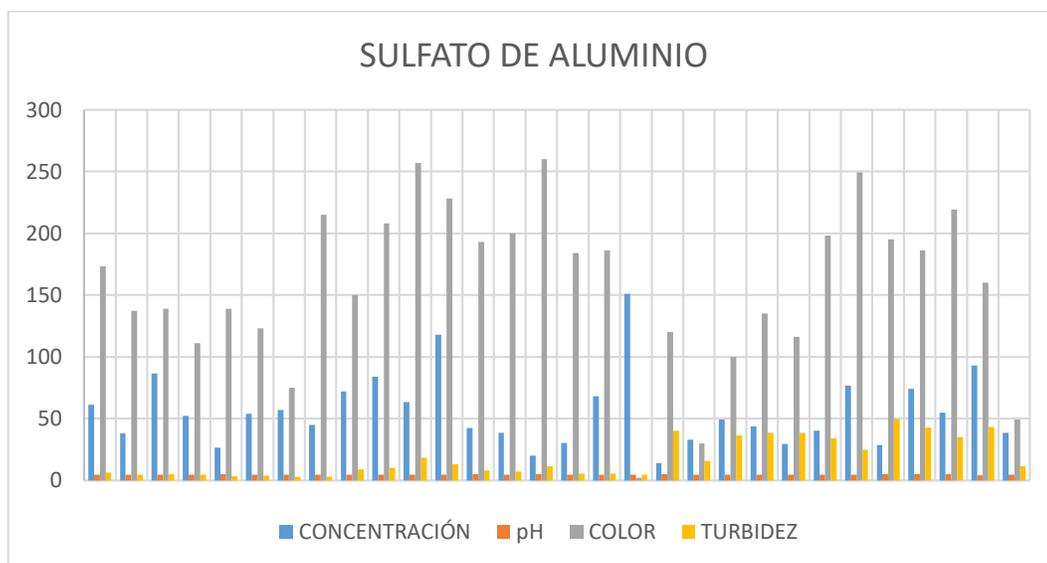


Figure 7. SULFATO DE ALUMINIO

Según los resultados, los rangos de operaci3n óptima son dispersos. Existen algunos rangos como se observa en la gráfrica en donde disminuye la turbiedad pero el color denota valores muy alejados de los aceptados para el tratamiento de agua potable, en algunos valores puntuales como el dato numero 18 (contar de forma ascendente desde el origen) en la gráfrica,

se demuestra que en una concentración equivalente a 150 ppm, la disminución de los parámetros turbiedad, color es notoria, el porcentaje de remoción del color y de la turbiedad son de 99,23 % a 90.56 %, respectivamente. El sulfato de aluminio está en estado sólido y al realizar la solución acuosa para la posterior dosificación se alcanzan valores de pH cercanos a 4,56 (para una concentración de 45 ppm); esto dependiendo de la concentración de la solución, pero a grandes rasgos se observa una disminución de alrededor del 12 %  $\pm$  1.5 del pH del agua tratada con sulfato de aluminio en relación con hidroxiclورو de aluminio.

Al comparar los resultados del sulfato de aluminio con los resultados del hidroxiclورو de aluminio, se observa que tiene un menor rango de participación con relación a las dosis óptimas el sulfato de aluminio, ya que se necesitan dosis muy altas de este último para lograr la formación del floc. Según lo analizado en este estudio el hidroxiclورو de aluminio es un mejor coagulante para aguas con turbiedades bajas y colores altos, aguas con estas características son muy usuales en el departamento de Arauca. En relación a lo económico, las concentraciones utilizadas en el sulfato de aluminio deben cumplir con los parámetros establecidos en las leyes colombianas con el fin de lograr un alto porcentaje de remoción de turbiedad y color, lo cual genera un exceso en el costo operativo del proceso. Otra desventaja del sulfato de aluminio es que genera una mayor disminución en el pH, generando gastos de óxido de calcio en el proceso de estabilización del agua.

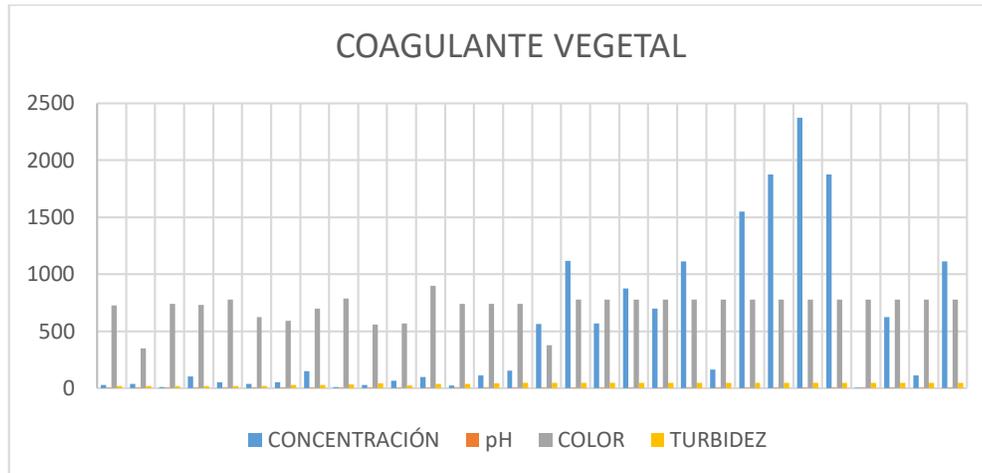


Figure 8. COAGULANTE VEGETAL

El coagulante vegetal (almidón de plátano) por sí solo no genero un efecto positivo en el proceso de coagulación-floculación. Se evidencio que a grandes y bajas concentraciones la tendencia a valores altos de los parámetros físicos (turbidez, color, pH) es aproximadamente constante, a excepción de la siguiente concentración: 37,65 ppm, en esta el valor del color se redujo en un 55% y la turbiedad en un 55,13 %, aunque estos porcentajes son llamativos el resultado es muy lejano para los valores de turbiedad, color y pH que acepta la resolución 2115 del 2007.

El almidón utilizado como coadyuvante en el proceso de coagulación-floculación tiene un comportamiento más alternativo que al utilizarlo por si solo en el proceso.

### 6.3. CONDICIONES ACTUALES DE LA PLANTA

Esta la imagen actual de la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Saravena, Arauca. Es de tipo convencional, cuenta con los procesos unitarios tales como:

captación, desarenación, coagulación, floculación, sedimentación, filtración, desinfección; con capacidad según diseño de 250 litros por segundo; está contenida en una estructura de concreto reforzado, cuenta con una caja de pitometría en donde se ubica un Macromedidor electromagnético, una estructura de llegada, dos trenes de floculación – sedimentación en paralelo y 5 filtros en paralelo.

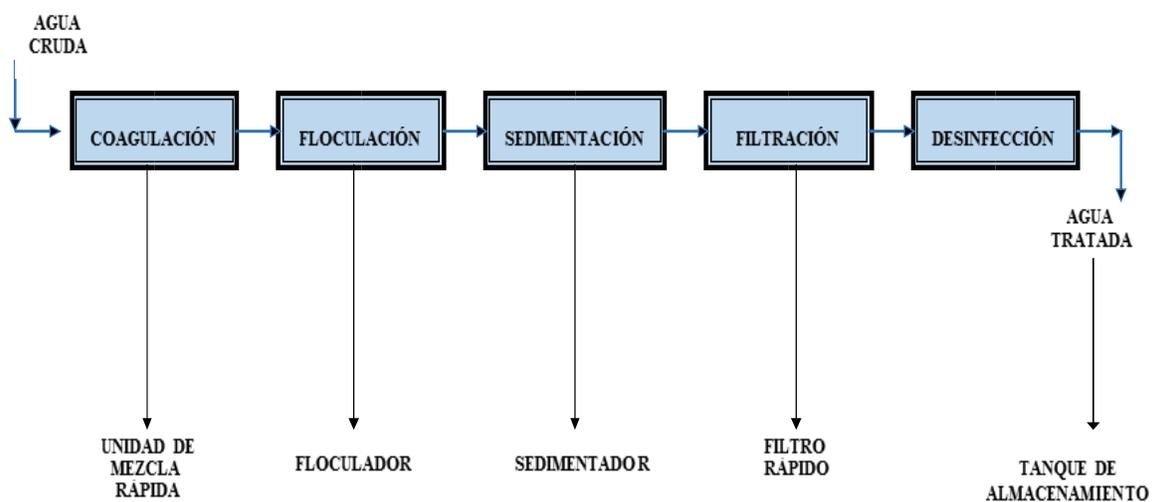


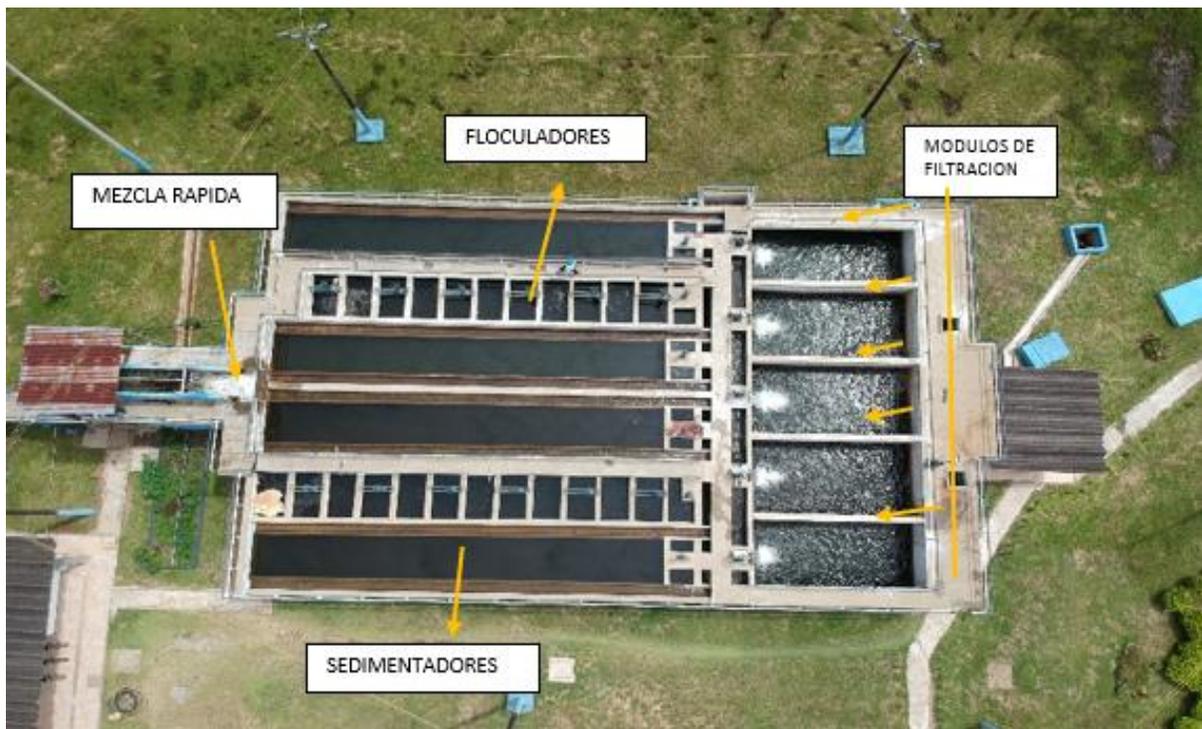
Ilustración 11. Diagrama de Proceso de Ecaaas-ESP

Diagrama de flujo para la planta de tratamiento de agua potable, que utiliza coadyuvante en el proceso de coagulación-floculación.

