



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Sanitaria y
Recursos Hidráulico (ERIS)

**USO DE ALMIDÓN DE YUCA COMO SUSTITUTO DEL SULFATO DE
ALUMINIO EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN EN
SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA PARA POTABILIZACIÓN**

Ing. Luis Roberto Moscozo Barrios

Asesorado por el MSc. Ing. Felix Alan Douglas Aguilar Carrera

Guatemala, febrero de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

USO DE ALMIDÓN DE YUCA COMO SUSTITUTO DEL SULFATO DE ALUMINIO EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN EN SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA PARA POTABILIZACIÓN

ESTUDIO ESPECIAL

PRESENTADO A LA ESCUELA DE INGENIERÍA SANITARIA Y RECURSOS HIDRÁULICOS (ERIS) POR:

INGENIERO LUIS ROBERTO MOSCOZO BARRIOS

ASESORADO POR EL MSc. ING. FELIX DOUGLAS AGUILAR CARRERA

COMO REQUISITO PREVIO A OBTAR AL GRADO ACADÉMICO DE:

MAESTRO (*MAGISTER SCIENTIFICAE*) EN INGENIERÍA SANITARIA

GUATEMALA, FEBRERO DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**DIRECTOR DE LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y
RECURSOS HIDRÁULICOS**

M.Sc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

EXAMINADOR	M.Sc. Ing. Félix Alan Douglas Aguilar Carrera
EXAMINADOR	M.Sc. Ing. Zenon Much Santos
EXAMINADOR	M.Sc. Ing. Adán Pocasangre Collazos

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

USO DE ALMIDÓN DE YUCA COMO SUSTITUTO DEL SULFATO DE ALUMINIO EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN EN SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA PARA POTABILIZACIÓN

Tema que me fuera asignado por la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), en mayo de 2013.



Ing. Luis Roberto Moscozo Barrios
robertomoscozo@gmail.com
100022563



Guatemala, 15 de octubre de 2014

MSc. Ing. Adán Pocasangre
Coordinador de la Maestría en Ingeniería Sanitaria
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Respetuosamente le comunico que he revisado, en mi calidad de Asesor el documento titulado:

USO DE ALMIDÓN DE YUCA COMO SUSTITUTO DEL SULFATO DE ALUMINIO EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN EN SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA PARA POTABILIZACIÓN

Elaborado por el Ingeniero Civil Luis Roberto Moscozo Barrios, como parte de su Estudio Especial, y requisito para optar al grado académico de Maestro en Ingeniería Sanitaria; y me permito informarle mi satisfacción y por tanto le comunico que dicho documento cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo la atención a la presente, me suscribo,

Atentamente,

MSc. Ing. Félix Aguilar Carrera
Asesor del Estudio

Guatemala, 05 de febrero de 2015

MSc. Ing. Pedro Cipriano Saravia
Director
Escuela de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS)
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

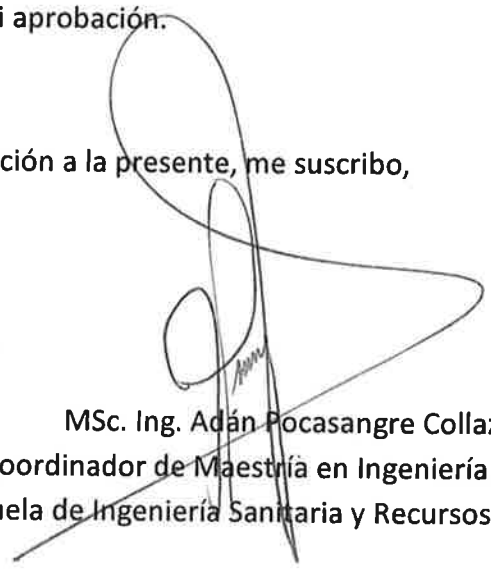
Respetuosamente le comunico que he revisado, en mi calidad de Coordinador de Maestría en Ingeniería Sanitaria el documento titulado:

USO DE ALMIDÓN DE YUCA COMO SUSTITUTO DEL SULFATO DE ALUMINIO EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN EN SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA PARA POTABILIZACIÓN

Elaborado por el Ingeniero Civil Luis Roberto Moscozo Barrios, como parte de sus Estudio Especial, y requisito para optar al grado académico de Maestro en Ingeniería Sanitaria; me permite informarle mi satisfacción y por tanto le comunico que dicho documento cuenta con mi aprobación.

Agradecido la atención a la presente, me suscribo,

Atentamente,



MSc. Ing. Adán Pocasangre Collazos
Coordinador de Maestría en Ingeniería Sanitaria
Escuela de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos

Guatemala, 3 de febrero de 2014

Ingeniero Pedro Saravia
Director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ing. Saravia:

Por este medio extiendo constancia a la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, de la Facultad de Ingeniería, que se ha realizado satisfactoriamente la revisión y corrección de estilo del trabajo de graduación de Maestría en Ciencias de Ingeniería Sanitaria: **Uso de almidón de yuca como sustituto del sulfato de aluminio en el proceso de coagulación-floculación en sistemas de tratamiento de agua para potabilización** del estudiante ingeniero **Luis Roberto Moscozo Barrios (carné: 100022563)**.

Para los requerimientos que su despacho necesite.

Atentamente,

(f) y sello



Licda. Rosa Amelia González Domínguez
Unidad de Lingüística
Facultad de Ingeniería

Rosa Amelia González Domínguez
LICENCIADA EN LETRAS
Colegiada No. 6284

Rosa Amelia González Domínguez
LICENCIADA EN LETRAS
Colegiado No. 6284



El Director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS) después de conocer el dictamen del tribunal examinador integrado por los siguientes profesionales: MSc. Ing. Adán Pocasangre, MSc. Ing. Félix Aguilar, MSc. Zenon Much Santos; así como el visto bueno del coordinador de la Maestría en Ingeniería Sanitaria, MSc. Adán Pocasangre, y la revisión Lingüística realizada por la Licenciada Rosa Amelia González Domínguez colegiada No. 5284 al trabajo del estudiante: Ingeniero Civil Luis Roberto Moscozo Barrios, titulado:

USO DE ALMIDÓN DE YUCA COMO SUSTITUTO DEL SULFATO DE ALUMINIO EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN EN SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA PARA POTABILIZACIÓN

En representación de la comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado, procede a la autorización del mismo.

Guatemala, 16 de febrero de 2015

IMPRÍMASE

"ID Y ENSEÑAR A TODOS"

Msc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis

DIRECTOR

Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos



AGRADECIMIENTOS A:

Dios

Mis padres Eldin Leonidas Moscozo Xitumul y Alba Lizeth Barrios
Sánchez de Moscozo.

Mi hermana Edlin Martha Beatriz Moscozo Barrios.

ÍNDICE GENERAL

GLOSARIO	VII
RESUMEN.....	IX
INTRODUCCIÓN	XI
OBJETIVOS.....	XIII
HIPÓTESIS.....	XIII
JUSTIFICACIÓN.....	XV
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XIX
ALCANCES Y LIMITACIONES	XXI
1. MARCO TEÓRICO	1
1.1 Proceso de coagulación-floculación del agua	1
1.1.1 La necesidad de la coagulación-floculación.....	1
1.1.2 Partículas en suspensión	3
1.1.2.1 Tamaño de las partículas en suspensión.....	3
1.1.3 Afinidad de las partículas coloidales por el agua	5
1.1.4 Carga eléctrica y doble capa.....	5
1.2 Coagulación	6
1.3 Floculación.....	7
1.4 Relación entre coagulación y floculación	8
1.4.1 Factores que influyen en la coagulación	9
1.4.1.1 Gradiente de velocidad	9
1.4.1.2 Influencia del pH	9
1.4.1.3 Influencia de la temperatura del agua.....	10
1.5 Influencia de la dosis del coagulante	10

1.5.1	Influencia de mezcla	11
1.5.2	Influencia de la turbiedad.....	12
1.5.3	Fases de la coagulación	13
1.6	Definición y estructura del polímero.....	14
1.7	Clasificación de los polímeros	14
1.7.1	De acuerdo a su carga eléctrica	14
1.7.2	De acuerdo a su origen.....	15
	1.7.2.1 Polímeros naturales.....	15
	1.7.2.2 Polímeros sintéticos	16
1.8	Composición de los almidones	17
1.8.1	Amilosa.....	19
1.8.2	Amilopectina	20
1.9	Propiedades fisicoquímicas del almidón.....	21
2	METODOLOGÍA.....	23
2.1	Materiales	23
2.1.1	Agua empleada en el estudio	23
	2.1.1.1 Determinación de la dosis de caolín.....	24
2.1.2	Almidón de yuca	26
	2.1.2.1 Aislamiento del almidón de yuca	26
2.2	Método.....	27
2.2.1	Preparación de la prueba de jarras.....	27
2.3	Fase experimental	29
2.3.1	Número de pruebas	29
2.3.2	Determinación de la dosis óptima con sulfato de aluminio	31
2.3.3	Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de yuca ..	32

RESULTADOS.....	35
DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	55
CONCLUSIONES	59
RECOMENDACIONES.....	61
BIBLIOGRAFÍA.....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Doble capa de una partícula coloidal	6
Proceso de coagulación.....	7
Fases de la coagulación	13
Estructura de un polímero natural.....	16
Estructura de segmentos de amilosa.....	18
Estructura de segmentos de la amilopectina	18
Diferencia esquemática entre amilosa y amilopectina	19

TABLAS

Separación de partículas	3
Tiempos de decantación según el tipo de partícula	4
Características de los gránulos de almidón	22
Gramos de caolín según turbiedad requerida	25
Combinaciones de sustitución de sulfato de aluminio.....	33
Sustitución del 100 % de sulfato de aluminio.....	56

GRAFICAS

Método 1060B , Determinación del número de pruebas.....	30
Dosis optima sulfato de aluminio	32
Sustitución para turbiedad de 0 a 100 NTU	36
Sustitución para turbiedad de 100 a 200 NTU	37
Sustitución para turbiedad de 200 a 300 NTU	38
Sustitución para turbiedad de 300 a 400 NTU	39

Sustitución para turbiedad de 400 a 500 NTU.....	40
Sustitución para turbiedad de 500 a 600 NTU.....	41
Sustitución para turbiedad de 600 a 700 NTU.....	42
Sustitución para turbiedad de 700 a 800 NTU.....	43
Sustitución para turbiedad de 800 a 900 NTU.....	44
Sustitución para turbiedad de 900 a 1000 NTU.....	45

GLOSARIO

Almidón	Polisacárido de reserva alimenticia predominante en las plantas, construido por glucosa en sus dos formas poliméricas: amilosa y amilopectina.
Glucosa	Monosacárido con fórmula molecular $C_6H_{12}O_6$. Es una hexosa, es decir contiene 6 átomos de carbono. Es una forma de azúcar que se encuentra libre en las frutas y en la miel. Su rendimiento energético es de 3,75 kilocalorías por cada gramo en condiciones estándar.
Método colorimétrico	Método por el cual se basa en la identificación de un determinado elemento o compuesto a través de reacciones químicas que generan un color específico.
Muestra	Es una parte extraída de un universo o conjunto, por métodos que permiten considerarla representativa del mismo.
NTU	Unidades Nefelométricas de Turbiedad.
Floc	Conglomerado de partículas sólidas que se generan por el proceso de coagulación-floculación.

RESUMEN

El uso de polímeros como ayudantes de coagulación y floculación está bastante extendido y es práctica corriente en muchas plantas de tratamiento de agua. Desde el punto de vista ambiental, hay reportes que en el análisis realizado a muestras de aguas potabilizadoras se han encontrado trazas de sulfato de aluminio (Arboleda et al, (1975)), de esto la investigación es orientada a encontrar qué porcentaje del sulfato de aluminio puede ser sustituido por almidón de yuca, en el proceso de coagulación- floculación para la potabilización de agua.