En este se muestra las operaciones que anteceden al agua tratada, en la PTAP de ECAAAS-ESP. Inicia con la entrada de agua cruda, pasando por la coagulación a través de la unidad de mezcla rápida, en este se forma la mezcla homogénea entre el agua y el coagulante, realizando la mezcla perfecta, el siguiente proceso es la floculación, en estos se da la formación del floc. Los floculadores son de tipo Alabama, debido a que, estos se ajustan a la condición del coagulante de origen vegetal. En la sedimentación, encontramos sedimentadores de tipo panel de colmena. En estos se logra sedimentar una gran cantidad de lodos que no logra la floculación, con el fin de evitar la colmatación de los filtros, ya que si

el agua llega a estos con alto contenido de color y turbiedad, estos se pueden taponar. El último proceso es la desinfección, en este se logra la máxima eliminación de microorganismos, que puedan ocasionar patologías ante el consumo del agua.

Imágenes de la PTAP de ECAAAS-ESP



Ilustracion 12. Vista Superior de la PTAP de Ecaaas-ESP



Ilustracion 13. Entrada del Agua de la Planta de Tratamiento, Ecaas ESP



Ilustracion 14. Mezcla Rapida- Ecaas -ESP

#### 6.4. DISEÑO DE LA CÁMARA DE LA CÁMARA DE AQUIETAMIENTO

En el desarrollo del diseño de la cámara de quietamiento se tomaron en cuenta los siguientes parámetros:

- Tiempo de retención hidráulica (TRH) = 30 s
- Velocidad ascensional (Vasc) = 0,004 m/s

Determinación del volumen de la cámara

- Calculo del volumen de la cámara:

$$V = Q_{AC} * TRH$$

$$V = 0.135 \left( \frac{m^3}{s} \right) * 30(s) = 4.05m^3$$

- Calculo del área de la sección transversal de la cámara:

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

$$A = \frac{0.135m^3/s}{0.04m/s} = 3.375m^2$$

- Teniendo los anteriores valores, se determina la altura:

$$H = \frac{V}{A}$$

$$H = \frac{4.05m^3}{3.375m^2} = 1.2m$$

Borde libre=0.5m (asumido).

- A partir de los cálculos anteriores las dimensiones de la cámara de quietamiento son:

H=1.7m (altura).

B=1m (ancho).

L=3.375m (largo).

Borde libre de la cámara 0,5 metros

## 6.5. MEZCLA RAPIDA – CANAL CON CAIDA TIPO ESCALON

- $H_a$ , altura del agua en el canal de entrada.

Donde:

Q = Caudal de diseño (m<sup>3</sup>/s)

n = coeficiente de Manning

$H_a$  = Altura del agua en el canal de entrada (m)

B = Ancho del canal (m)

RH = radio hidráulico (m)

S = pendiente en el canal (%)

Se asume S= 0.5%, B=0.03 m, con n=0.009 (acrílico), reemplazando en la

$$Q = \frac{1}{n} * H_a * B * \left( \frac{H_a * B}{2H_a + B} \right)^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}$$

Asumiendo S=0.05, B=0.03 y n=0.009, se reemplaza en la ecuación anterior:

$$0.004 = \frac{1}{0.009} * H_a * 0.03 * \left( \frac{H_a * 0.03}{2H_a + 0.03} \right)^{\frac{2}{3}} * (0.05)^{\frac{1}{2}}$$

$$H_a = 0.097 \text{ m}$$

Numero de froude de aproximación (#F).

Se cheque el número de Froude en el canal de aproximación para determinar el régimen del flujo, entonces:

$$\#F = \frac{\left(\frac{Q}{B}\right)}{H_a * \sqrt{g * H_a}}$$

$$\#F = \frac{\left(\frac{0.004}{0.03}\right)}{0.097 * \sqrt{9.81 * 0.097}} = 1.40$$

Altura crítica (hc).

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{\left(\frac{Q}{B}\right)^2}{g}}$$

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{\left(\frac{0.004 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)}{0.03 \text{ m}}\right)^2}{9.81 \text{ m/s}^2}} = 0.1219 \text{ m}$$

Altura del agua inmediatamente antes del resalto (h1).

Asumiendo h=1m

$$h_1 = 0.54h \left(\frac{h_c}{h}\right)^{1.275}$$

$$h_1 = 0.54 * 1 \left( \frac{0.1219}{1} \right)^{1.275} = 0.037\text{m}$$

Numero de froude inmediatamente antes del resalto (#F1).

$$\#F1 = \frac{\left( \frac{Q}{B} \right)}{h_1 * \sqrt{g * h_1}}$$

$$\#F1 = \frac{\left( \frac{0.004 \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)}{0.03\text{m}} \right)}{0.037\text{m} * \sqrt{\frac{9.81\text{m}}{\text{s}^2} * 0.037\text{m}}} = 5.98\text{m}$$

Altura del agua en el canal de salida (h<sub>2</sub>).

$$h_2 = 1.66h \left( \frac{hc}{h} \right)^{0.81}$$

$$h_2 = 1.66 * 1 \left( \frac{0.1219}{1} \right)^{0.81} = 0.3018\text{m}$$

Longitud de desarrollo del resalto (L<sub>r</sub>).

$$L_r = 6 * (h_2 - h_1)$$

$$L_r = 6 * (0.3018 - 0.037) = 1.5888\text{m}$$

Longitud de caída (L<sub>c</sub>).

$$L_c = 4.3h * \left( \frac{hc}{h} \right)^{0.81}$$

$$L_c = 4.3 * 1 * \left( \frac{0.1219}{1} \right)^{0.81} = 0.7819\text{m}$$

Altura de agua junto al muro de caída (reflujo)

$$h_p = h * \left(\frac{hc}{h}\right)^{0.66}$$

$$h_p = 1 * \left(\frac{0.1219}{1}\right)^{0.66} = 0.2493\text{m}$$

Volumen de mezcla ( $V_m$ )

$$V_m = \frac{h_1 + h_2}{2} * L_r * B$$

$$V_m = \frac{0.037\text{m} + 0.3018\text{m}}{2} * 1.5888\text{m} * 0.03 = 8.07 * 10^{-3}\text{m}^3$$

Perdida de la carga total ( $\Delta h$ )

$$\Delta h = h + H_a - h_2$$

$$\Delta h = 1\text{m} + 0.097 - 0.3018\text{m} = 0.7952\text{m}$$

Gradiente de velocidad ( $G$ ).

$$G = \sqrt{\frac{\gamma * Q * \Delta h}{\mu * V_m}}$$

$$G = \sqrt{\frac{999.93\text{Kgf/m}^3 * 0.004 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right) * 0.7952\text{m}}{0.000141\text{Kgf} * \text{s/m}^2 * 8.07 * 10^{-3}\text{m}^3}} = 1671.885\text{s}^{-1}$$

El gradiente debe estar dentro del rango  $1000 \text{ s}^{-1} < G < 2000 \text{ s}^{-1}$  (3), para nuestro diseño  $G=1670,468 \text{ s}^{-1}$ , por lo tanto cumple.

Altura del murete de salida (y).

$$y = h_2 - H_a$$

$$y = 0.3018\text{m} - 0.097\text{m} = 0.2048\text{m}$$

Orificio de paso de flujo entre la cámara de aquietamiento y el canal de aproximación.

$$H_o = 0.7\text{m}$$

$$B_o = 0.02\text{m}$$

$$Q_o = 0.004 \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$$

Entonces:

$$A_o = 0.7\text{m} * 0.02\text{m} = 0.014\text{m}^2$$

$$V_o = \frac{Q_o}{A_o} = \frac{0.004 \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)}{0.014\text{m}^2} = 0.2857\text{m/s}$$

Tomando el coeficiente  $K=0.5$ , se hallan las pérdidas en el orificio.

$$H_{fo} = K \frac{(V_o)^2}{2 * g} = 0.5 \frac{(0.2857)^2}{2 * 9.81} = 2.106 * 10^{-3}$$

Tiempo de mezcla rápida ( $T_{mr}$ ).

$$T_{mr} = \frac{L_r}{V_{med}}$$

$$V_{med} = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

$$V_1 = \frac{Q}{B * h_1} = \frac{0.004 \left(\frac{m^3}{s}\right)}{0.03m * 0.037m} = 3.6036 \left(\frac{m}{s}\right)$$

$$V_2 = \frac{Q}{B * h_2} = \frac{0.004 \left(\frac{m^3}{s}\right)}{0.03m * 0.3018m} = 0.4417 \left(\frac{m}{s}\right)$$

$$V_{med} = \frac{3.6036 \left(\frac{m}{s}\right) + 0.4417 \left(\frac{m}{s}\right)}{2} = 2.02265 \left(\frac{m}{s}\right)$$

$$T_{mr} = \frac{1.5888m}{2.02265 \left(\frac{m}{s}\right)} = 0.7855s$$

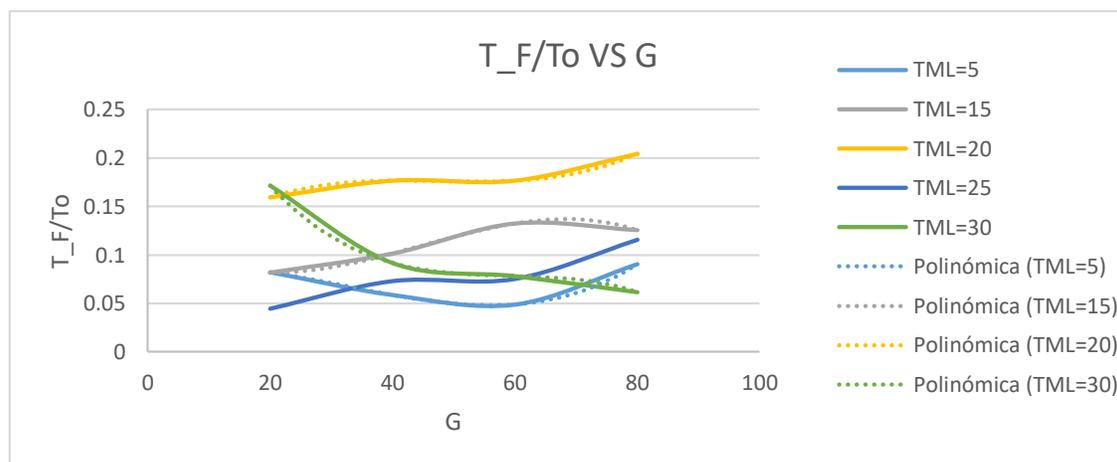
## 6.6. DISEÑO DEL FLOCULADOR DEL FLUJO HORIZONTAL

### 6.6.1 DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL ECUACION DE CAMP PARA EL DISEÑO DEL FLOCULADOR, UTILIZANDO LOS DATOS DE HIDROXICLORURO DE ALUMINIO Y ALMIDÓN DE PLÁTANO COMO COADYUVANTE.

Con el fin de hallar la ecuación de Camp, se realizaron distintas pruebas a condiciones constantes de color, turbiedad y pH.

TURBIEDA D INICIAL	T M	5		10		15		20		25		30	
		T <sub>F</sub> (NTU)	T <sub>F</sub> /T <sub>o</sub>										
120	80	1,2	0,090	1,5	0,112	1,67	0,125	2,72	0,204	1,54	0,116	0,82	0,061
80	60	0,65	0,048	0,81	0,060	1,76	0,132	2,35	0,176	1	0,075	1,04	0,078
40	40	0,78	0,058	0,94	0,070	1,35	0,101	2,35	0,176	0,97	0,073	1,22	0,091
20	20	1,09	0,081	0,55	0,041	1,09	0,082	2,12	0,159	0,59	0,044	2,28	0,171

Tabla 14. Cociente de Tfinal/Tinicial tiempos y revoluciones distintas.



Para determinar el gradiente óptimo, cada ecuación se modelo bajo los lineamientos de una ecuación cúbica, de esta forma, se determinó el mínimo de la función en cada modelo y se calculó el gradiente óptimo.

LOG(TML)	0,698970004	1	1,176091259	1,301029996	1,397940009	1,47712125
TML	5	10	15	20	25	30
G	9,461937716	2,32092002	6,25	3,163782668	30,00416846	30,0009035
LOG(G)	0,975980085	0,36566018	0,795880017	0,500206643	1,477181595	1,47713433

Tabla 15. Gradiente optimo

Estos datos fueron ajustados bajo el método de mínimos cuadrados, los resultados se muestran a continuación.

TML	Xi (LOG(TML))	G	Yi(LOG(G))	Xi^2	XiYi
5	0,698970004	9,46193772	0,975980085	0,488559067	0,682180804
10	1	2,32092002	0,365660175	1	0,365660175
15	1,176091259	6,25	0,795880017	1,38319065	0,936027532
20	1,301029996	3,16378267	0,500206643	1,69267905	0,650783846
25	1,397940009	30,0041685	1,477181595	1,954236268	2,065011252
30	1,477121255	30,0009035	1,477134334	2,181887201	2,18190652
SUMA	7,051152522	81,2017123	5,592042849	8,700552235	6,881570129

Tabla 16. Ajuste de mínimos cuadrados.

$$b = \frac{N(\sum Xi * Yi) - (\sum Xi)(\sum Yi)}{N(\sum Xi^2) - (\sum Xi)^2}$$

$$b=0,748250234$$

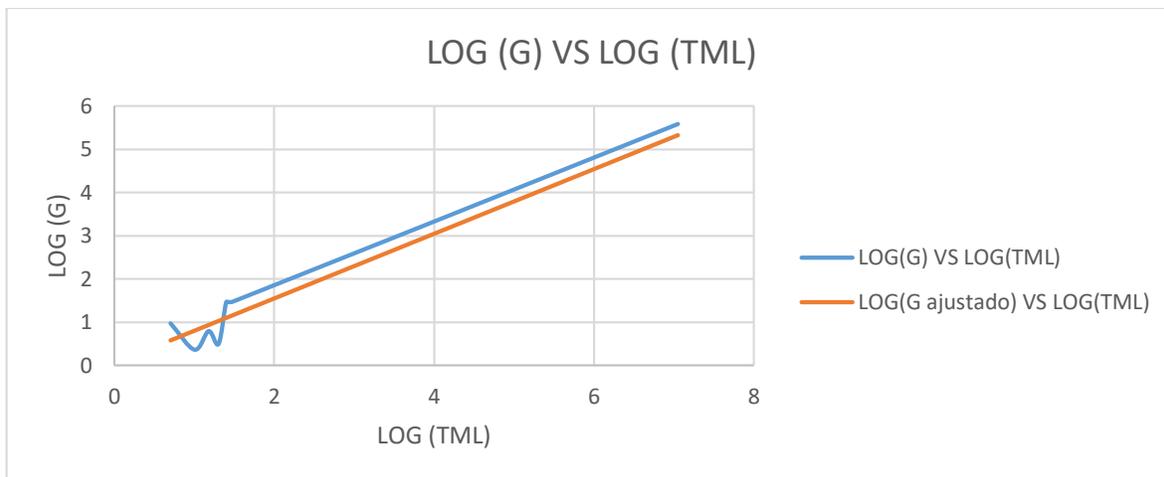
$$a = \frac{(\sum Yi)(\sum Xi^2) - (\sum Xi)(\sum Yi * Xi)}{N(\sum Xi^2) - (\sum Xi)^2}$$

$$a=0,052669387$$

Esto con el fin de determinar la siguiente ecuación

$$Y = 0,748250234X + 0,052669387$$

Esta ecuación se utilizó para ajustar los datos del gradiente, tal como se muestra en la ecuación.



Calculando la ecuación de campo a partir de los datos ajustados.

$$\text{Log}(G) = 0,748250234 * \text{Log}(TML) + 0,052669387$$

$$\text{Log}(G) - 0,748250234 * \text{Log}(TML) = 0,052669387$$

$$\text{Log}(G) - \text{Log}(TML^{0,748250234}) = 0,052669387$$

$$\text{Log}\left(\frac{G}{TML^{0,748250234}}\right) = 0,052669387$$

$$\frac{G}{TML^{0,748250234}} = 1,128936169$$

$$G = 1,128936169 * TML^{0,748250234}$$

Ecuación de campo experimental.

CUADRO DE CONVENCIONES		
SIMBOLO	UNIDAD	
A	m <sup>2</sup>	Área seccional del flujo.
SIMBOLO	m	Separación entre placas.
M	m	Separación entre el extremo de la placa y la pared del canal.
L	m	Longitud de recorrido del agua.
N	unidad	Numero de tabiques.
Δh	m	Perdida de carga total.
G	s	Gradiente de velocidad.
Lc	m	Longitud del canal principal.
T	S	Tiempo de detención.
h	m	Altura del tabique - borde libre (Altura lámina de agua).
Q	m <sup>3</sup> /s	Caudal de diseño.
V	m/s	Velocidad del flujo.
Ltab	m	Largo del tabique.
n	adimensional	Coefficiente de Manning.
e	m	Espesor del tabique.
μ	Kgf*s/m <sup>2</sup>	Viscosidad absoluta.
RH	m	Radio hidráulico
*		Valor corregido.

Tabla 17. Cuadro de convecciones..

### 6.6.2 DISEÑO DEL PRIMER COMPARTIMIENTO DE FLOCULACIÓN.

Con un TML de 5 minutos, la ecuación de camp experimental arrojo el siguiente resultado

$$G = 1,128936169 * (5 * 60)^{0,748250234}$$

T	300	n	0,009
h	2	μ	0,000141
Q	0,04	e	0,004
V	0,13	G	80,570
E	1	K	9
Ltab	1	ρ	993,504

$$G = 80,570$$

Tabla 18. Datos de inicio primer compartimiento del floculador

A	0,307	L1	39	RH	0,096
S	0,154	V*	0,13	s	3,1142E-05
M	0,154	L2	39	hfc	0,0012
L	39	Nc*	33,8	hfo	0,255
Nc	33,8	L*	39	hf	0,256
N	32,8	N*	32,8	G	77,504

Tabla 19 Resultados de diseño del primer compartimiento del floculador

$$a) A = \frac{Qo}{V} = \frac{0.04 \left( \frac{m^3}{s} \right)}{0.13 \left( \frac{m}{s} \right)} = 0.307692m^2$$

$$b) S = \frac{A}{h} = \frac{0.030769231m^2}{2m} = 0.153846155m$$

- c) El factor E para el cálculo del espacio M entre el borde del tabique y la pared del floculador se toma entre 1 y 1.5.

$$M = E * S = 1 * 0.153846155m = 0.153846155m$$

- d) Calculo de la longitud de recorrido del agua en el floculador L.

$$L = V * T = 0.13 \left( \frac{m}{s} \right) * 300s = 39m$$

- e) Asumiendo un largo del tabique  $L_{Tab}$ , se halla el número de canales que tendrá nuestro compartimiento de floculación.

$$Nc = \frac{L}{L_{tab} + M} = \frac{39m}{1 + 0.153846155m} = 33.8$$

- f) Habiendo calculado el número de canales se determina la cantidad de tabiques N.

$$N = N_c * 1 = 33.8 - 1 = 32.8$$

- g) Conociendo el número de canales se realiza una primera corrección de la longitud de recorrido del agua.

$$L_1 = N_c * (L_{Tab} + M) = 33.8 * (1 + 0.153846155m) = 39m$$

- h) Con la separación de tabiques calculada se determina la velocidad real del flujo en el comportamiento.

$$V^* = \frac{Q_0}{S * h} = \frac{0.04 \left( \frac{m^3}{s} \right)}{0.153846155m * 2m} = 0.13m/s$$

- i) Usando la velocidad real  $V^*$ , se corrige nuevamente la longitud del recorrido de agua  $L_2$ .

$$L_2 = (V^*) * T = 0.13 \left( \frac{m}{s} \right) * 300s = 39m$$

- j) Se calcula el número de canales corregidos.

$$N_c^* = \frac{L_2}{L_{Tab} + M} = \frac{39m}{1 + 0.153846155m} = 33.8$$

- k) Conociendo el número de canales se procede a corregir la longitud la cual será la longitud definitiva del recorrido del agua.

$$L^* = N_c * (L_{Tab} + M) = 33.8(1 + 0.153846155m) = 39m$$

- l) El número de tabiques definitivo será:

$$N^* = (Nc^*) - 1 = 33.8 - 1 = 32.8$$

m) Se halla la pendiente  $s$  a lo largo del recorrido del agua.

$$s = \left[ \frac{(V^*) * n}{(RH)^{\frac{2}{3}}} \right]^2 = \left( \frac{0.13 \left( \frac{m}{s} \right) * 0.009}{(0.096)^{\frac{2}{3}}} \right)^2 = 3.1141 * 10^{-5}$$

$$RH = \frac{A}{2 * \left( \frac{A}{b} \right) + b}$$

$$RH = \frac{0.30769231}{2 * \left( \frac{0.30769231}{3} \right) + 3} = 0.096$$

n) Calculo de pérdidas por el recorrido del agua en el canal.

$$hfc = s * (L^*) = 3.1141 * 10^{-5} * 39m = 1.2145 * 10^{-3}$$

o) Se deducen las perdidas por los giros del agua en los tabiques (se calcula como perdidas en un orificio).

$$hfo = K \frac{(V^*)^2}{2 * g} * (N^*) = 9 * \frac{\left( 0.13 \left( \frac{m}{s} \right) \right)^2}{2 * 9.81} * 32.8 = 0.254275$$

p) Las pérdidas totales serán:

$$hf = hfc + hfo$$

$$hf = 1.2145 * 10^{-3} + 0.254275 = 0.2554895$$

q) Se determina el gradiente de velocidad en el compartimiento

$$G = \sqrt{\frac{\rho * hf}{\mu * T}}$$

$$G = \sqrt{\frac{993.504 * 0.2554895}{0.000141 * 300}} = 77.5$$

Al comparar el gradiente experimental con el teórico, la diferencia de magnitudes entre ellos es 3,067. Este valor está dentro del rango permisible ( $\pm 5 \text{ s}^{-1}$ ).