Lo anterior se logra a través del aislamiento del almidón de yuca donde se emplea la metodología de Aparicio (2003), este se utiliza yuca común para el consumo humano; donde de una serie de pasos se logra aislar el almidón de yuca. Los diferentes niveles de turbiedad se lograron empleando arcilla llamada caolín, para establecer turbiedades que van de 0 a 1000 NTU. Luego de determinar la dosis óptima de 70 miligramos por litro de sulfato de aluminio a través de la prueba de jarras su fue sustituyendo el sulfato de aluminio por almidón de yuca en proporciones del 20 %. De esto, y luego de realizar 60 pruebas para determinar si es posible sustituir el sulfato de aluminio hasta un 40 % por almidón de yuca para lograr valores inferiores a 5 NTU, se determinó que sí es posible para ciertos valores de turbiedad iniciales.

A pesar que los valores de sustitución resultan ser elevados para el empleo de un producto natural, el análisis económico del empleo del almidón de yuca en el proceso indica que no reduce los costos, al contrario, incrementaría los costos de operación de una planta potabilizadora.

INTRODUCCIÓN

Uno de los más grandes desafíos que enfrenta la humanidad es el abastecimiento de agua con propiedades fisicoquímicas y microbiológicas adecuadas para el consumo. En el proceso de potabilización se emplean sustancias químicas como coagulantes y ayudantes de coagulación. Desde el punto de vista ambiental, se ha reportado que en análisis realizado a muestras de aguas potabilizadas se han encontrado trazas de sulfato de aluminio, representando así un riesgo potencial para la salud humana (Arboleda et al, (1975)).

De lo anterior el presente trabajo, plantea el uso del almidón de yuca como ayudante en el proceso de floculación-coagulación, el cual se analiza hasta qué porcentaje puede sustituir este al sulfato de aluminio en la dosis óptima para diferentes valores de turbiedad y también se realiza el análisis de la factibilidad técnica y económica del uso del amidon.

En el primer capítulo se presentan las diferentes definiciones y conceptos, los cuales ayudarán a comprender el proceso de floculación-coagulación y todos aquellos elementos y parámetros que toman relevancia en dicho proceso.

El segundo capítulo trata sobre el método de experimentación utilizado, en el cual se describe las características del agua a emplear en el proceso de experimentación, así como la descripción del aislamiento del almidón de yuca donde se emplea la metodología de Aparcio (2003), el uso de caolín como elemento para fijar las turbiedades que se desean trabajar y la descripción de la prueba de jarras.

En los capítulos tercero y cuarto, se hace la presentación de los resultados encontrados de la fase experimental, así como su interpretación y análisis de los mismos, en este capítulo se toma el tema del análisis de factibilidad técnica y económica del uso del almidón de yuca como ayudante en el proceso de floculación-coagulación para la potabilización de agua cruda.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Determinar si es posible sustituir hasta un 40 % de sulfato de aluminio por almidón de yuca en el proceso de coagulación-floculación para la potabilización de agua y lograr turbiedades menores a las 5 NTU

Objetivos específicos

- Realizar la sustitución de sulfato de aluminio por almidón de yuca para valores de turbiedad en rangos proporcionales de 0 a 1 000 NTU.
- Realizar un análisis comparativo para determinar en qué valor de turbiedad se obtienen mejores resultados al sustituir el sulfato de aluminio como coagulante por almidón de yuca.
- Establecer la factibilidad técnica y económica del uso del almidón de yuca en el proceso de coagulación-floculación.

HIPÓTESIS

Es posible sustituir el 40 % de sulfato de aluminio por almidón de yuca en el proceso de coagulación-floculación, logrando los mismos valores de turbiedad al finalizar el proceso.

JUSTIFICACIÓN

Actualmente el coagulante más utilizado es el sulfato de aluminio multihidratado (generalmente $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$). En análisis realizados a muestras de aguas potabilizadas se han encontrado trazas de sulfato de aluminio (Arboleda et al, (1975))). Lo que indica que el control en cuanto a la adición de esta sustancia no es apropiado, representando así un riesgo potencial para la salud humana (Martínez, 2003). Debido a esto se plantea el empleo de polímeros de origen natural como el almidón de yuca, el cual podría disminuir la presencia de trazas de productos químicos.

ANTECEDENTES

En la actualidad, el uso de polímeros como ayudantes de coagulación y floculación está bastante extendido y es práctica corriente en muchas plantas de tratamiento de agua; en Guatemala. Una de las plantas que emplea este tipo de químicos es la planta de potabilización de Lo de Coy, ubicada en el municipio de Mixco, Guatemala, a cargo de EMPAGUA¹.

El uso de los polímeros no únicamente aborda el uso de estos de forma química, sino también se contempla el uso de polímeros naturales, que a diferencia de los químicos, estos se encuentran en menores concentraciones en la naturaleza, pero ofrecen la ventaja que luego del proceso no se determinan trazas de estos (Suarez, 1984).

Dichos polímeros se obtienen de una variedad de plantas nativas. Generalmente estas son utilizadas con diferentes propósitos, pero podrían servir en muchos casos como excelentes ayudantes en el proceso de coagulación-floculación.

¹ Empresa Municipal de Agua de la Ciudad de Guatemala

En 1986, el ingeniero Juan Manuel Mejía Guillen, realizó el estudio de la utilización de la semilla de moringa oleífera² como coagulante natural, obteniendo como resultado un mejor comportamiento al compararse con el sulfato de aluminio. El mismo estudio determinó que pueden ser utilizados como ayudantes de coagulación las siguientes plantas: garbanzo, soya, yuca, maíz y avena.

En 1975, el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS)³ realizó pruebas con almidones para su uso como ayudantes de coagulación, en los cuales determinó que los almidones pueden ser obtenidos de una gran variedad de productos vegetales como la papa, el maíz, la yuca y el trigo.

El ingeniero Eddy Morán (1987), presentó un estudio sobre el uso de la fécula de maíz como una alternativa de ayuda en el proceso de coagulación del agua cuando se emplea el sulfato de aluminio⁴, en el cual concluye que es factible el uso de fécula (almidón) de maíz como polielectrolito natural para sustituir hasta un 25% el sulfato de aluminio en el proceso de tratamiento de agua, como también convierte al maíz en un polímero económicamente factible para su uso en el tratamiento de agua en pequeñas plantas.

² Mejía Guillen, Juan Manuel. (1986). *La utilización de la Moringa Oleífera como coagulante natural*. Guatemala: Estudio Especial, ERIS-USAC-

³ Arboleda V.; et al (1975). *Polímeros naturales y su aplicación como ayudantes de floculación*. Lima, Peru: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) 89 p.

⁴ Morán, Eddy René Martínez. (1987). *El uso de fécula de maíz como una alternativa de ayuda en el proceso de coagulación del agua cuando se emplea el sulfato de aluminio*. Guatemala: Estudio Especial, ERIS-USAC.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el proceso de potabilización de las aguas, la clarificación es una de las etapas más importantes ya que permite la remoción de materiales de naturaleza coloidal en suspensión, tales como arcilla, limo y lodos. Para lograr la clarificación del agua, es necesaria la utilización de agentes coagulantes así como coadyuvantes de coagulación, que permiten eliminar un porcentaje significativo de las partículas en suspensión (típicamente entre 80 y 90 %); este proceso es conocido como coagulación-floculación. Los agentes convencionales utilizados en la coagulación-floculación son sales metálicas, tales como el sulfato de aluminio, el cloruro férrico y el sulfato ferroso. Actualmente el coagulante más utilizado es el sulfato de aluminio multihidratado (generalmente $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) (Arboleda et al, (1975)).

Hoy reportes indican o que en análisis realizados a muestras de aguas potabilizadas se han encontrado trazas de sulfato de aluminio, ya que este es el agente comúnmente más utilizado (Arboleda et al, (1975)), esto indica que el control en cuanto a la adición de esta sustancia no es apropiado, representando así un riesgo potencial para la salud humana (Martínez 2003). Bratby (2006) y Colbert (2007) mencionan que existe una preocupación creciente de la relación entre el aluminio residual y efectos neurológicos adversos, principalmente manifestado en la enfermedad del Alzheimer.

El desarrollo de nuevas alternativas para el empleo de polímeros de origen natural en el proceso coagulación-floculación podrán ayudar a disminuir la presencia de trazas de productos químicos. Los polímeros de origen natural presentan por lo general una mínima o nula toxicidad, los cuales en muchos casos se utilizan como comestibles.

Dentro de algunos coagulantes alternativos empleados en América Latina, están las semillas de la planta moringa oleífera (Guillen, (1986)), y la fécula de maíz (Morán, 1987), los cuales presentan como componente principal almidón, el cual debido a su estructura molecular genera segmentos de amilosa y amilopectina que ayudan dentro del proceso de coagulación floculación.

De lo anterior y debido a los problemas encontrados por el uso de sulfato de aluminio en el proceso de coagulación-floculación, genera la siguiente pregunta de investigación, ¿es posible sustituir de la dosis óptima de sulfato de aluminio por almidón de yuca?, ¿hasta qué porcentaje de la dosis optima puede ser sustituido, para cumplir los parámetros de turbiedad de la norma Coguanor NTG 29,001? Al dar respuesta a estas interrogantes se podrá disminuir las trazas de sulfato de aluminio, porque se daría el empleo de un polímero natural.

ALCANCES Y LIMITACIONES

Alcance

El estudio se encuentra enfocado en determinar el porcentaje máximo en que puede ser sustituido el sulfato de aluminio por almidón de yuca de la dosis óptima, y lograr cumplir con el requerimiento de límite máximo admisible establecido en la Norma NTG Coguanor 29,001, referente a turbiedad del agua al finalizar el proceso de floculación.

Limitaciones

Con el fin de lograr los objetivos de la investigación se establecen las siguientes limitaciones al estudio:

- Para realizar la prueba de jarras se emplea el sulfato de aluminio a una concentración del 1 %. Debido a que en pruebas anteriores se ha determinado que dicha concentración logra buenos resultados en la reducción de la turbiedad, hasta valores aceptables por la Norma NTG Coguanor 29,001⁵.
- La turbiedad del agua será establecida a nivel de laboratorio por medio de la arcilla caolín, con la cual se definirán las siguientes turbiedades:
 - I. 0 - 100 NTU,
 - II. 101 - 200 NTU,
 - III. 201 – 300 NTU,

⁵ Pruebas realizadas en la clase de Procesos de Tratamiento de Agua Potable, ERIS 2011

- IV. 301 - 400 NTU,
- V. 401 – 500 NTU,
- VI. 501 – 600 NTU,
- VII. 601 – 700 NTU,
- VIII. 701 – 800 NTU,
- IX. 801 – 900 NTU,
- X. 901 – 1000 NTU.

- Se establecerá la temperatura del agua en el siguiente rango: 18 - 25 °C

- Se establecerá un potencial de hidrógeno (pH) entre un rango de: 6,0 -8,0 pH. Estos valores corresponde a que debido a que la disociación del agente coagulante produce una serie de reacciones en equilibrio químico, su desempeño depende del pH. En el caso del sulfato de aluminio, la formación optima de flóculos (Schulz et al, 2005) ocurre en el intervalo establecido.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Proceso de coagulación-floculación del agua

1.1.1 La necesidad de la coagulación-floculación

Los tratamientos para la purificación de agua superficial son de suma importancia para la sociedad, porque de estos depende la calidad del agua para consumo humano, doméstico y usos de diferente índole.

Si los tratamientos se aplican de manera correcta, cada comunidad podría satisfacer un requerimiento esencial para la vida. Las grandes ciudades dependen de abastecimiento superficial y en la mayoría de los casos sus fuentes son corrientes, lagos o embalses (Guerrero, 1979). En el proceso de potabilización de las aguas, la clarificación es una de las etapas más importantes, ya que permite la remoción de materiales de naturaleza coloidal en suspensión, tales como arcilla, limo y lodos. Para lograr la clarificación del agua, es necesaria la utilización de agentes coagulantes, así como coadyuvantes de coagulación que permiten eliminar un porcentaje significativo de las partículas en suspensión (típicamente entre 80 y 90 %). (*Mezclas con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales, 2012*)

La turbiedad y el color son principalmente causados por partículas muy pequeñas, llamadas partículas coloidales. Estas partículas permanecen en suspensión en el agua por tiempo prolongado.

Para eliminar estas partículas se recurre a los procesos de coagulación y floculación, la primera tiene por objeto desestabilizar las partículas en suspensión, es decir facilitar su aglomeración. En la práctica este procedimiento es caracterizado por la inyección y dispersión rápida de productos químicos. La floculación tiene por objeto favorecer con la ayuda de la mezcla lenta el contacto entre las partículas desestabilizadas. Estas partículas se aglutinan para formar un *floc* que pueda ser fácilmente eliminado por los procedimientos de decantación y filtración.