### 6.6.3 DISEÑO DEL SEGUNDO COMPARTIMIENTO DE FLOCULACIÓN

Con un TML de 5 minutos, la ecuación de camp experimental arrojo el siguiente resultado

$$G = 1,128936169 * (7 * 60)^{0,748250234}$$

$$G = 103,637$$

T	420	n	0,009
h	2	$\mu$	0,000141
Q	0,04	e	0,004
V	0,16	G	103,637
E	1	K	9
Ltab	1	$\rho$	993,504

Tabla 20 Datos de diseño del segundo compartimiento del floculador.

A	0,25	L1	67,2	RH	0,07894737
S	0,125	V*	0,16	s	6,1227E-05
M	0,125	L2	67,2	hfc	0,00411444

L	67,2	Nc*	59,7333333	hfo	0,69041633
Nc	59,7333333	L*	67,2	hf	0,69453077
N	58,7333333	N*	58,7333333	G	107,943465

Tabla 21. Resultados de diseño del segundo compartimiento del floculador.

Comparando los resultados experimentales con los teóricos la diferencia es 4,306, cumple la condición de diseño ( $\pm 5 \text{ s}^{-1}$ ).

$$a) A = \frac{0.04 \left( \frac{m^3}{s} \right)}{0.16 \left( \frac{m}{s} \right)} = 0.25 m^2$$

$$b) S = \frac{0.25 m^2}{2m} = 0.125 m$$

c) El factor **E** para el cálculo del espacio **M** entre el borde del tabique y la pared del floculador se toma entre 1 y 1.5.

$$M = 1 * 0.125 m = 0.125 m$$

d) Cálculo de la longitud de recorrido del agua en el floculador **L**.

$$L = 0.16 \left( \frac{m}{s} \right) * 420 s = 67.2 m$$

e) Asumiendo un largo del tabique **L<sub>Tab</sub>**, se halla el número de canales que tendrá nuestro compartimiento de floculación.

$$Nc = \frac{67.2 m}{1 + 0.125 m} = 59.733$$

f) Habiendo calculado el número de canales se determina la cantidad de tabiques **N**.

$$N = 59.733 - 1 = 58.733$$

- g) Conociendo el número de canales se realiza una primera corrección de la longitud de recorrido del agua.

$$L1 = 59.733 * (1 + 0.125m) = 67.2m$$

- h) Con la separación de tabiques calculada se determina la velocidad real del flujo en el comportamiento.

$$V * = \frac{0.04 \left( \frac{m^3}{s} \right)}{0.125m * 2m} = 0.16m/s$$

- i) Usando la velocidad real  $V^*$ , se corrige nuevamente la longitud del recorrido de agua  $L_2$ .

$$L_2 = 0.16 \left( \frac{m}{s} \right) * 420s = 67.2m$$

- j) Se calcula el número de canales corregidos.

$$Nc * = \frac{67.2m}{1 + 0.125m} = 59.733$$

- k) Conociendo el número de canales se procede a corregir la longitud la cual será la longitud definitiva del recorrido del agua.

$$L * = 59.733(1 + 0.125m) = 67.199m$$

- l) El número de tabiques definitivo será:

$$N * = 59.733 - 1 = 58.733$$

m) Se halla la pendiente  $s$  a lo largo del recorrido del agua.

$$s = \left( \frac{0.16 \left( \frac{m}{s} \right) * 0.009}{(0.07894737)^{\frac{2}{3}}} \right)^2 = 6.1226 * 10^{-5}$$

$$RH = \frac{0.25m^2}{2 * \left( \frac{0.25m^2}{3} \right) + 3} = 0.07894737$$

n) Calculo de pérdidas por el recorrido del agua en el canal.

$$hfc = 6.1226 * 10^{-5} * 67.199m = 4.1143 * 10^{-3}$$

o) Se deducen las perdidas por los giros del agua en los tabiques (se calcula como perdidas en un orificio).

$$hfo = 9 * \frac{\left( 0.16 \left( \frac{m}{s} \right) \right)^2}{2 * 9.81} * 58.733 = 0.69$$

p) Las pérdidas totales serán:

$$hf = 4.1143 * 10^{-3} + 0.69 = 0.6941143$$

q) Se determina el gradiente de velocidad en el compartimiento

$$G = \sqrt{\frac{993.504 * 0.6941143}{0.000141 * 420}} = 107.911$$

### 6.6.4 DISEÑO DEL TERCER COMPARTIMIENTO DE FLOCULACIÓN

Con un TML de 8 minutos, la ecuación de campo experimental arroja el siguiente resultado

$$G = 1,128936169 * (8 * 60)^{0,748250234}$$

$$G = 114,527$$

T	8	n	0,009
h	2	$\mu$	0,000141
Q	0,04	e	0,004
V	0,17	G	
E	1	K	9
Ltab	1	$\rho$	993,504

Tabla 22. Datos de diseño del tercer compartimiento del floculador.

A	0,235	L1	81,6	RH	0,075
S	0,118	V*	0,17	s	7,4629E-05
M	0,118	L2	81,6	hfc	0,006
L	81,6	Nc*	73,011	hfo	0,956
Nc	73,010	L*	81,6	hf	0,962
N	72,011	N*	72,011	G	118,816

Tabla 23. Resultados de diseño del tercer compartimiento del floculador.

a) El valor teórico y el experimental difieren en un  $4,2886 \text{ s}^{-1}$ , se encuentran dentro de

los valores permisibles ( $\pm 5 \text{ s}^{-1}$ ).  $A = \frac{0,04 \left(\frac{m^3}{s}\right)}{0,17 \left(\frac{m}{s}\right)} = 0,23529411 m^2$

$$b) S = \frac{0.23529411m^2}{2m} = 0.11764706m$$

- c) El factor **E** para el cálculo del espacio **M** entre el borde del tabique y la pared del floculador se toma entre 1 y 1.5.

$$M = 1 * 0.11764706m = 0.11764706m$$

- d) Calculo de la longitud de recorrido del agua en el floculador **L**.

$$L = 0.17 \left( \frac{m}{s} \right) * 480s = 81.6m$$

- e) Asumiendo un largo del tabique **L<sub>Tab</sub>**, se halla el número de canales que tendrá nuestro compartimiento de floculación.

$$Nc = \frac{81.6m}{1 + 0.11764706m} = 73.01052624$$

- f) Habiendo calculado el número de canales se determina la cantidad de tabiques **N**.

$$N = 73.01052624 - 1 = 72.01052624$$

- g) Conociendo el número de canales se realiza una primera corrección de la longitud de recorrido del agua.

$$L1 = 73.01052624 * (1+0.11764706m)=81.6m$$

- h) Con la separación de tabiques calculada se determina la velocidad real del flujo en el comportamiento.

$$V^* = \frac{Q_0}{S \cdot h} = \frac{0.04 \left(\frac{m^3}{s}\right)}{0.11764706m \cdot 2m} = 0.17m/s$$

- i) Usando la velocidad real  $V^*$ , se corrige nuevamente la longitud del recorrido de agua  $L_2$ .

$$L_2 = 0.17 \left(\frac{m}{s}\right) \cdot 480s = 81.6m$$

- j) Se calcula el número de canales corregidos.

$$Nc^* = \frac{81.6m}{1 + 0.11764706m} = 73.01052624$$

- k) Conociendo el número de canales se procede a corregir la longitud la cual será la longitud definitiva del recorrido del agua.

$$L^* = 73.01052624(1 + 0.11764706m) = 81.6m$$

- l) El número de tabiques definitivo será:

$$N^* = 73.01052624 - 1 = 72.01052624$$

- m) Se halla la pendiente  $s$  a lo largo del recorrido del agua.

$$s = \left[ \frac{(V^*) \cdot n}{(RH)^{\frac{2}{3}}} \right]^2 = \left( \frac{0.17 \left(\frac{m}{s}\right) \cdot 0.009}{(0.07453)^{\frac{2}{3}}} \right)^2 = 7.46 \cdot 10^{-5}$$

$$RH = \frac{0.23529411m^2}{2 \cdot \left(\frac{0.23529411m^2}{3}\right) + 3} = 0.07453$$

- n) Calculo de pérdidas por el recorrido del agua en el canal.

$$hfc = 7.46 * 10^{-5} * 81.6m = 6.08736 * 10^{-3}$$

- o) Se deducen las pérdidas por los giros del agua en los tabiques (se calcula como pérdidas en un orificio).

$$hfo = 9 * \frac{\left(0.17 \left(\frac{m}{s}\right)\right)^2}{2 * 9.81} * 72.01052624 = 0.955$$

- p) Las pérdidas totales serán:

$$hf = 6.08736 * 10^{-3} + 0.955 = 0.96108$$

- q) Se determina el gradiente de velocidad en el compartimiento.

$$G = \sqrt{\frac{993.504 * 0.96108}{0.000141 * 480}} = 118.8$$

## 6.7. DISEÑO DE UN SEDIMENTADOR DE ALTA TASA

Al igual que el floculador, el diseño del sedimentador fue llevado a cabo con los lineamientos del ras 2017.

- C.H.S=39.89 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>-día.
- V<sub>sc</sub>= 0.047 cm/s.
- Q=0.004m<sup>3</sup>/s.
- Placas en acrílico, (1,2 x 4,8) m, e=0.004 m.
- V (T= 7 °C)=0.01429 cm<sup>2</sup>/s
- θ= 60°

Calculo de la velocidad del agua en el sedimentador

$$V_o = \frac{Q}{A * \text{sen } \theta}$$

Suponiendo el área del sedimentador  $A = 0,9 \text{ m}^2$

$$V_o = \frac{0,004 \text{ m}^3/\text{s}}{0,9 * \text{sen}60}$$

$$V_o = 0,0051 \text{ m/s}$$

Se Calcula Reynolds

$$R = V_o * \frac{e}{\nu}$$

$$R = 0,51 \frac{\text{cm}}{\text{s}} * \frac{0,4\text{cm}}{\frac{0.01429\text{cm}^2}{\text{s}}}$$

$$R = 1,45$$

Se determina el caudal entre placas.

$$Q_o = V_o * A$$

$$Q_o = 0,0051 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0,9 \text{ m}^2$$

$$Q_o = 0,0046 \text{ m}^3$$

Se establecen el número de ductos que tendrá el sedimentador

$$Nd = \frac{Q_{\text{diseño}}}{Q_0}$$

$$Nd = \frac{0,04 \text{ m}^3/\text{s}}{0,0046 \text{ m}^3/\text{s}}$$

$$Nd = 9$$

Con el número de ductos puede hallar el número de placas

$$Np = Nd + 1$$

$$Np = 10$$

Se establece la longitud del sedimentador L

$$L = L_{\text{man}} + l * \cos\theta + \frac{Np * e + Np * ep}{\text{sen}\theta}$$

Se estableció previamente  $l=4,8$  m y se asume  $L_{\text{mantenimiento}}=0,1$  m. se enmarca  $ep=0,05$

$$L = 0,6 * \cos 60 + \frac{10 * 0,4 + 10 * 0,05}{\text{sen} 60}$$

$$L = 5,49 \text{ m}$$

Volumen útil de floculación,

$$Vu = (L - L_{\text{mto}}) * Ap * Bp$$

Donde

- altura proyectada ( $A_p$ )= 1,2 m
- base de la placa ( $B_p$ )=1,04 m

$$V_u = 6,47 m^3$$

Volumen de lodos,

$$V_L = 0,2 * 6,47 m^3 = 1,294$$

Con el volumen de lodos, se calcula la zona de lodos,

$$Z = 2 * \frac{V_L}{B_1 * L + B_2 * L}$$

$$Z = 2 * \frac{1,294 m^3}{0,6 * 5,49 + 0,2 * 5,49}$$

$$Z = 0,590 \text{ m}$$

Se toma la altura de los lodos como 0,59 m y se verifica la heurística de diseño.

$$m = \frac{0,59 m}{0,59 m} * 100\% = 100\%$$

$m > 15\%$  (ras 2017).

El gradiente del ducto según Camp es:

$$Gd = n * \left(\frac{\rho}{\mu}\right)^{0,5} * (RH)^{-\frac{2}{3}} * V^{1,5}$$

Donde

$$RH = 0,291$$

$V=0,15$ ; según lo establece el ras 2017

$$Gd=3,171 \text{ S}^{-1}$$

Con el fin de evitar la formación del floc, se debe precisar que el gradiente del ultimo compartimiento de la floculación  $> Gd$

G último compartimiento =118,816 por tanto, se cumple la condición de diseño.

Salida del agua sedimentada

$$hc = \left(73 * \frac{q}{b}\right)^{2/3}$$

Donde, q es el caudal que transporta la canaleta y b el ancho de la canaleta, el cual, se asume en

$$hc=0,82 \text{ m}$$

Tomando como borde libre 0,01 m, la altura total de la canaleta es:

$$htc = 0,82 + 0,01 = 0,83$$

la altura del vertedero

$$Q = \left(\frac{8}{15}\right) * \text{RAIZ}(2 * g) * \tan\left(\frac{\beta}{2}\right) * \left(0,565 + \left(\frac{0,0087}{H^{0,5}}\right)\right) * H^{2/5}$$

Iterando

$$H=0,195\text{m}$$

## 6.8. DISEÑO DE FILTRO RAPIDO DE ARENA

Se tendrán en cuenta los siguientes parámetros para el diseño de los filtros.

- *Tasa de filtración: 120 m/d*
- *Medio filtrante: Arena*
- *Duración carrera: 12 horas*
- *Perdida de carga: 30 centímetros*
- *Drenaje: Falso fondo*

### 6.8.1 NUMERO DE FILTROS

Para establecer el número de filtros necesario, se usará la ecuación de morrill y wallace

$$n = 0,44 * (Q^{0,5}) = 3$$

### 6.8.2 CAUDAL UNITARIO

$$Qu = \frac{Q}{n} = \frac{3456 \left( \frac{m^3}{dia} \right)}{3}$$

$$Qu = 1152 \text{ m}^3/\text{dia}$$

### 6.8.3 ÁREA SUPERFICIAL

$$As = \frac{Qu}{Cs}$$

$$As = \frac{1152 \left( \frac{m^3}{dia} \right)}{120 \left( \frac{m}{dia} \right)}$$

$$As = 9,6 \text{ m}^2$$

### 6.9. MODELAMIENTO DEL SULFATO DE ALUMINIO Y EL COADYUVANTE VEGETAL.

TURBIEDA R M	T M L	5		10		15		20		25		30	
		$T_F$ (NTU)	$T_F/T_0$										
120	80	4,5	0,34	5,21	0,39	2,46	0,18	2,25	0,17	0,89	0,07	0,109	0,01
80	60	2,71	0,21	1,58	0,12	2,71	0,21	3,15	0,24	0,25	0,02	1,89	0,14
40	40	2,71	0,20	4,95	0,37	2,25	0,17	2,05	0,15	0,36	0,02	1,84	0,14
20	20	11,4	0,86	3,51	0,26	2,78	0,21	1,1	0,08	0,95	0,07	1,94	0,15

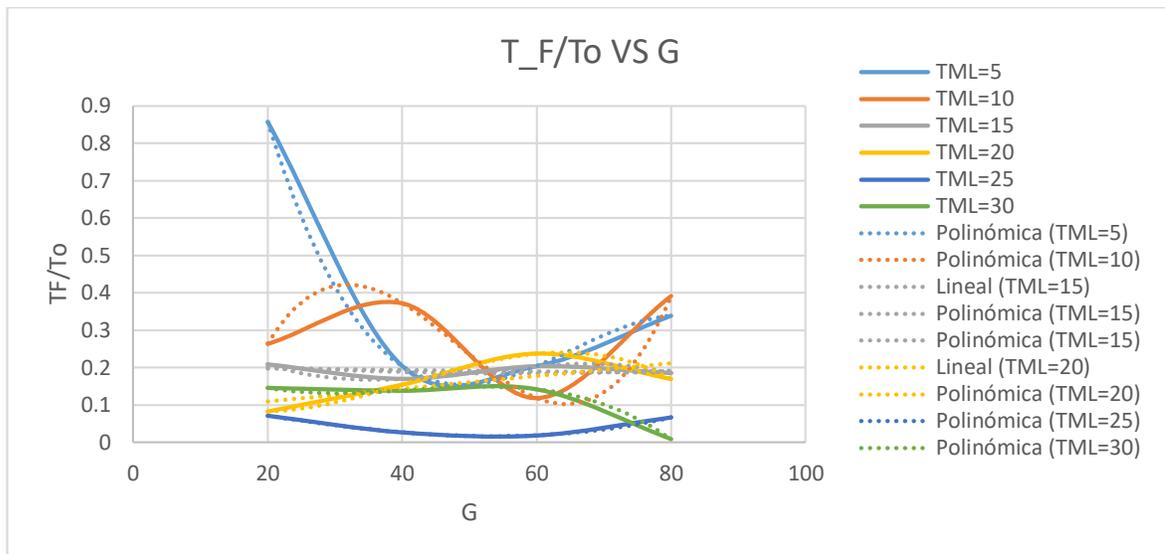
Tabla 24. Turbiedades Frente a distintos tiempos y gradientes de velocidad

TML	ECUACIÓN	VALOR_ITER
5	$5,60354E-08$	45,6416038
10	$3,89212E-08$	33,74540014
15	$-0,009925$	75
20	$2,6174E-09$	19,32744011
25	$-7,82795E-10$	56,07183843
30	$3,53827E-09$	26,56281439

Tabla 25. Ajustes de kis gradientes de velocidad

TML	$X_i$ (LOG(TML))	G	$Y_i$ (LOG(G))	$X_i^2$	$X_i Y_i$
5	0,698970004	45,6416038	1,659360897	0,48855907	1,15984349
10	1	33,74540014	1,528214582	1	1,52821458
15	1,176091259	75	1,875061263	1,38319065	2,20524316
20	1,301029996	19,32744011	1,286174336	1,69267905	1,67335139
25	1,397940009	56,07183843	1,748744796	1,95423627	2,44464031
30	1,477121255	26,56281439	1,424274088	2,1818872	2,10382553
suma	7,051152522	256,3490969	9,521829962	8,70055224	11,1151185

Tabla 26. Ajuste de mínimos cuadrados para los datos de sulfato de aluminio y almidón de plátano.



Ecuación experimental

$$\text{Log}G + b * \text{Log}TML = a$$

$$\text{Log}G + \text{Log}TML^b = a$$

$$G * TML^b = 10^a$$

$$G = \frac{10^a}{TML^b}$$

$$b = \frac{N(\sum X_i * Y_i) - (\sum X_i)(\sum Y_i)}{N(\sum X_i^2) - (\sum X_i)^2}$$

$$b = -0,180782213$$

$$a = \frac{(\sum Y_i)(\sum X_i^2) - (\sum X_i)(\sum Y_i * X_i)}{N(\sum X_i^2) - (\sum X_i)^2}$$

$$a = 1,799425486$$

$$G = \frac{1,8}{TML^{0,18}}$$

$$G = \frac{1,8}{5 * 50^{0,18}}$$

$$G_{exp} = 22,47015272$$

T	300	n	0,009
h	2	μ	0,000141
Q	0,04	e	
V	0,13	G	
E	1	K	1
Ltab	1	P	993,504
RH	0,096	b	3

Tabla 27. Datos de inicio para el diseño del primer compartimento

A	0,30769231	L1	39	RH	0,096
S	0,15384615	V*	0,13	s	3,1142E-05
M	0,15384615	L2	39	hfc	0,00121453
L	39	Nc*	33,8	hfo	0,02828163
Nc	33,8	L*	39	hf	0,02949616
N	32,8	N*	32,8	G	26,3206967

Tabla 28. Resultados de diseño para el primer compartimento

T	420	n	0,009
h	2	μ	0,000141
Q	0,04	e	
V	0,13	G	

E	1	K	1
Ltab	1	P	993,504
RH	0,009	b	3

Tabla 29. Datos de inicio para el diseño del segundo compartimiento

$$G = \frac{1,8}{7 * 50^{0,18}}$$

$$G_{exp} = 21,14407422$$

A	0,30769231	L1	54,6	RH	0,096
S	0,15384615	V*	0,13	s	3,1142E-05
M	0,15384615	L2	54,6	hfc	0,00170034
L	54,6	Nc*	47,32	hfo	0,03993918
Nc	47,32	L*	54,6	hf	0,04163952
N	46,32	N*	46,32	G	26,4303851

Tabla 30. Resultados de diseño para el segundo compartimiento

T	1080	n	0,009
h	2	μ	0,000141
Q	0,118	e	
V	0,13	G	
E	1	K	2
Ltab	3	P	993,504
RH	0,096	b	3

Tabla 31. Datos de inicio para el diseño del tercer compartimiento

$$G = \frac{1,8}{18 * 50^{0,18}}$$

$$G_{exp} = 17,82528273$$

A	0,90769231	L1	140,4	RH	0,25177809
S	0,45384615	V*	0,13	s	8,6102E-06
M	0,45384615	L2	140,4	hfc	0,00120888
L	140,4	Nc*	40,6503341	hfo	0,0341883
Nc	40,6503341	L*	140,4	hf	0,03539717
N	39,6503341	N*	39,6503341	G	15,1966433

Tabla 32. Resultados de diseño para el tercer compartimiento

En todos se cumple que el  $G_{exp}$  y el  $G$  posean una diferencia de  $\pm 5s^{-1}$ . Si se comparan los diseños de los floculadores, se puede observar que los floculadores que utilizan sulfato de aluminio pueden trabajar con tiempos de mezcla lenta mayores, que los que puede trabajar el hidroxicloriguro de aluminio, cabe resaltar que los gradientes de velocidad son menores para el sulfato de aluminio. Las dimensiones de largo, ancho y alto son mayores en los floculadores que utilizan sulfato de aluminio como coagulante y almidón de plátano como coadyuvante.