Es muy importante que los procedimientos de coagulación y floculación sean utilizados correctamente, ya que la producción de un *floc* muy pequeño o muy ligero produce una decantación insuficiente; mientras que el agua que llega a los filtros contiene una gran cantidad de partículas de *floc* que rápidamente ensucian los filtros y necesitan lavados frecuentes. Por otro lado cuando, el *floc* es frágil, este se rompe en pequeñas partículas que pueden atravesar el filtro y alterar la cantidad del agua producida.

Las aguas superficiales pueden contener una gran variedad de materias, el tamaño de las partículas de estas materias y su naturaleza determinan los tipos de tratamiento dentro de las plantas de agua. Las partículas de tamaño muy grande como los detritus orgánicos, protozoarios, gravas, arena, limo, etc. los bichos en la materia en suspensión del tamaño de 10 micrometros a 10 milímetros y más, pueden ser eliminados por los tratamientos de separación física que conlleva aproximadamente los siguientes:

Tabla I. **Separación de partículas**

Tamaño de la partícula	Tipo de proceso
10 a 100 mm	Separados por medio de los sistemas de rejillas
0.2 a 10 mm	Separados por desarenación, sedimentación, decantación y flotación
0.01 a 0.1 mm	Separados por filtración (macro y microtamizado)

Fuentes: Andía, Yolanda *Tratamiento de agua coagulación y floculación*. p. 5.

1.1.2 Partículas en suspensión

Las partículas en suspensión de una fuente de agua superficial provienen de la erosión de suelos, de la disolución de sustancias minerales y de la descomposición de sustancias orgánicas. A este aporte natural se debe adicionar las descargas de desagües domésticos, industriales y agrícolas. En general la turbiedad del agua es causada por las partículas de materias inorgánicas (arcillas, limos, etc.), en tanto que el color está formado por las partículas de materias orgánicas e hidróxidos de metal (hierro por ejemplo).

1.1.2.1 Tamaño de las partículas en suspensión

Las partículas se clasifican de acuerdo a su tamaño; así estas con diámetro inferior a 1 micrómetro que corresponden a partículas de materias orgánicas o inorgánicas, se depositan muy lentamente.

La tabla siguiente indica los tiempos de decantación de las diferentes partículas en función de: sus diámetros, densidad y de la temperatura del agua.

Tabla II. **Tiempos de decantación según el tipo de partícula**

Tipo de partículas	Diámetro (mm)	Tiempo de caída	
		Densidad 2.65	Densidad 1.1
Grava	10	0.013 s.	0.2 s.
Arena Gruesa	1.0	1.266 s.	20.9 s.
Arena Fina	0.1	126.66 s.	34.83 min.
Lodo fino	0.01	3.52 h.	58 h.
Bacterias	0.001	14.65 d.	249.1 d.
Coloides	0.0001	4.12 a.	66.59 d.

Fuentes: Andía, Yolanda. Tratamiento de agua coagulación y floculación.p 7.

Se observa fácilmente que a la misma densidad, las partículas más pequeñas tienen un tiempo de duración de caída más grande, esto imposibilita la decantación sin la adición de un factor externo.

- Los Coloides: son suspensiones estables, por lo que es imposible su sedimentación natural, son sustancias responsables de la turbiedad y del color del agua.

Los sistemas coloidales presentan una superficie de contacto inmensa entre la fase sólida y la fase líquida, por ejemplo 1 cubo de 1 centímetros cúbicos, tiene una superficie total de 6 centímetros cuadrados.

1.1.3 Afinidad de las partículas coloidales por el agua

Las partículas coloidales se caracterizan por ser hidrofílicas (tiene afinidad por el agua) e hidrofóbicas (es decir que rechazan al agua), los primeros se dispersan espontáneamente dentro del agua y son rodeados de moléculas de agua que provienen todo contacto posterior entre estas partículas; las partículas hidrofóbicas no son rodeados de moléculas de agua, su dispersión dentro del agua no es espontáneo por lo que requiere de la ayuda de medios químicos y físicos.

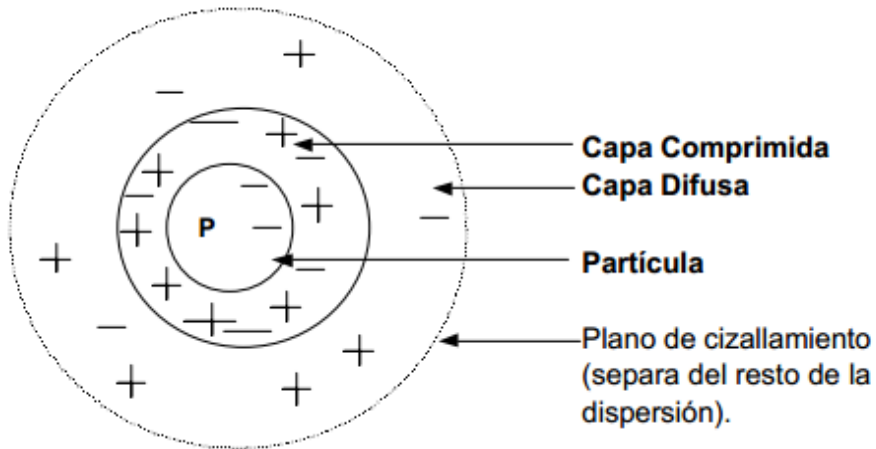
Las partículas hidrofóbicas son en general partículas de materias inorgánicas mientras que las hidrofílicas son materias orgánicas; en realidad solo un poco son las partículas que son exclusivamente hidrofílicas o hidrofóbicas; se obtienen mas bien partículas hidratadas a los diferentes grados.

La carga eléctrica y la capa de agua que rodea las partículas hidrofílicas tienden a desplazar las partículas unas de otras y, en consecuencia los estabiliza dentro de la solución.

1.1.4 Carga eléctrica y doble capa

Dentro del agua superficial, las partículas coloidales, son las causantes de la turbiedad y del color, por lo que el tratamiento del agua está orientado a la remoción de estas partículas; estas poseen normalmente una carga eléctrica negativa situado sobre su superficie. Estas cargas llamadas cargas primarias, atraen los iones positivos del agua, los cuales se adhieren fuertemente a las partículas y atraen a su alrededor iones negativos acompañados de una débil cantidad de iones positivos.

Figura 1. **Doble capa de una partícula coloidal**



Fuente: Tema 5, Manual de Laboratorio *–Coagulación-Floculación–*. Universidad de Castilla, La Mancha.

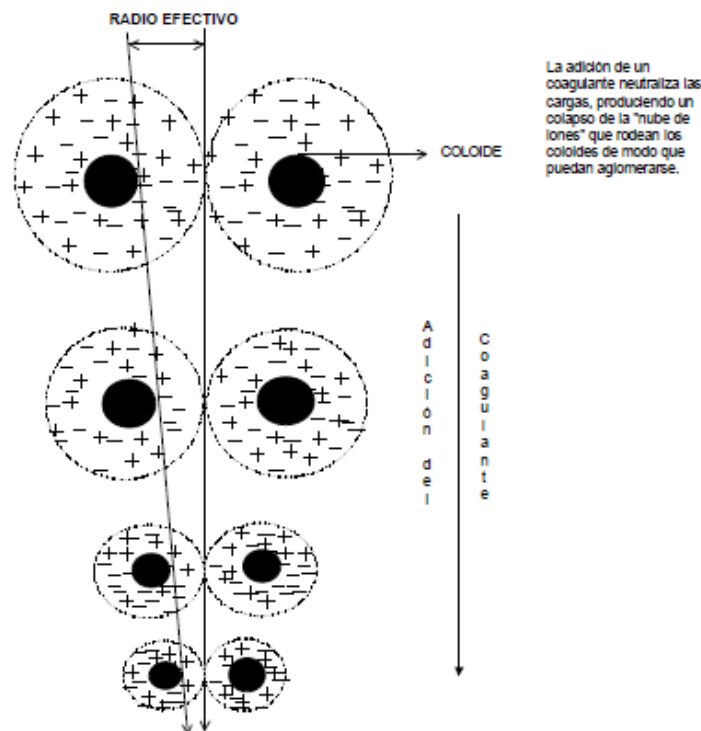
Los iones que se adhieren fuertemente a la partícula y se desplazan con ella, forman la capa adherida o comprimida, mientras que los iones que se adhieren débilmente constituyen la capa difusa, por lo tanto hay un gradiente o potencial electrostático entre la superficie de la partícula y la solución, llamado Potencial Zeta.

1.2 Coagulación

Es un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se producen al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados, por medio de la adición de los coagulantes químicos y la aplicación de la energía de mezclado.

En la siguiente Figura 2 se muestra como las sustancias químicas anulan las cargas eléctricas de la superficie del coloide permitiendo que las partículas coloidales se aglomeren formando flóculos.

Figura 2: **Proceso de coagulación**



Fuente: Tema 5, Manual de Laboratorio *-Coagulación-Floculación-* Universidad de Castilla, La Mancha.

1.3 Floculación

Proceso químico mediante el cual, con la adición de sustancias denominadas floculantes, se aglutinan las sustancias coloidales presentes en el agua, facilitando de esta forma su decantación y posterior filtrado. Es un paso del proceso de potabilización de aguas de origen superficial y del tratamiento de aguas servidas.

Los compuestos que pueden estar presentes en el agua pueden ser:

- Sólidos en suspensión
- Partículas coloidales (menos de 1 micra), gobernadas por el movimiento browniano
- Sustancias disueltas (menos que varios nanómetros).

1.4 Relación entre coagulación y floculación

El proceso de floculación es precedido por la coagulación, por eso se suele hablar de los procesos de coagulación-floculación. Estos facilitan la retirada de las sustancias en suspensión y de las partículas coloidales:

- La coagulación es la desestabilización de las partículas coloidales causadas por la adición de un reactivo químico llamado coagulante, el cual neutralizando sus cargas electrostáticas, hace que las partículas tiendan a unirse entre sí.
- La floculación es la aglomeración de partículas desestabilizadas en microflóculos y después en los flóculos más grandes que tienden a depositarse en el fondo de los recipientes construidos para este fin, denominados sedimentadores.

Los factores que pueden promover la coagulación-floculación son el gradiente de la velocidad, el tiempo y el pH. El tiempo y el gradiente de velocidad son importantes al aumentar la probabilidad de que las partículas se unan y da más tiempo para que estas descendan, por efecto de la gravedad, y así se acumulen en el fondo. Por otra parte el pH es un factor prominente en la acción desestabilizadora de las sustancias coagulantes y floculantes.

El proceso conjunto de coagulación-floculación busca la conseguir aguas decantadas limpias y la formación de lodos espesos.

1.4.1 Factores que influyen en la coagulación

Dentro del proceso de coagulación existen factores externos que afectan el proceso, de esto es importante hacer mención de estos, sobre todo de aquellos que deben de ser controlados en la prueba de jarras.

1.4.1.1 Gradiente de velocidad

Al dispersarse el coagulante en la masa de agua y desestabilizarse las partículas, se precisa de la floculación pericinetica para que las partículas coloidales de tamaño menor a un micrómetro empiecen a aglutinarse. El movimiento browniano actúa dentro de este rango de tamaño de partículas y forma el microfloculo inicial.

La velocidad en las colisiones esta definida por el gradiente de velocidad⁶, el cual es la expresión del efecto del espectro de turbulencia para un mecanismo de agitación (Vargas, 2003). La eficiencia en las colisiones se incrementa en forma casi lineal con el gradiente de velocidad hasta que este alcanza un valor máximo, más allá del cual cualquier incremento adicional resulta en una disminución de la eficiencia, debido a que el proceso destruye el floculo formado.

1.4.1.2 Influencia del pH

El pH es una medida de la actividad del ion hidrógeno en una solución, y es igual a: $\text{pH} = -\log\{\text{H}^+\}$

⁶ Para ampliar los conceptos se recomienda leer: (Vargas, 2003)

El pH es la variable más importante a tener en cuenta al momento de la coagulación, para cada agua existe un rango de pH óptimo para la cual la coagulación tiene lugar rápidamente, ello depende de la naturaleza de los iones y de la alcalinidad del agua.