## CONCLUSIONES

El agua proveniente del río Satoca en invierno cuenta con colores altos y turbiedades bajas, el mejor coagulante químico que se adaptó a estas necesidades fue el hidroxiclورو de aluminio, además al ser un coagulante en estado líquido facilita su dosificación. La caracterización de los parámetros color, turbiedad, pH del agua, de la planta de tratamiento de agua potable de ECAAAS-ESP, determino que la calidad de la fuente es viable para una planta tipo convencional, es decir, el proceso de coagulación floculación es el idóneo para el tratamiento de estas aguas. Además, se determinó que la fuente en verano no necesita del proceso mencionado anteriormente, ya que el color y la turbiedad no sobrepasan 20 UPC y 2 NTU respectivamente, el proceso de filtración es más que suficiente para que el agua cumpla con los parámetros que establece la resolución 2115 del 2007, esto con relación a la estación de verano. Ya entrado el invierno las características del agua requieren el tratamiento de un agente coagulante, debido a que los valores de color y turbiedad sobrepasan la capacidad de remoción que ofrece el proceso de filtración por sí solo.

El almidón de plátano en su función como coadyuvante en el proceso de coagulación-floculación, obtuvo mejores resultados utilizando como base coagulante al hidroxiclورو de aluminio. Cambiando un 10 % del coagulante químico por el coagulante vegetal mejora la eficiencia del proceso en un 95,65 % a 96,92 %, con respecto al color y a la turbiedad respectivamente.

El sulfato de aluminio posee un alto poder coagulante para el tratamiento de agua potable, su eficiencia se ve notoriamente mejorada al utilizar el almidón del plátano como

coadyuvante en el proceso de coagulación-floculación, logrando una eficiencia en la remoción del 99,23 % en el color y 90,49 % en la turbidez, desde el punto de vista económico esto optimizara el proceso ya que al disminuir el gasto de insumos químicos mejorara la rentabilidad del proceso.

Aunque el porcentaje de eficiencia en relación a la remoción de color es mayor para el sulfato de aluminio que para el hidroxiclورو de aluminio. Utilizando un 10 % de coadyuvante en cada uno. Los valores de color, para el agua, utilizando sulfato de aluminio luego de la formación del floc son muy altos (ilustración 4 y 6) desde el punto de vista operacional, para una planta convencional, esto no es bueno, ya que se necesitaría un filtro con una mayor cantidad de capas para cumplir los valores permisibles para el color que se establece en la resolución 2115 del 2007, mientras que el hidroxiclورو de aluminio luego de la formación del floc arroja colores por debajo de los 20 UPC.

El tamaño de la fuente que suministra el agua, está relacionada con la continuidad en las condiciones de los parámetros fisicoquímicos, es decir, una creciente puede ser súbita, aumentando color (673 UPC) y turbiedad (66 NTU) en tiempos cortos, pero la tendencia a esos valores altos no van a perdurar, debido a el caudal manejado en la fuente, el cual es tan pequeño, que sus condiciones durara el tiempo que se prolongue la lluvia. La desventaja presente en este tipo de fuentes es el remanente de color ( $\leq 100$  UPC) dejado luego de la creciente, ya que se prolonga por tiempos cercanos a las 8 horas.

El diseño de los compartimientos del floculador, está relacionado con el caudal de diseño, a caudales altos las dimensiones del floculador, como las distancias entre tabiques, la

separación de los tabiques de la pared y el área entre los tabiques, será menor, el caudal manejado logra dimensiones desproporcionadas con relación al ancho, largo y alto . Los tiempos de mezcla lenta, poseen una relación directamente proporcional con los gradientes de velocidad, de este modo, al aumentar los tiempos de mezcla lenta, aumentara la magnitud de los gradientes. Bajo condiciones de caudales altos el ajuste al diseño de la planta se vuelve más complicado, ya que se va a requerir mayores dimensiones en todas las operaciones que conforman a la PTAP.

En el ajuste al gradiente de velocidad óptimo, es más efectivo aplicarlo a los datos del hidroxiclورو de aluminio y almidón de plátano, debido, a que estos, se ajustan mejor a un modelo polinómico cubico, los datos del sulfato de aluminio y coadyuvante vegetal no se ajustan eficientemente al modelo expuesto.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Daniela Trujillo; (2013). Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante.

Sedolfo José Carrasquero Ferrer, (2017). Efectividad de coagulantes obtenidos de residuos de papa (*Solanum tuberosum*) y plátano (*Musa paradisiaca*) en la clarificación de agua.

Arnold Arias Hoyos, (2017). Tratamiento de aguas residuales en una central de sacrificio: uso de polvo de la semilla *M. olifeira* como coagulante natural.

Ras 2017, capítulo C, reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico.

Moreno Pérez Sandy Celina, 2016. “Disminución de la turbidez del agua del río Crisnejas en la comunidad de Chuquibamba-Cajabamba utilizando *Opuntia ficus indica*, *Aloe vera* y *Caesalpinia spinosa*”

Jose Nahu Diaz Claros, 2014. “coagulantes-floculantes orgánicos e inorgánicos elaborados de plantas de reciclaje y reciclaje de la chatarra, para el tratamiento de aguas contaminadas”

Anyela Patricia Másmela Roza, Nathaly Aguilar Cristancho, 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 PTAR del Parque Agroindustrial de Occidente – PAO”

Daniela Trujillo; Luisa Fernanda Duque; Juan Sebastián Arcila; Alejandro Rincón\*; Sebastián Pacheco; Oscar Fernando Herrera. 2014. “Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano”

Fredy Leonardo Castellanos P, 2017. “revisión del uso de coagulantes naturales en el proceso de clarificación del agua en Colombia”

Monica Alejandra Bravo Gallardo, 2017. “coagulantes y floculantes naturales usados en la reducción de turbidez, sólidos suspendidos, colorantes y metales pesados en aguas residuales.”

Según Kumar, et al (2015), en su artículo “Coagulation performance evaluation of natural and synthetic coagulants in waster water treatment”

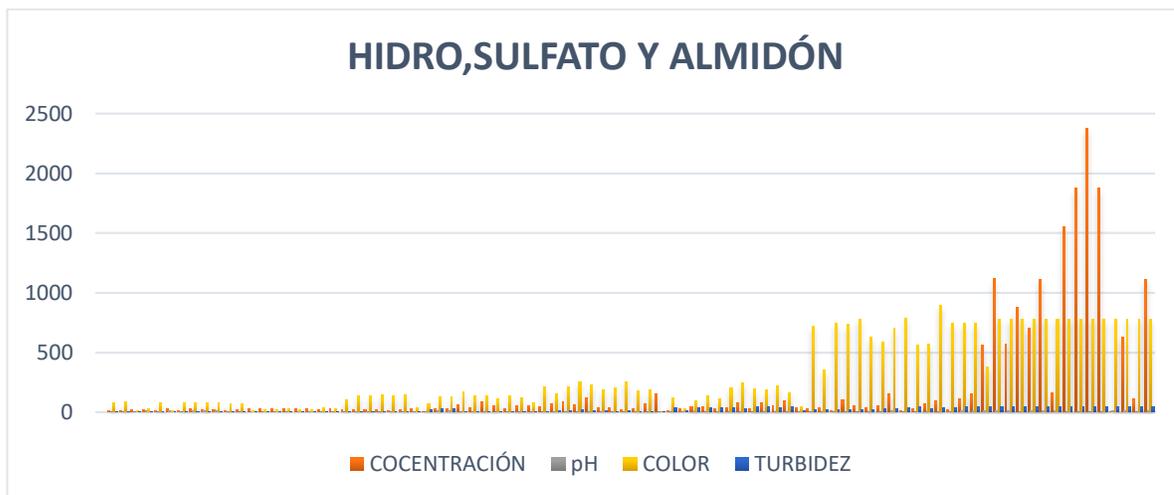
Según Contreras, et al (2015), en su artículo “El Nopal (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural complementario en la clarificación del agua”,

Según Olivero, et al (2014), en su artículo “Utilización de Tuna (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural en la clarificación de aguas crudas”

Según Ramírez y Jaramillo (2014), en su artículo “Uso potencial de agentes clarificantes y desinfectantes de origen de origen natural para el tratamiento integral del agua caracterizado por pisos térmicos”

Según Guzmán, et al (2013), en su artículo “Reducción de la turbidez del agua usando coagulantes naturales: una revisión”