El rango de pH es función del tipo de coagulante a ser utilizado y de la naturaleza del agua a tratar; si la coagulación se realiza fuera del rango de pH óptimo entonces se debe aumentar la cantidad del coagulante; por lo tanto la dosis requerida es alta.

1.4.1.3 Influencia de la temperatura del agua

La variación de 1°C en la temperatura del agua conduce a la formación de corrientes de densidad (variación de la densidad del agua) de diferentes grados que afectan a la energía cinética de las partículas en suspensión, por lo que la coagulación se hace más lenta; temperaturas muy elevadas desfavorecen igualmente a la coagulación.

Una disminución de la temperatura del agua en una unidad de decantación conlleva a un aumento de su viscosidad; esto explica las dificultades de la sedimentación de un *floc*.

1.5 Influencia de la dosis del coagulante

La cantidad del coagulante a utilizar tiene influencia directa en la eficiencia de la coagulación, así:

- Poca cantidad del coagulante, no neutraliza totalmente la carga de la partícula, la formación de los microflóculos es muy escaso, por lo tanto la turbiedad residual es elevada,
- Alta cantidad de coagulante produce la inversión de la carga de la partícula, conduce a la formación de gran cantidad de microflóculos con tamaños muy pequeños cuyas velocidades de sedimentación son muy bajas, por lo tanto la turbiedad residual es igualmente elevada
- La selección del coagulante y la cantidad óptima de aplicación; se determina mediante los ensayos de pruebas de jarras.

1.5.1 Influencia de mezcla

El grado de agitación que se da a la masa de agua durante la adición del coagulante, determina si la coagulación es completa; turbulencias desiguales hacen que cierta porción de agua tenga mayor concentración de coagulantes y la otra parte tenga poco o casi nada; la agitación debe ser uniforme e intensa en toda la masa de agua, para asegurar que la mezcla entre el agua y el coagulante haya sido bien hecho y que se haya producido la reacción química de neutralización de cargas correspondiente.

En el transcurso de la coagulación y floculación, se procede a la mezcla de productos químicos en dos etapas. En la primera etapa, la mezcla es enérgica y de corta duración (60 segundos máximo) llamado mezcla rápida; esta mezcla tiene por objeto dispersar la totalidad del coagulante dentro del volumen del agua a tratar, y en la segunda etapa la mezcla es lenta y tiene por objeto desarrollar los microflóculos.

1.5.2 Influencia de la turbiedad

La turbiedad es una forma indirecta de medir la concentración de las partículas suspendidas en un líquido; mide el efecto de la dispersión que estas presentan al paso de la luz y es función del número, tamaño y forma de partículas.

La turbiedad del agua superficial es gran parte debido a partículas de lodos de sílice de diámetros que varían entre 0,2 a 5 micrómetros. La coagulación de estas partículas es muy fácil de realizar cuando el pH se mantiene dentro del rango óptimo. La variación de la concentración de las partículas permiten hacer las siguientes predicciones:

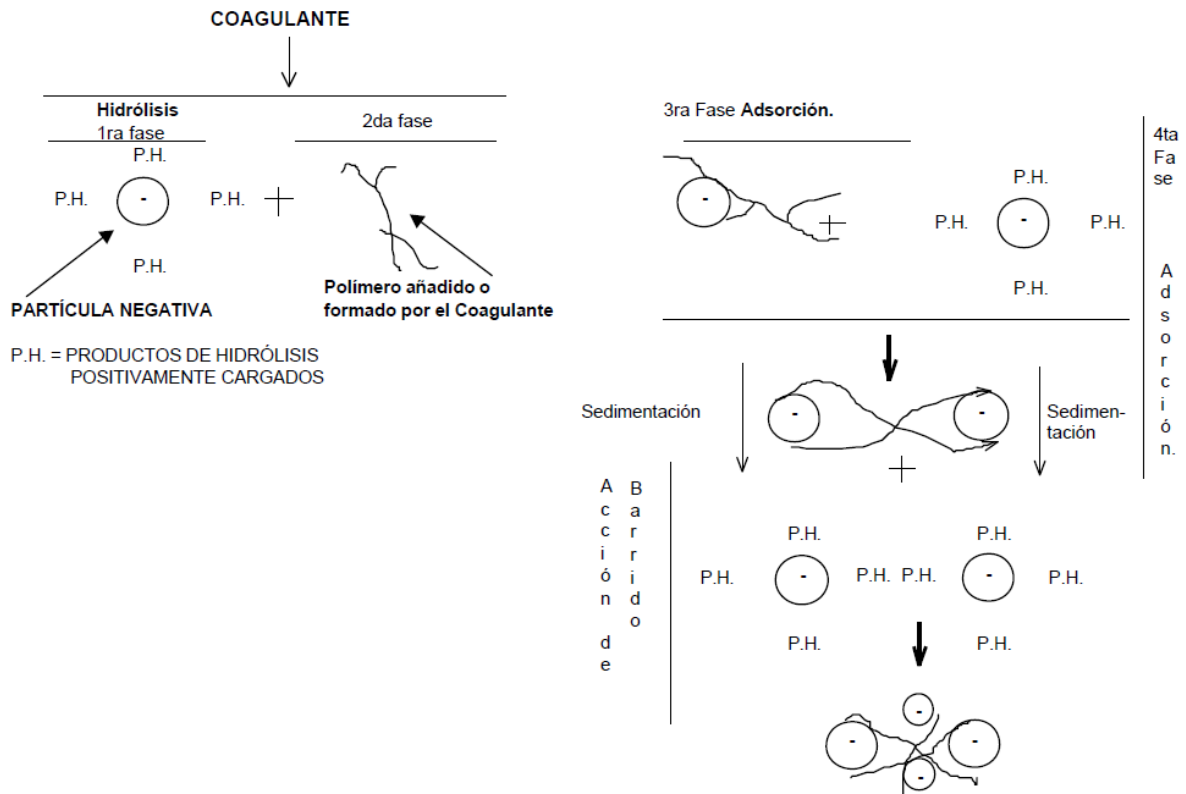
- Para cada turbiedad existe una cantidad de coagulante, con el que se obtiene la turbiedad residual más baja, que corresponde a la dosis óptima.
- Cuando la turbiedad aumenta se debe adicionar la cantidad de coagulante, no es mucho, debido a que la probabilidad de colisión entre las partículas es muy elevada; por lo que la coagulación se realiza con facilidad; por el contrario, cuando la turbiedad es baja la coagulación se realiza muy difícilmente, y la cantidad del coagulante es igual o mayor que si la turbiedad fuese alta.
- Cuando la turbiedad es muy alta, conviene realizar una presedimentación natural o forzada, en este caso con el empleo de un polímero aniónico.

- Es siempre más fácil coagular las aguas de baja turbiedad y aquellas contaminadas por desagües domésticos industriales, porque requieren mayor cantidad de coagulante que los no contaminados.

1.5.3 Fases de la coagulación

Las fases de coagulación se encuentran definidas en cuatro fases siendo estas: 1era. Fase de Hidrólisis, 2da Fase Adición de polímero, 3era. Fase Adsorción y 4ta. Fase de sedimentación, en la Figura 3, se logra apreciar el proceso de forma esquemática.

Figura 3: Fases de la coagulación



Fuente: Tema 5. Manual de laboratorio –Coagulación-Floculación–. Universidad de Castilla, La Mancha.

1.6 Definición y estructura del polímero

Un polímero puede definirse como una sustancia química compuesta de una cierta cantidad de unidades básicas que se repiten (Llamadas monómeros) unidas consecutivamente por enlaces covalentes. El grado de polimerización está dado por el número de monómeros que conforman la cadena polimérica, y puede variar en un amplio rango hasta llegar a 10^4 o 10^6 unidades en su estructura molecular. Un compuesto polimérico puede contener diversos tipos de unidades monoméricas en su cadena.

La policondensación en la formación de los polímeros depende de la naturaleza de los grupos funcionales de las moléculas que interaccionan entre sí. Todos los monómeros capaces de formar polímeros deben tener, por lo menos, dos núcleos activos para que la nueva molécula formada conserve su configuración activa semejante a la original. Cuando las cadenas poliméricas tienen múltiples grupos funcionales iónicos, sean libres o esterificados, se les denomina polielectrolitos.

1.7 Clasificación de los polímeros

Los polímeros de importancia en el tratamiento del agua pueden clasificarse, según su carga, en polímeros aniónicos, catiónicos o no iónicos; y según su origen, en naturales o sintéticos.

1.7.1 De acuerdo a su carga eléctrica

Los polímeros pueden o no tener carga eléctrica. Los que no la tienen se denominan no iónicos. Los demás pueden ser catiónicos (carga positiva) o aniónicos (carga negativa).

1.7.2 De acuerdo a su origen

De acuerdo a su origen los polímeros pueden ser naturales o sintéticos poseyendo características que los diferencian unos a otros, las cuales se explican a continuación.

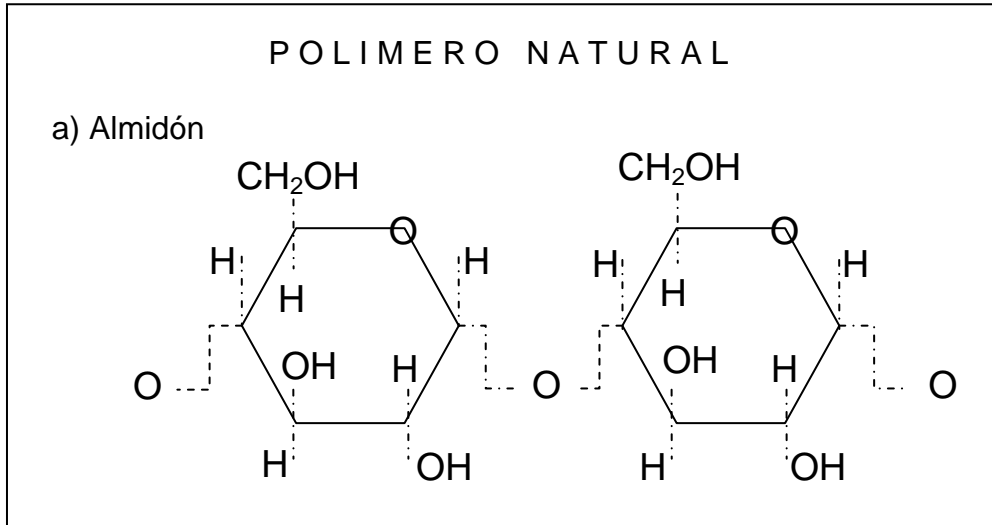
1.7.2.1 Polímeros naturales

Son aquellos que se producen debido a las reacciones bioquímicas naturales en animales y plantas. Son polímeros que muchas veces no tienen una sola composición química bien definida, pues están constituidos principalmente por varios tipos de polisacáridos (almidón, celulosa, glucósidos, etc.) y proteínas (caseína, olieratina, gelatina, etc.).

Algunos de ellos tienen propiedades coagulantes o floculantes y en muchos lugares son usados en forma empírica por los nativos para aclarar el agua turbia con resultados satisfactorios, como en el caso del mucílago de la penca de la tuna (que se emplea en México y en la sierra del Perú) o de las semillas de nirmalí (que se emplean en la India). Para el aprovechamiento de estos polímeros es necesario extraerlos o prepararlos del resto de la materia prima.

La toxicidad de estos polímeros naturales es, por lo general, mínima o nula, pues se les usa en muchos casos como comestibles o aditivos en diversos productos alimenticios.

Figura 4: **Estructura de un polímero natural**



Fuente: Arboleda V.; et al. (1975). *Polímeros naturales y su aplicación como ayudantes de floculación*. p 14.

1.7.2.2 Polímeros sintéticos

Son los compuestos orgánicos producidos mediante la transformación química del carbón y del petróleo e incluyen a la mayoría de los polímeros de manufactura industrial, que comúnmente se expenden en el comercio. Muchos se encuentran en forma de polvo seco, generalmente constituidos por poliacrilamida (no iónicos) y poliacrilamida hidrolizada (aniónicos). Los polímeros catiónicos son derivados de bases de amonio cuaternario o de imina de polietileno que generalmente, se expenden en solución acuosa, en concentraciones del 10 al 60 % (Sasso, 1972).

La toxicidad de los polielectrolitos sintéticos debe investigarse y someterse a un exigente control de calidad, pues a veces los monómeros utilizados en la producción de polímeros son tóxicos. Debido a esto, algunos polímeros sintéticos no pueden usarse en el tratamiento de agua potable.

La Organización Mundial de la Salud también ha publicado el informe de un grupo de consultores sobre aspectos de salud relacionados con el uso de polielectrolitos en el tratamiento del agua potable, en el que se destaca la necesidad de controlar la toxicidad de los monómeros usados en la preparación de los polímeros.

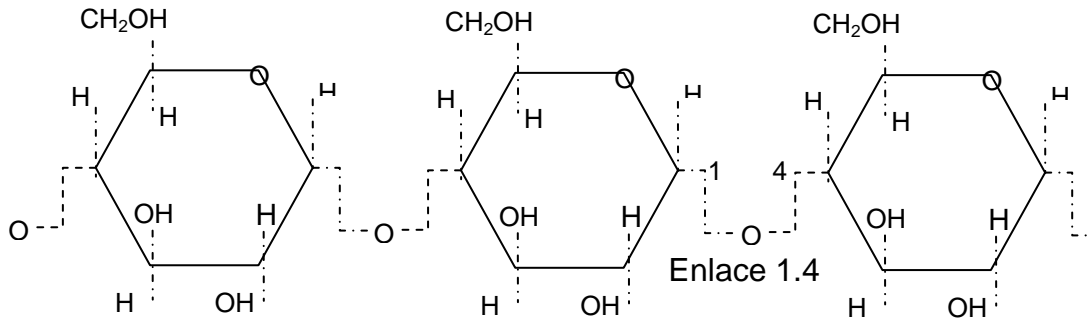
1.8 Composición de los almidones

El almidón $(C_6H_{10}O_5)_x$ (v Figura 1), se forma en los cloroplastos de las plantas verdes por influencia de la luz solar, a expensas de dióxido de carbono (CO_2) y el agua (H_2O), y está formado por una mezcla molecular de polímeros de glucosa anhidra, unidos al anillo en 1.4 y 1.6. Básicamente, consta de dos fracciones: la amilopetina, que es menos soluble en agua y contiene ésteres de ácido fosfórico, y la amilasa, que es más soluble en agua y contiene fósforo y no produce engrudo.

En los polímeros lineales de amilasa las unidades de anhidroglucosa están ligadas por la configuración alfa a través de las posiciones 1,4.

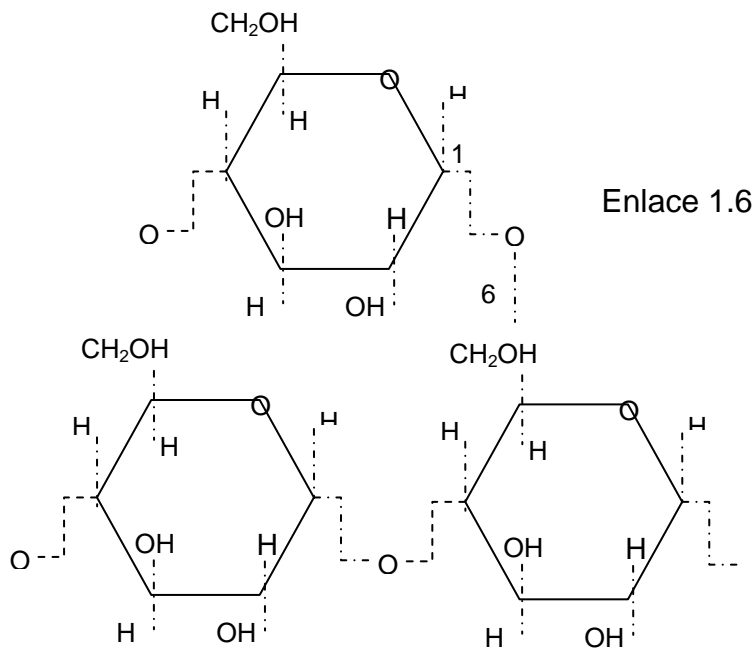
Los polímeros complejos de amilopetina difieren de la amilasa en que, además de uniones 1,4, tiene uniones 1,6 cada 26 o más unidades representan cerca del 5 % de todas las uniones de los polímeros.

Figura 5: Estructura de segmentos de amilosa



Fuente: Arboleda V.; et al. (1975). *Polímeros naturales y su aplicación como ayudantes de floculación*. p 14.

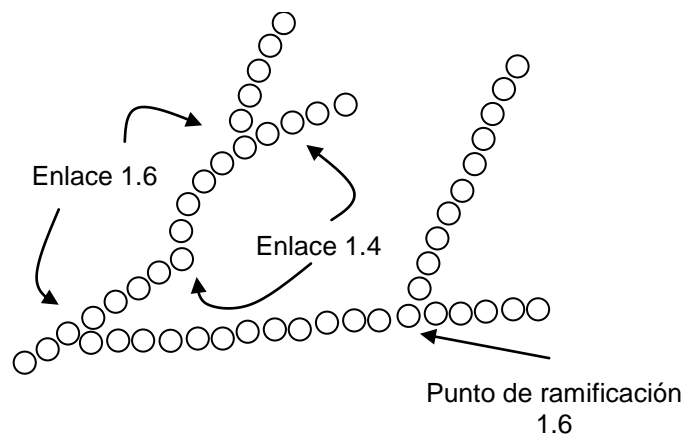
Figura 6: Estructura de segmentos de la amilopectina



Fuente: Arboleda V.; et al. (1975). *Polímeros naturales y su aplicación como ayudantes de floculación*. p 14.

La diferencia entre amilasa y amilopectina se muestra esquemáticamente en la Figura 7.

Figura 7: Diferencia esquemática entre amilosa y amilopectina



Fuente: Arboleda V.; et al. (1975). *Polímeros naturales y su aplicación como ayudantes de floculación*. p 14.

1.8.1 Amilosa

Es un polímero lineal que consta de moléculas de glucosa unidas por enlaces glucosídicos α -D-(1 \rightarrow 4), el número de unidades varía entre los diferentes tipos de almidones, pero generalmente entre 1 000 unidades de glucosa por molécula de amilosa y tiene forma de espiral. En un extremo de la macromolécula la unidad de glucosa contiene el hidroxilo de carbono anomérico libre, por lo cual se llama extremo reductor (Aspinal, 1983). En el extremo opuesto, o no reductor, el hidroxilo del carbono anomérico forma parte del enlace glucosídico (Figura 5).

La abundancia de hidroxilos otorga propiedades hidrofílicas al polímero, impartiendo afinidad por el agua. Sin embargo, debido a su linealidad, los polímeros de la amilosa tienden a agruparse muy estrechamente en forma paralela, mediante la formación de puentes de hidrógeno entre los hidroxilos de los polímeros adyacentes reduciendo así su afinidad por el agua.

1.8.2 Amilopectina

Es un polímero ramificado formado por cadenas lineales constituidas por 15-35 moléculas de glucosa unidas por enlaces α -D-(1→4). Estas cadenas están unidas entre ellas por enlaces α -D-(1→6) que forman los puntos de ramificación (Figura 6 y 7). La amilopectina tiene 5-6 por ciento de enlaces α -D-(1→6) y está constituida de alrededor de 100 000 moléculas de glucosa (Duprat, y otros, 1980).

El gran tamaño y naturaleza ramificada de la amilopectina reduce la movilidad de los polímeros e interfiere su tendencia a orientarse muy estrechamente para permitir niveles significantes de enlaces de hidrógeno.

Como resultado, los soles o soluciones acuosas de amilopectina se caracterizan por su claridad y estabilidad como medida de la resistencia a gelificarse durante el almacenamiento.

La amilopectina en sus estructuras lineales puede formar también complejos; pero como estas partes lineales son cortas, las hélices que se forman son cortas y solo se pueden introducir moléculas pequeñas dentro de ellas.

El nivel de amilosa encontrado en el almidón varía dependiendo del origen. Muchos almidones tales como del maíz común, trigo, papa y yuca contienen alrededor de 18-28 por ciento de amilosa; el maíz y el trigo están en el extremo alto del rango, mientras la papa y la yuca están en el extremo más bajo.

1.9 Propiedades fisicoquímicas del almidón

Las propiedades fisicoquímicas son las que determinan el uso del almidón de yuca. Entre las propiedades fisicoquímicas más importantes se encuentra la composición primal (contenido de proteína, cruda, extracto etéreo, fibra cruda, cenizas y humedad), las características del gránulo (tamaño, color y forma, naturaleza cristalina), el peso molecular y contenido de amilosa. (Teresa; et al.2007).

Los componentes principales de la yuca son: almidón (70-75 %), agua (14 %) y proteínas (10-12 %), además de polisacáridos no de almidón (2-3 %) particularmente arabinosilanos y lípidos (2 %). (De la Vega, 2009).

Tabla III. **Características de los gránulos de almidón**

Almidón	Tipo	Morfología	Diametro (µm)	Contenido de amilosa (%)	Temperatura de gelatinización (°C)	Temperatura de gelificación (°C)	Propiedades de cocción
Trigo	Cereal	Redondo lenticular	1-45	25	58-78	77	Gel opaco
Maíz	Cereal	Redondo poligonal	5-30	25	62-72	80	Gel opaco
Maíz cereso	Cereal	Redondo poligonal	5-30	<1	63-72	74	Claro cohesivo
Yuca	Raíz	Ovalado truncado	4-35	17	62.73	63	Claro cohesivo a tendencia a gelificar
Papa	Tubérculo	Ovalado esférico	5-100	20	59-68	64	Claro cohesivo a tendencia a gelificar
Arroz	Cereal	Esférico poligonal	3-8	19	68-78	81	Gel opaco
Sago	Tronco	Ovalado truncado	15-65	26	69-74	74	Gel opaco

Fuente: Taggart Peter, Starch as an ingrediente: manufacture and applications. In. Eliasson, A-C. Starch in food. Structure, function and applications, 254p.

En agua caliente, los almidones se separan en sus dos fracciones principales: la soluble (10 -20 %) que es amilasa y la insoluble (80-90 %) que es amilopectina. El peso molecular de la amilasa es del orden de 10 000 a 50 000 (60 a 300 unidades de glucosa). El de la amilopectina es del orden de 50 000 a 1 000 000 (300 a 600 unidades de glucosa), pero la longitud de la cadena varia solamente de 24 a 30 unidades de glucosa.

Los granos de almidón se hinchan en presencia de agua caliente y forman una masa gelatinosa llamada engrudo. La temperatura de formación de engrudos varía, según el caso, entre 55 y 80 °C. Estas son polisacáridos de menor peso molecular que los almidones. La posterior hidrólisis del almidón produce maltosa y finalmente glucosa.

METODOLOGÍA

2.1 Materiales

A continuación se describen las características técnicas de los materiales empleados en la fase experimental.

2.1.1 Agua empleada en el estudio

Para desarrollar el estudio se utiliza agua del grifo, a la cual se le aplicó caolín como elemento para lograr la turbiedad requerida en el estudio.

En el procedimiento para aplicar el caolín se realizó una prueba de control, en la cual se determinó si existía una correlación proporcional entre la cantidad de gramos de caolín y la turbiedad que esta generaba, de esto se determinó que alrededor de 0,20 gramos de caolín empleado se puede variar la turbiedad en 100 NTU.

A la muestra de agua proveniente del grifo se tomaron parámetros iniciales: turbiedad, color, pH y temperatura. Al finalizar el proceso de definición de turbiedad se repitió la toma de parámetros, esto con el fin de determinar si se presentaba alguna variación con los valores iniciales o si bien estos debían ser modificados esto para lograr los rangos definidos en el estudio.

2.1.1.1 Determinación de la dosis de caolín

Al iniciar el proceso de definición de las dosis de caolín se precedió a realizar varias pruebas aleatorias, las cuales tenían como objetivo final definir si existía una correlación entre la cantidad de gramos de caolín que se le aplicaba a la muestra de agua y la turbiedad que esta lograba.

Para determinar el número de muestras que se deben de realizar con el fin de decidir si la dosis de caolín seleccionada corresponde a la turbiedad, se realizará de acuerdo con el Método 1060B, indicado en *Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales* de la Editorial Díaz de Santos. (Ver 2.3.1).