## ANEXOS



ANEXO. 1 HIDROXICLORURO DE ALUMINIO, SULFATO Y ALMIDÓN



ANEXO. 2 TEST DE JARRAS



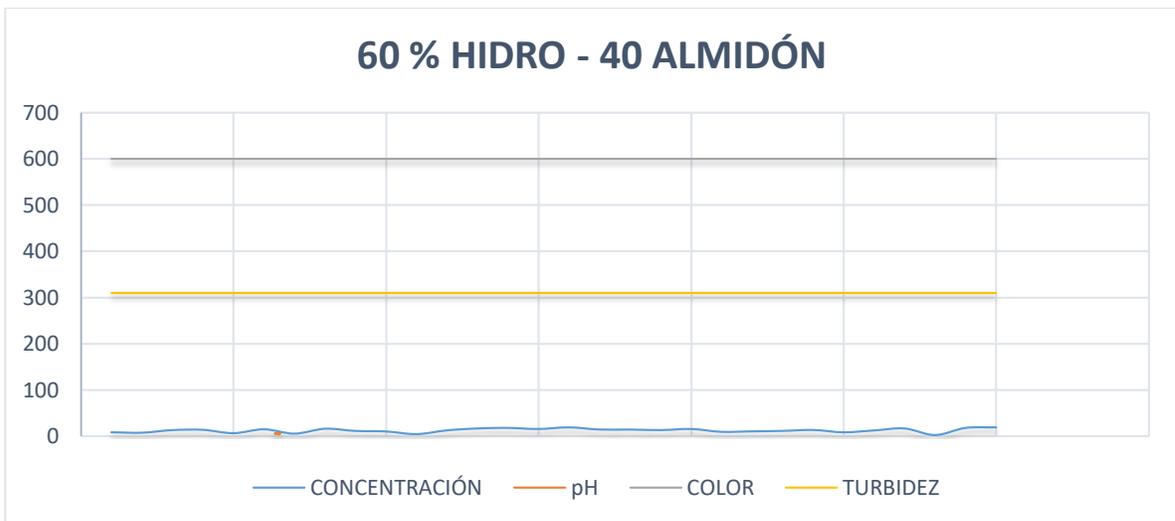
ANEXO. 3 TURBIDIMETRO



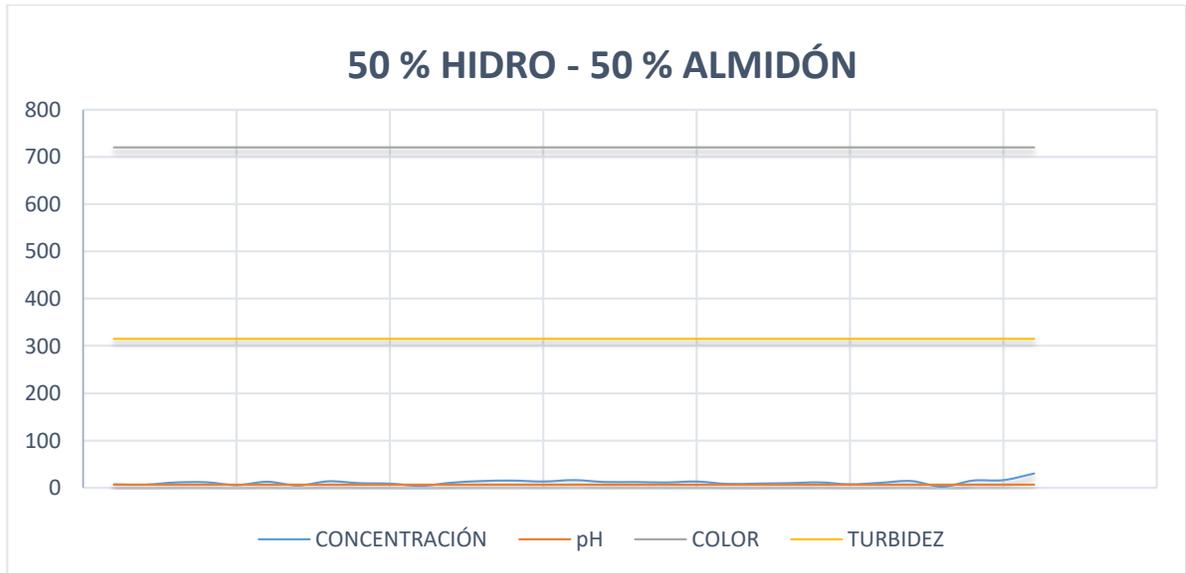
ANEXO. 4 DOSIFICACION



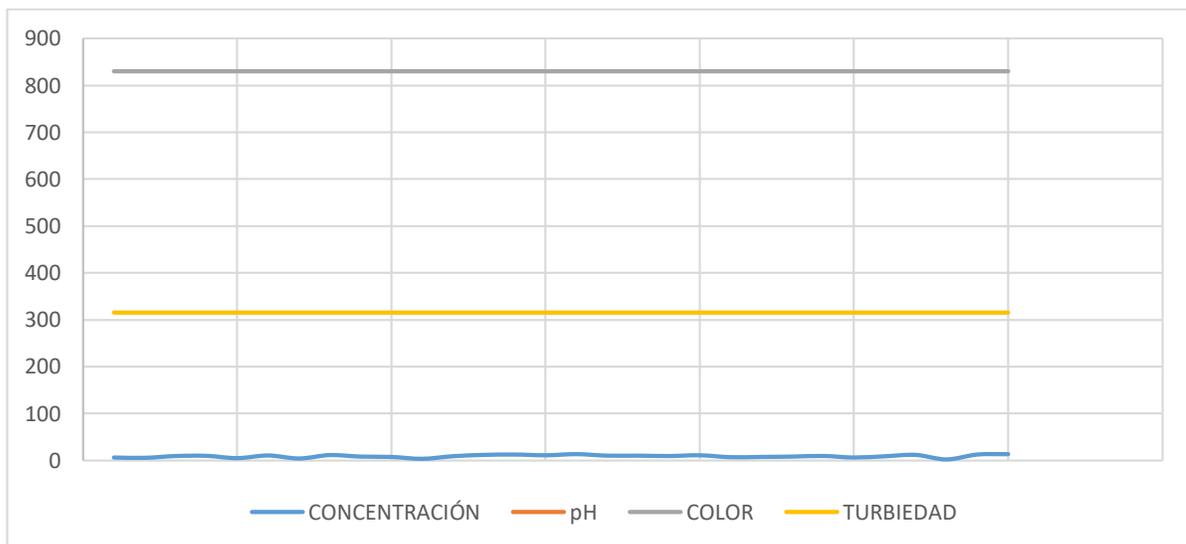
ANEXO. 5 ADECUACION DEL TEST



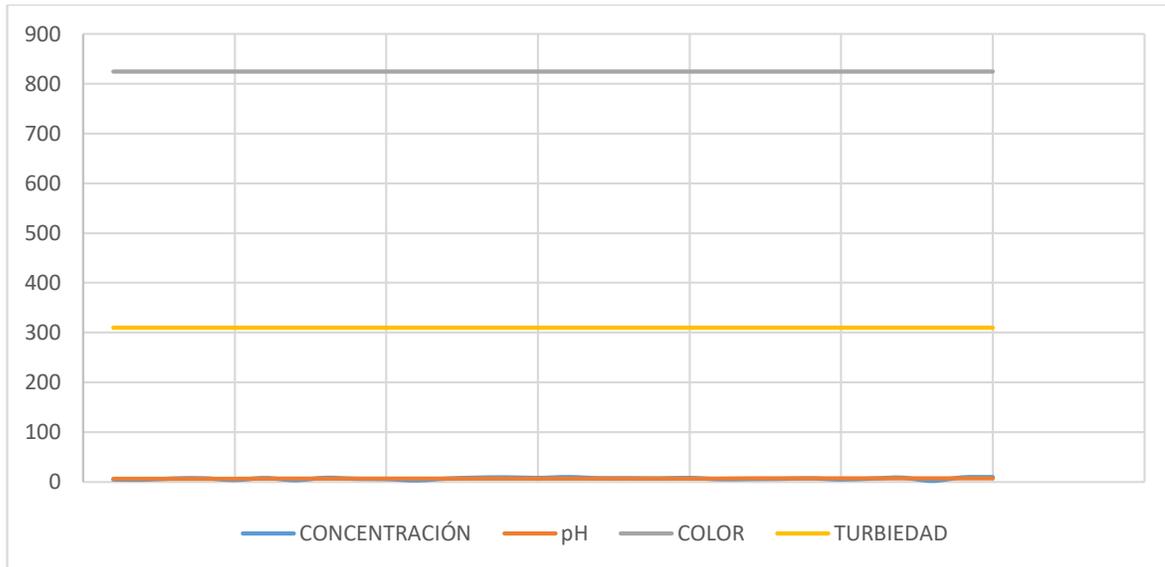
ANEXO. 6 HIDROXICLORURO DE ALUMINIO – 40 % ALMIDÓN DE PLÁTANO



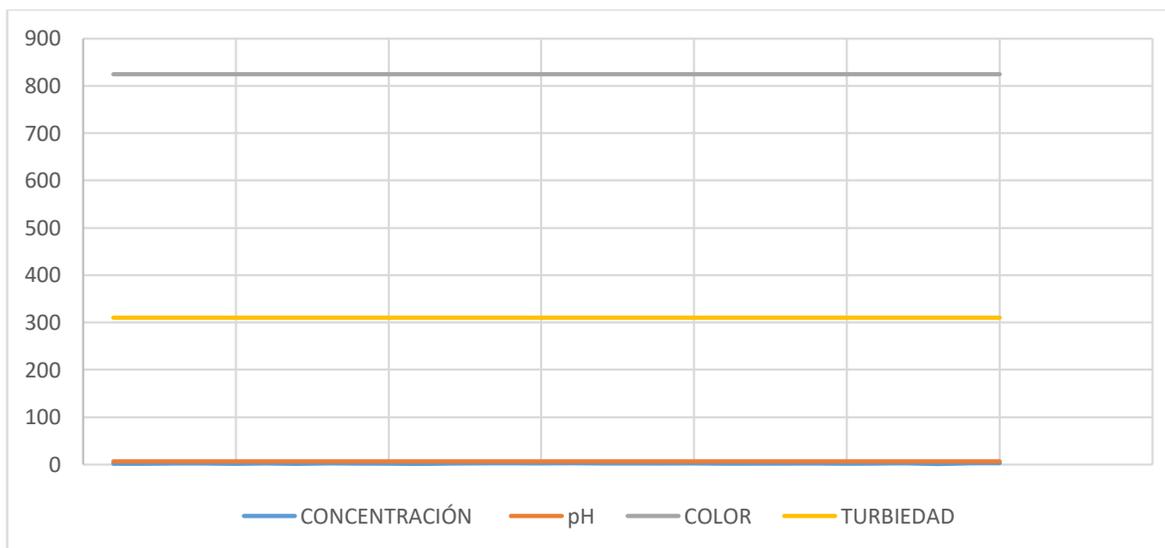
ANEXO. 7 HIDROXICLORURO DE ALUMINIO, 50 % ALMIDÓN DE PLÁTANO



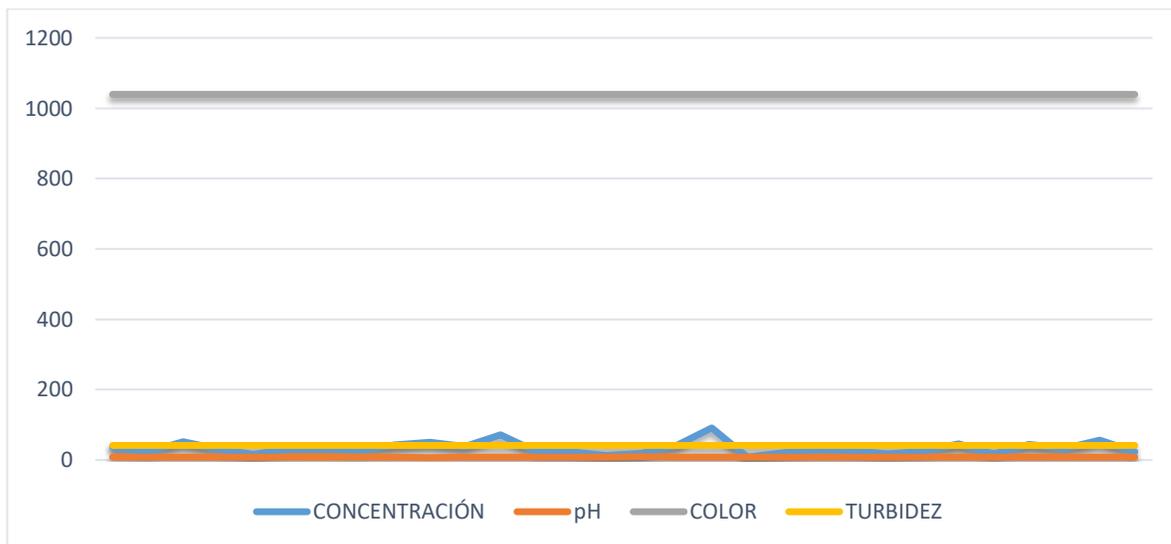
ANEXO. 8 HIDROXICLORURO DE ALUMINIO, 60 % ALMIDÓN DE PLÁTANO



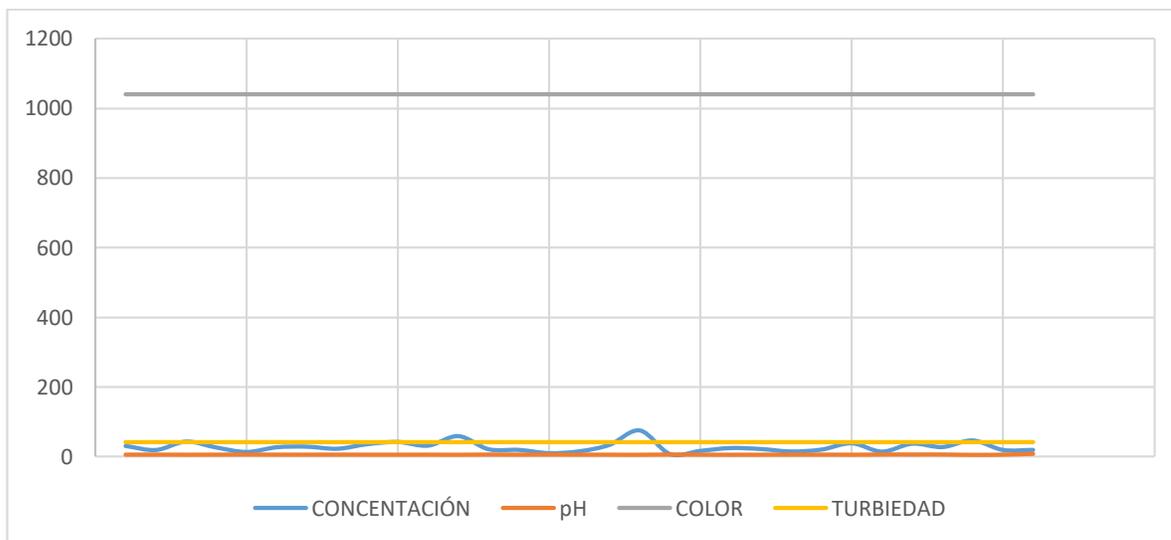
ANEXO. 9 30 % HIDROXICLORURO DE ALUMINIO, 70 % ALMIDÓN DE PLÁTANO



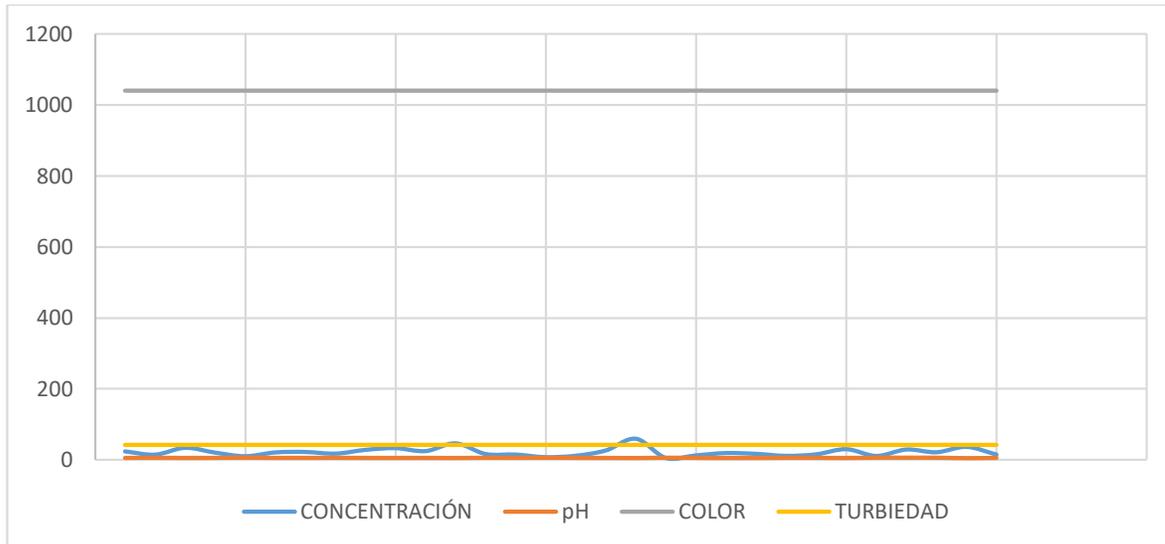
ANEXO. 10 10 % HIDROXICLORURO DE ALUMINIO, 90 % ALMIDÓN DE PLÁTANO



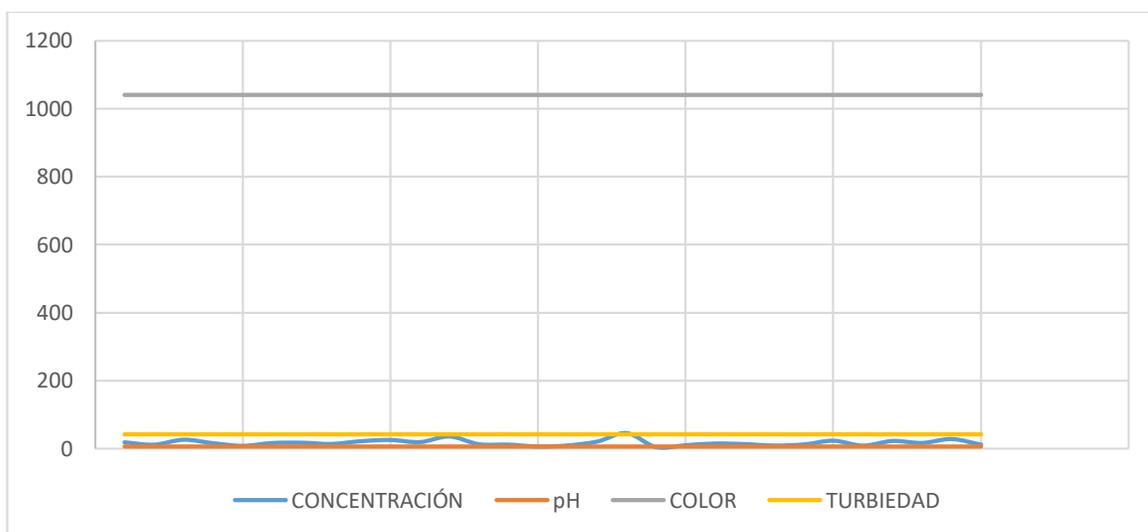
ANEXO. 11 60 % SULFATO DE ALUMINIO, 30 % ALMIDÓN DE PLÁTANO