De lo anterior se determinó que es necesario realizar 6 pruebas, con el fin de poder asegurar que la cantidad de gramos de caolín corresponde exactamente a la turbiedad requerida. De esto se presentan los resultados.

Descripción del proceso: en 1 000 centímetros cúbicos de agua de grifo se disolvió la cantidad definida de caolín, repitiendo 6 veces el proceso por cada turbiedad que se requería.

Tabla IV. Gramos de caolín según turbiedad requerida

La tabla a continuación detalla las 6 pruebas realizadas con el fin de determinar los gramos de caolín que deberán de ser empleados al momento de fijar las turbiedades de 0 a 1000 NTU

TURBIEDAD DE 000-100 NTU		TURBIEDAD DE 100-200 NTU		TURBIEDAD DE 200-300 NTU	
Gramos de caolín	0.300 g	Gramos de caolín	0.500 g	Gramos de caolín	0.750 g
Concentración	00.30 g/l	Concentración	00.50 g/l	Concentración	00.75 g/l
1	81.6	1	146.1	1	264.2
2	81.9	2	148.0	2	262.3
3	82.4	3	147.5	3	261.2
4	81.9	4	150.3	4	263.4
5	82.9	5	148.2	5	262.1
6	82.8	6	143.1	6	261.2
Promedio	82.3	Promedio	147.2	Promedio	262.4
Desviación estándar	0.5	Desviación estándar	2.4	Desviación estándar	1.2
TURBIEDAD DE 300-400 NTU		TURBIEDAD DE 400-500 NTU		TURBIEDAD DE 500-600 NTU	
Gramos de caolín	1.000 g	Gramos de caolín	1.100 g	Gramos de caolín	1.400 g
Concentración	01.00 g/l	Concentración	01.10 g/l	Concentración	01.40 g/l
1	285.4	1	457.9	1	563.5
2	284.2	2	461.0	2	564
3	282.3	3	455.2	3	560.0
4	283.1	4	452.1	4	561.9
5	284.6	5	461.2	5	563.2
6	283.2	6	458	6	563.9
Promedio	283.8	Promedio	457.6	Promedio	562.8
Desviación estándar	1.1	Desviación estándar	3.5	Desviación estándar	1.5
TURBIEDAD DE 600-700 NTU		TURBIEDAD DE 700-800 NTU		TURBIEDAD DE 800-900 NTU	
Gramos de caolín	1.600 g	Gramos de caolín	1.700 g	Gramos de caolín	1.800 g
Concentración	01.60 g/l	Concentración	01.70 g/l	Concentración	01.80 g/l
1	645.9	1	743.5	1	864.3
2	643.2	2	742.2	2	861.2
3	648.4	3	740.0	3	860.0
4	645.2	4	745	4	866.2
5	647.3	5	744.9	5	867.1
6	649.2	6	743.9	6	864.2
Promedio	646.5	Promedio	743.3	Promedio	863.8
Desviación estándar	2.2	Desviación estándar	1.9	Desviación estándar	2.8
TURBIEDAD DE 900-1000 NTU					
Gramos de caolín	2.000 g				
Concentración	02.00 g/l				
1	975.2				
2	979.0				
3	973.2				
4	975.1				
5	973.1				
6	971.2				
Promedio	974.5				
Desviación estándar	2.7				

Fuente: Elaboración Propia

Los gramos de caolín determinados en esta fase de las pruebas serán empleados para realizar la sustitución de sulfato de aluminio por almidón de yuca, ya en el proceso experimental.

2.1.2 Almidón de yuca

Se adquirieron 20 libras de yuca, la cual es utilizada principalmente para la alimentación humana en un mercado público, también como alimento de animales y la extracción de almidones. La yuca es empleada en la parte del sureste mexicano y Centro América como ingrediente clave en la preparación de alimentos cocidos, tales como caldos regionales, por lo que es un tubérculo muy apreciado y de alta demanda (Cock, 1980)

2.1.2.1 Aislamiento del almidón de yuca

Para la obtención del almidón, se utilizó la metodología de Aparicio (2003). Se pesaron y lavaron 20 libras de yuca. Los tubérculos ya pelados se picaron en porciones de aproximadamente 2,0 x 1,2 centímetros. remojándose en un recipiente que contenía un volumen de agua seis veces el peso de la muestra a temperatura de 40 grados centígrados. La yuca picada se molió en una licuadora, hasta su completa desintegración. Ya molida se lavó tres veces con agua caliente (40 °C), empleando tela tipo manta como tamiz. La fibra retenida en el tamiz se eliminó.

El cernido fue recolectado en un recipiente donde se dejó sedimentar durante 3 horas. El sobrante se separó por decantación y el sedimento se dejó reposar en refrigeración durante la noche. La pasta resultante se secó en un horno a 40 grados centígrados por 24 horas, pulverizándose finalmente.

2.2 Método

2.2.1 Preparación de la prueba de jarras

Para realizar la prueba de jarras como paso inicial consiste en la preparación del aparato que será empleado:

- **Preparación del aparato**

Con el objeto de poder normalizar los resultados obtenidos al comparar el uso del polímero natural, almidón de yuca, se realizó el siguiente proceso, con el fin de realizar la prueba de jarras. La presente prueba de jarras corresponde a lo establecido en la Norma ASTM D 2035-08 Standard Practice for Coagulation-Flocculation Jar Test of Water.

- a) Cada una de las jarras poseen su respectiva jeringa sin aguja.
- b) La dosis de coagulante o mezcla de polímero natural y artificial, se succionó con dichas jeringas y se colocó en el lugar correspondiente.
- c) La aplicación se hizo bajando todos los émbolos manualmente en un lapso de 5 segundos.

Se considera que este sistema de inyección tiene ventajas definitivas sobre el sistema convencional, consistente en agregar el coagulante con una pipeta graduada, por las siguientes razones:

- El añadir una sustancia química a la superficie del agua produce una mezcla muy deficiente, no obstante la velocidad con que giren los agitadores del aparato de prueba de jarras, pues la difusión del compuesto agregado es relativamente lenta. En cambio, el chorro de coagulante lanzado por la jeringa penetra profundamente dentro de la masa de agua y produce una mezcla completa e instantánea. Esto se puede apreciar claramente al utilizar colorantes para comparar los distintos métodos de aplicación.
- La adición casi simultánea de los compuestos en todas las jarras facilita el cómputo del tiempo inicial de formación de *floc* y evita errores al juzgar la velocidad, con que se ha realizado la reacción en cada caso.
- El tener un volumen fijo de coagulante medido previamente en cada jeringa elimina la imprecisión que representa dosificar en el momento con una pipeta.

Las muestras de turbiedad residual se tomaron con un sifón flotante, con el objeto de conservar siempre la misma distancia (6 centímetros) desde la superficie del agua a la cual se estaban extrayendo los sobrenadantes y obtener una velocidad de extracción constante en todos los ensayos.

- **Procedimiento**

La secuencia de los pasos seguidos para los ensayos de pruebas de jarras fue:

- a) Distribución del agua a las seis jarras de 2 000 centímetros cubico.

- b) Ajuste de la velocidad de las paletas a 100 revoluciones por minuto para efectuar la mezcla rápida.
- c) Dosificación del sulfato de aluminio, con un tiempo de mezcla rápida de 1:00 minuto.
- d) Dosificación del polímero, con un tiempo de mezcla rápida de 30 segundos. En todos los ensayos, el tiempo total de mezcla rápida fue de un minuto,
- e) Ajuste de velocidad de las paletas a 40 revoluciones por minuto para efectuar la mezcla lenta de 12 a 15 minutos.
- f) Sedimentación del *floc* en un tiempo de 15 minutos, previa colocación de los sifones.
- g) Toma de muestra y medida de la turbiedad residual. La turbiedad residual fue medida con un turbidímetro y por lo tanto las unidades de turbiedad han sido expresadas en unidades nefelométricas (UN).

2.3 Fase experimental

Con base a los puntos 2.1 y 2.2, se procede a la fase experimental donde se refutara ó confirmara la hipótesis planteada al inicio.

2.3.1 Número de pruebas

Debido que el estudio pretende establecer cuál es la dosis de sulfato de aluminio que puede ser sustituida por almidón de yuca en la dosis óptima en intervalos del 20 %, en cada uno de los porcentajes la prueba se realizará de acuerdo con el Método 1060B indicado en *Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales* de la Editorial Díaz de Santos.

Se utilizarán las curvas de confianza establecido a partir de la siguiente formula.

$$N \geq \frac{ts^2}{U}$$

Donde:

N = número de muestras

t = t de *student* para un nivel de confianza determinado

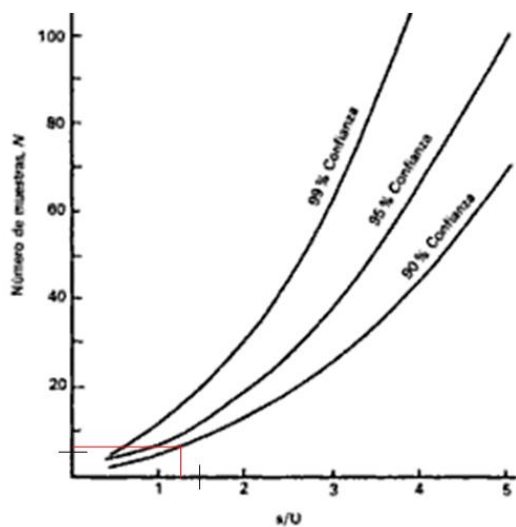
s = desviación estándar global

U = nivel de confianza aceptable

Para una desviación estándar, s, de 0,020 y un nivel de confianza, U, de 0,015, se obtiene una valor de 1,33 para la relación s/U.

A partir de este resultado, se interpola en la figura siguiente para un nivel de confianza del 90 % y se establece que se deben realizar 6 pruebas por cada porcentaje.

1 Método 1060B , determinación del número de pruebas



Fuente: gráfica propia del Método 106B.

2.3.2 Determinación de la dosis óptima con sulfato de aluminio

El coagulante utilizado será el sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$. El objetivo de este ensayo es determinar la dosis óptima de coagulante, la cual se sabe que ofrece buenos resultados en la formación de un flóculo pesado y compacto de fácil sedimentación y que no se rompe al pasar por el filtro.

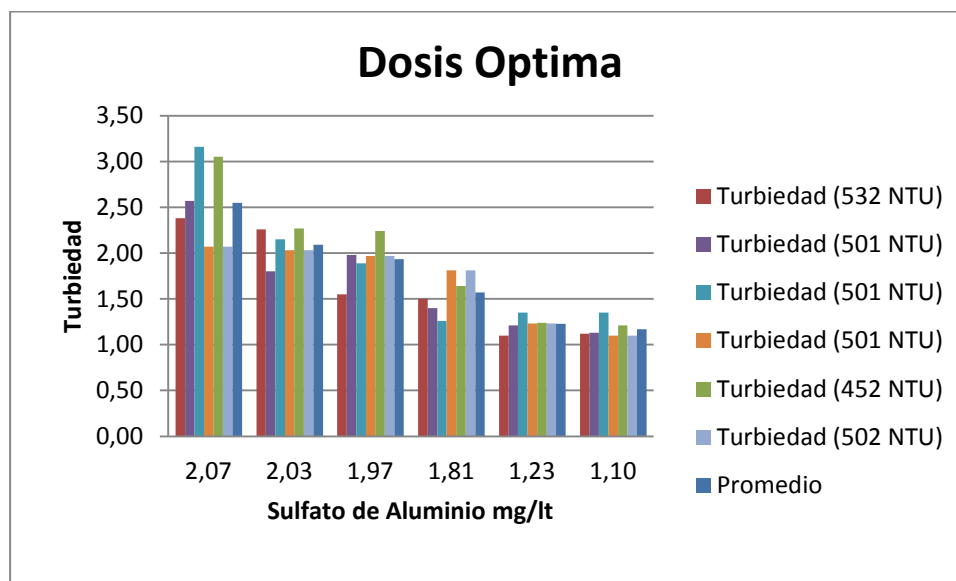
Para determinar la dosis óptima de sulfato de aluminio, se preparó una solución madre de sulfato de aluminio al 1 %, esto quiere decir que en 1 000 centímetro cúbico de agua destilada se disolvió 10 gramos de sulfato de aluminio.

Como parte del procedimiento se prepararon varias muestras de agua con una turbiedad media a todas las que se van a tratar en el proceso de sustitución. De esto se inició el proceso de la prueba de jarras donde a cada jarra se le aplicó diferente dosis de sulfato de aluminio, iniciándose en 50 miligramos sobre litro, hasta 75 miligramos sobre litro de esto se determinó que la dosis óptima para el proceso experimental era de 70 mg/l, ya que al hacer el análisis de los datos se denoto que es la que menos presenta variación en sus datos, manteniéndose un turbiedad residual⁷ promedio de 1,20 NTU.

⁷ Turbiedad residual: turbiedad obtenida al finalizar el proceso de la prueba de jarras.

2: Dosis óptima sulfato de aluminio

Dosis sulfatos de aluminio ma/l	50 mg/l.	55 mg/l.	60 mg/l.	65 mg/l.	70 mg/l.	75 mg/l.
Turbiedad (532 NTU)	2.38	2.26	1.55	1.50	1.10	1.12
Turbiedad (501 NTU)	2.57	1.80	1.98	1.40	1.21	1.13
Turbiedad (501 NTU)	3.16	2.15	1.89	1.26	1.35	1.35
Turbiedad (501 NTU)	2.07	2.03	1.97	1.81	1.23	1.10
Turbiedad (452 NTU)	3.05	2.27	2.24	1.64	1.24	1.21
Turbiedad (502 NTU)	2.07	2.03	1.97	1.81	1.23	1.10
Promedio	2.55	2.09	1.93	1.57	1.23	1.17
Desviación estandar	0.47	0.18	0.22	0.22	0.08	0.10



Fuente: Elaboración Propia

2.3.3 Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de yuca

Una vez determinada la dosis óptima de sulfato de aluminio, se corre otra serie de prueba de jarras, sustituyendo en intervalos del 20 % el sulfato de aluminio por almidón de yuca para las diferentes turbiedades.

Por lo tanto se tienen las siguientes combinaciones para determinar hasta qué porcentaje puede ser sustituido el sulfato de aluminio por almidón de yuca, cumpliendo con el requerimiento de límite máximo admisible establecido en la Norma NTG Coguanor 29,001, referente a turbiedad del agua al finalizar el proceso de floculación.

Tabla V. **Combinaciones de sustitución de sulfato de aluminio**

Diferentes turbiedades		
Prueba	Porcentaje de $Al_2(SO_4)_3$	Porcentaje de almidón de yuca
0	100 %	0 %
1	80 %	20 %
2	60 %	40 %
3	40 %	60 %
4	20 %	80 %
5	0 %	100 %

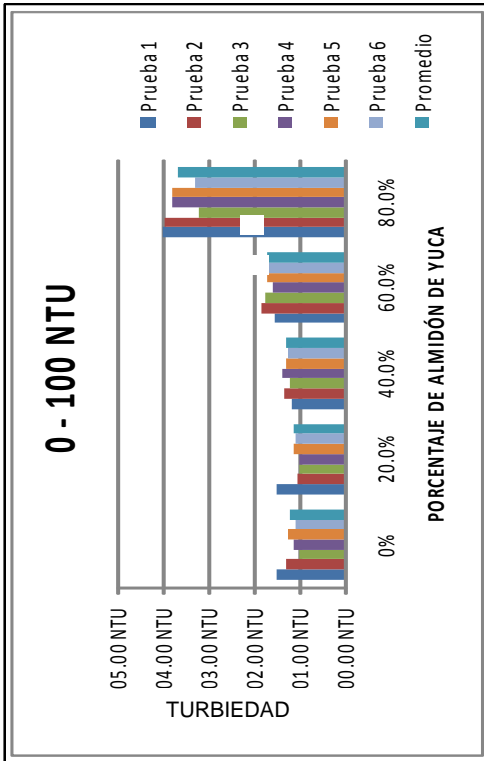
Fuente: Elaboración Propia

RESULTADOS

A continuación se describen los resultados del proceso de sustitución del sulfato de aluminio por almidón de yuca. Se desarrollaron un total de 60 pruebas de jarras, para obtener los resultados de las diferentes turbiedades seleccionadas, las cuales van 0 a 1 000 NTU, en rangos de 100 NTU.

3: Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de yuca para turbiedad de 0 a 100 NTU

La gráfica presenta los resultados de la sustitución del sulfato de aluminio por almidón de yuca, para una turbiedad entre 0 a 100 NTU, en la cual se denota las correcciones por jeringa realizadas y los parámetros iniciales (Io) y finales (Fo) del agua luego de la aplicación de caolín.



000 - 100 NTU		
Parámetros	Io	Fo
Turbiedad (NTU)	0.56	82.22
Color (UC)	-	-
pH	6.36	6.35
Temperatura (°C)	22	22
Dosis optima	70 mg/lt	14.00 ml
Caolín	00.30 g/lts	

Mezclas	100%	80.0%	60.0%	40.0%	20.0%	0.0%
ML Sulfato de aluminio	14.00 ml	11.20 ml	08.40 ml	05.60 ml	02.80 ml	00.00 ml
ML Almidón de yuca	00.00 ml	02.80 ml	05.60 ml	08.40 ml	11.20 ml	14.00 ml

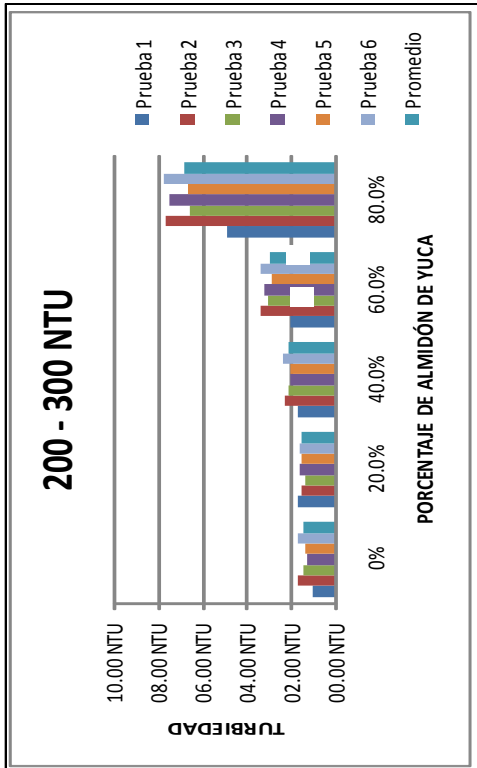
Corrección por jeringa	14.00 ml	11.00 ml	08.00 ml	06.00 ml	03.00 ml	00.00 ml
	00.00 ml	03.00 ml	06.00 ml	08.00 ml	11.00 ml	14.00 ml

	0%	20.0%	40.0%	60.0%	80.0%	100.0%
Prueba 1	01.51 NTU	01.50 NTU	01.17 NTU	01.56 NTU	04.01 NTU	48.40 NTU
Prueba 2	01.31 NTU	01.05 NTU	01.33 NTU	01.84 NTU	03.97 NTU	54.50 NTU
Prueba 3	01.02 NTU	01.02 NTU	01.20 NTU	01.75 NTU	03.21 NTU	49.40 NTU
Prueba 4	01.14 NTU	00.99 NTU	01.39 NTU	01.60 NTU	03.78 NTU	51.80 NTU
Prueba 5	01.25 NTU	01.14 NTU	01.27 NTU	01.69 NTU	03.81 NTU	51.03 NTU
Prueba 6	01.09 NTU	01.09 NTU	01.27 NTU	01.82 NTU	03.28 NTU	49.47 NTU
Promedio	01.22 NTU	01.13 NTU	01.27 NTU	01.71 NTU	03.68 NTU	50.77 NTU
Desviación estándar	00.18 NTU	00.19 NTU	00.08 NTU	00.11 NTU	00.35 NTU	02.20 NTU

Fuente: Elaboración Propia

5: Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de yuca para turbiedad de 200 a 300 NTU

La gráfica presenta los resultados de la sustitución del sulfato de aluminio por almidón de yuca, para una turbiedad entre 200 a 300 NTU, en la cual se denota las correcciones por jeringa realizadas y los parámetros iniciales (Io) y finales (Fo) del agua luego de la aplicación de caolín.



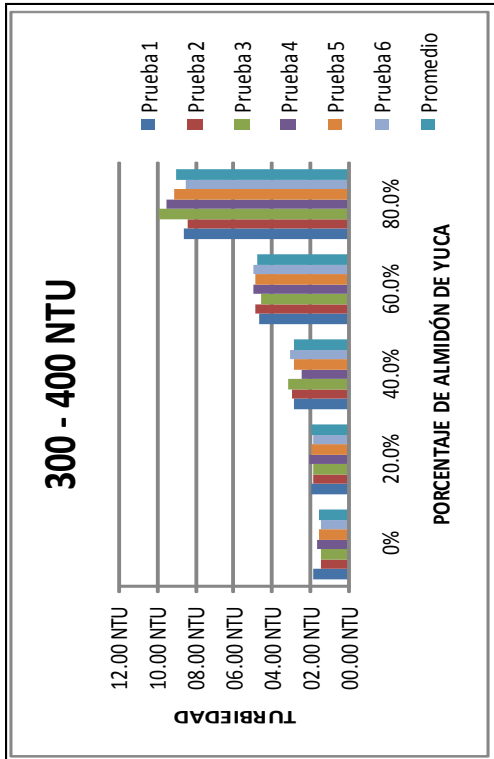
200 - 300 NTU		
Parámetros	Io	Fo
Turbiedad (NTU)	0.56	262
Color (UC)	XX	XX
pH	6.36	6.37
Temperatura (°C)	22	22
Dosis optima	70 mg/lt	14.00 ml
Caolín	00.75 g/lts	

Mezclas	PORCENTAJE DE ALMIDÓN DE YUCA						
	100%	80.0%	60.0%	40.0%	20.0%	0.0%	0.0%
ML Sulfato de aluminio	14.00 ml	11.20 ml	08.40 ml	05.60 ml	02.80 ml	00.00 ml	00.00 ml
ML Almidón de yuca	00.00 ml	02.80 ml	05.60 ml	08.40 ml	11.20 ml	14.00 ml	14.00 ml
Corrección por jeringa	14.00 ml	11.00 ml	08.00 ml	06.00 ml	03.00 ml	00.00 ml	00.00 ml
	00.00 ml	03.00 ml	06.00 ml	08.00 ml	11.00 ml	14.00 ml	14.00 ml
Prueba 1 Prueba 2 Prueba 3 Prueba 4 Prueba 5 Prueba 6 Promedio Desviación estándar	0%	20.0%	40.0%	60.0%	80.0%	100.0%	
	00.99 NTU	01.67 NTU	01.70 NTU	02.03 NTU	04.85 NTU	106.00 NTU	
	01.65 NTU	01.51 NTU	02.26 NTU	03.33 NTU	07.68 NTU	121.00 NTU	
	01.40 NTU	01.33 NTU	02.10 NTU	03.06 NTU	06.59 NTU	122.00 NTU	
	01.24 NTU	01.62 NTU	02.04 NTU	03.16 NTU	07.52 NTU	123.00 NTU	
	01.32 NTU	01.53 NTU	02.03 NTU	02.90 NTU	06.66 NTU	118.00 NTU	
	01.72 NTU	01.58 NTU	02.33 NTU	03.40 NTU	07.75 NTU	121.07 NTU	
01.39 NTU	01.54 NTU	02.08 NTU	02.98 NTU	06.84 NTU	118.51 NTU		
0.27	0.12	0.22	0.50	1.10	6.35		

Fuente: Elaboración Propia

6: Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de yuca para turbiedad de 300 a 400 NTU

La gráfica presenta los resultados de la sustitución del sulfato de aluminio por almidón de yuca, para una turbiedad entre 300 a 400 NTU, en la cual se denota las correcciones por jeringa realizadas y los parámetros iniciales (I₀) y finales (F₀) del agua luego de la aplicación de caolín.