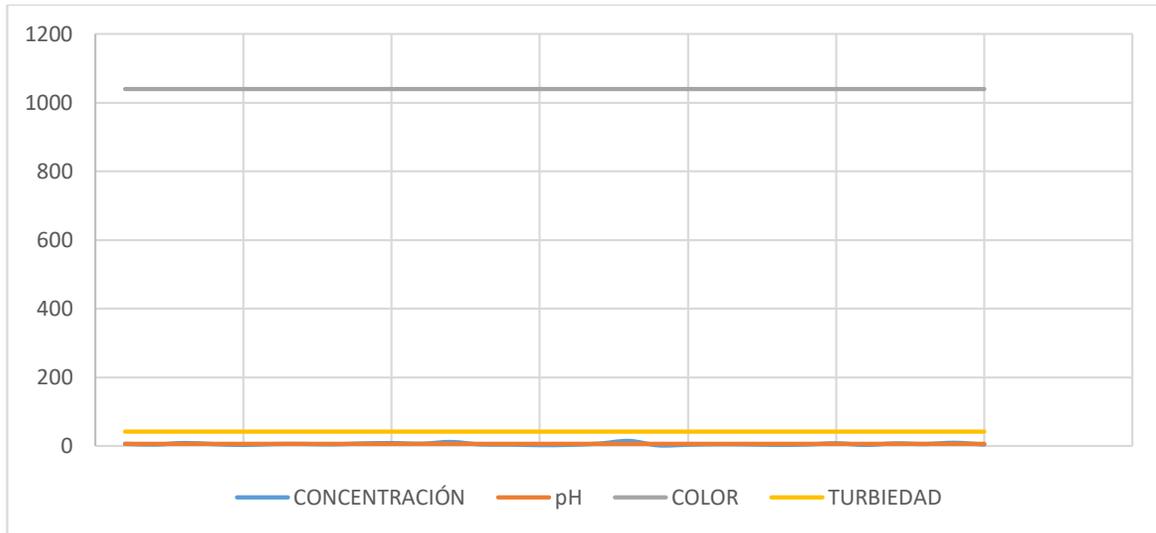
ANEXO. 12 50 % SULFATO DE ALUMINIO, 50 % ALMIDÓN DE PLÁTANO



ANEXO. 13 40 % SULFATO DE ALUMINIO, 60 % ALMIDÓN DE PLÁTANO



ANEXO. 14 30 % SULFATO DE ALUMINIO, 70 % ALMIDÓN DE PLÁTANO



ANEXO. 15 10 % SULFATO DE ALUMINIO, 90 % ALMIDÓN DE PLÁTANO



Anexo 16. Mapa aguas arriba de la PTAP

## **RECOMENDACIONES**

De acuerdo a la investigación realizada en la entidad ECAAAS-ESP del municipio de Saravena-Arauca, se logró evidenciar que el almidón de plátano posee un alto poder coagulante para el tratamiento de aguas, además de esto logra mejorar la eficiencia operacional y económica del proceso.

Su mejor efecto es con aguas que poseen un alto contenido de metal, es decir aguas subterráneas. Ya que los estudios demostraron que en este tipo de agua se logra remociones mayores al 90 % en los parámetros color y turbiedad, por esto es necesario sugerir la aplicación de esta técnica para el tratamiento de aguas.