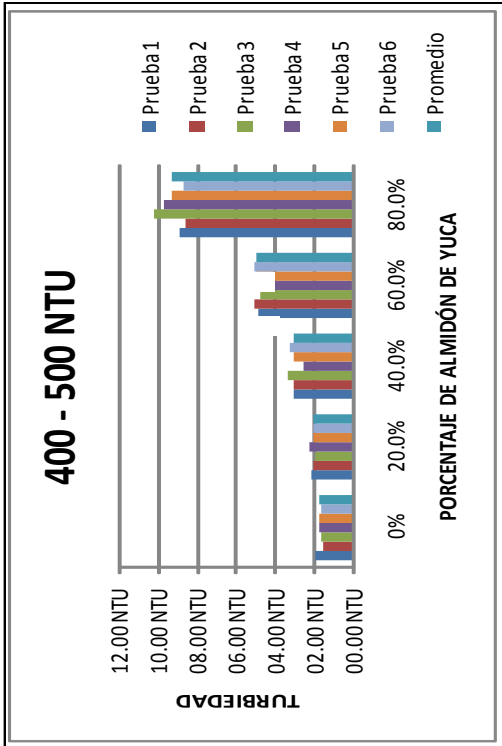
300 - 400 NTU	
Parámetros	F ₀
Turbiedad (NTU)	383
Color (UC)	XX
pH	6.56
Temperatura (°C)	22
Dosis optima	70 mg/lit
Caolín	01.00g/lts

Mezclas	100%	80.0%	60.0%	40.0%	20.0%	0.0%
ML Sulfato de aluminio	14.00 ml	08.40 ml	05.60 ml	02.80 ml	00.00 ml	00.00 ml
ML Almidón de yuca	00.00 ml	02.80 ml	08.40 ml	11.20 ml	14.00 ml	14.00 ml
Corrección por jeringa	14.00 ml	11.00 ml	08.00 ml	06.00 ml	03.00 ml	00.00 ml
	00.00 ml	03.00 ml	06.00 ml	08.00 ml	11.00 ml	14.00 ml
	0%	20.0%	40.0%	60.0%	80.0%	100.0%
Prueba 1	01.79 NTU	01.92 NTU	02.84 NTU	04.66 NTU	08.59 NTU	155.00 NTU
Prueba 2	01.39 NTU	01.79 NTU	02.91 NTU	04.83 NTU	08.39 NTU	159.00 NTU
Prueba 3	01.42 NTU	01.84 NTU	03.15 NTU	04.56 NTU	09.93 NTU	158.00 NTU
Prueba 4	01.57 NTU	02.03 NTU	02.46 NTU	04.90 NTU	09.46 NTU	157.00 NTU
Prueba 5	01.54 NTU	01.90 NTU	02.84 NTU	04.84 NTU	09.09 NTU	157.25 NTU
Prueba 6	01.46 NTU	01.86 NTU	02.98 NTU	04.90 NTU	08.46 NTU	159.07 NTU
Promedio	01.53 NTU	01.89 NTU	02.86 NTU	04.78 NTU	08.99 NTU	157.55 NTU
Desviación estándar	0.15	0.08	0.23	0.14	0.62	1.52

Fuente: Elaboración Propia

7: Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de yuca, para turbiedad de 400 a 500 NTU

La gráfica presenta los resultados de la sustitución del sulfato de aluminio por almidón de yuca, para una turbiedad entre 400 a 500 NTU, en la cual se denota las correcciones por jeringa realizadas y los parámetros iniciales (Io) y finales (Fo) del agua luego de la aplicación de caolín.



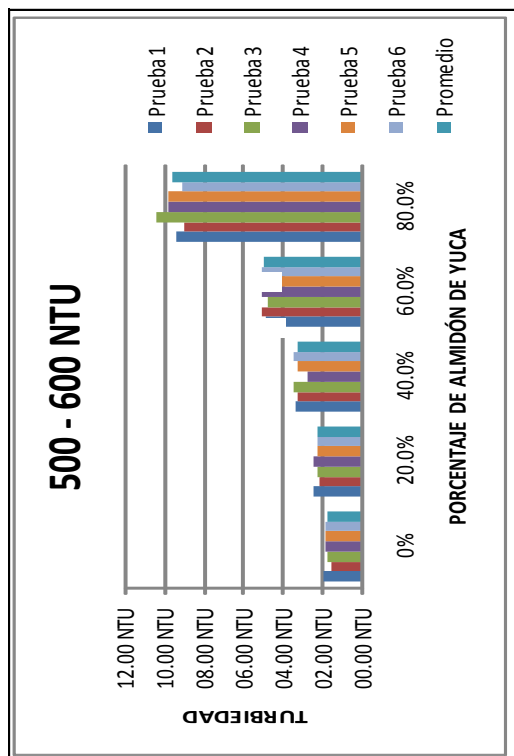
400 - 500 NTU		
Parámetros	Io	Fo
Turbiedad (NTU)	0.57	451
Color (UC)	XX	XX
pH	6.36	6.56
Temperatura (°C)	22	22
Dosis optima	70 mg/lt	14.00 ml
Caolín	01.10g/ts	

Mezclas	PORCENTAJE DE ALMIDÓN DE YUCA					
	100%	80.0%	60.0%	40.0%	20.0%	0.0%
ML Sulfato de aluminio	14.00 ml	11.20 ml	08.40 ml	05.60 ml	02.80 ml	00.00 ml
ML Almidón de yuca	00.00 ml	02.80 ml	05.60 ml	08.40 ml	11.20 ml	14.00 ml
Corrección por jeringa	14.00 ml	11.00 ml	08.00 ml	06.00 ml	03.00 ml	00.00 ml
	00.00 ml	03.00 ml	06.00 ml	08.00 ml	11.00 ml	14.00 ml
Prueba 1 Prueba 2 Prueba 3 Prueba 4 Prueba 5 Prueba 6 Promedio Desviación estándar	0%	20.0%	40.0%	60.0%	80.0%	100.0%
	01.89 NTU	02.15 NTU	03.07 NTU	04.81 NTU	08.89 NTU	232.50 NTU
	01.49 NTU	02.02 NTU	03.06 NTU	05.00 NTU	08.60 NTU	238.50 NTU
	01.62 NTU	01.94 NTU	03.31 NTU	04.74 NTU	10.18 NTU	237.00 NTU
	01.72 NTU	02.18 NTU	02.56 NTU	05.04 NTU	09.69 NTU	235.50 NTU
	01.70 NTU	02.02 NTU	03.05 NTU	04.94 NTU	09.30 NTU	235.88 NTU
	01.64 NTU	02.02 NTU	03.19 NTU	05.00 NTU	08.71 NTU	238.61 NTU
01.68 NTU	02.05 NTU	03.04 NTU	04.92 NTU	09.23 NTU	236.33 NTU	
0.13	0.09	0.26	0.12	0.62	2.28	

Fuente: Elaboración Propia

8: Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de yuca, para turbiedad de 500 a 600 NTU

La gráfica presenta los resultados de la sustitución del sulfato de aluminio por almidón de yuca, para una turbiedad entre 500 a 600 NTU, en la cual se denota las correcciones por jeringa realizadas y los parámetros iniciales (I₀) y finales (F₀) del agua luego de la aplicación de caolín.



500 - 600 NTU		
Parámetros	I ₀	F ₀
Turbiedad (NTU)	0.55	561
Color (UC)	XX	XX
pH	6.36	6.56
Temperatura (°C)	22	22
Dosis optima	70 mg/lit	14.00 ml
Caolín	01.40 g/lts	

Mezclas	100%	80.0%	60.0%	40.0%	20.0%	0.0%
ML Sulfato de aluminio	14.00 ml	11.20 ml	08.40 ml	05.60 ml	02.80 ml	00.00 ml
ML Almidón de yuca	00.00 ml	02.80 ml	05.60 ml	08.40 ml	11.20 ml	14.00 ml

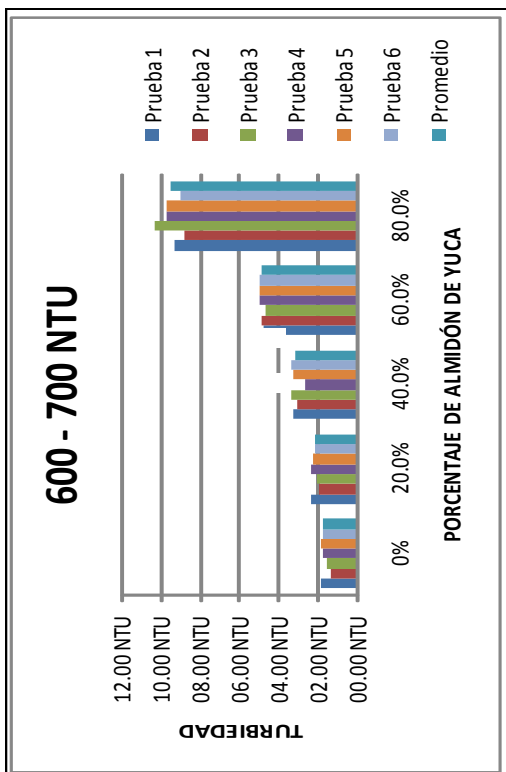
Corrección por jeringa	100%	80.0%	60.0%	40.0%	20.0%	0.0%
	14.00 ml	11.00 ml	08.00 ml	06.00 ml	03.00 ml	00.00 ml
	00.00 ml	03.00 ml	06.00 ml	08.00 ml	11.00 ml	14.00 ml

	0%	20.0%	40.0%	60.0%	80.0%	100.0%
Prueba 1	01.94 NTU	02.39 NTU	03.32 NTU	04.86 NTU	09.34 NTU	348.75 NTU
Prueba 2	01.54 NTU	02.14 NTU	03.27 NTU	05.05 NTU	08.94 NTU	357.75 NTU
Prueba 3	01.67 NTU	02.17 NTU	03.43 NTU	04.77 NTU	10.41 NTU	355.50 NTU
Prueba 4	01.82 NTU	02.38 NTU	02.68 NTU	05.06 NTU	09.81 NTU	353.25 NTU
Prueba 5	01.82 NTU	02.22 NTU	03.26 NTU	04.96 NTU	09.73 NTU	353.81 NTU
Prueba 6	01.79 NTU	02.18 NTU	03.42 NTU	05.01 NTU	09.05 NTU	357.91 NTU
Promedio	01.76 NTU	02.25 NTU	03.23 NTU	04.95 NTU	09.55 NTU	354.50 NTU
Desviación estándar	0.14	0.11	0.28	0.12	0.55	3.41

Fuente: Elaboración Propia

9: Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de yuca, para turbiedad de 600 a 700 NTU

La gráfica presenta los resultados de la sustitución del sulfato de aluminio por almidón de yuca, para una turbiedad entre 600 a 700 NTU, en la cual se denota las correcciones por jeringa realizadas y los parámetros iniciales (Io) y finales (Fo) del agua luego de la aplicación de caolín.



600 - 700 NTU	
Parámetros	Fo
Turbiedad (NTU)	640
Color (UC)	XX
pH	6.56
Temperatura (°C)	22
Dosis optima	70 mg/lt
Caolín	01.60g/lts

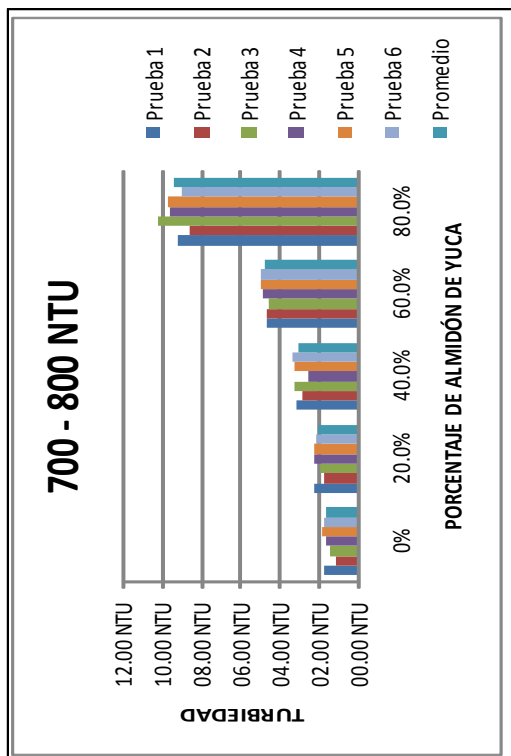
Mezclas	100%	80.0%	60.0%	40.0%	20.0%	0.0%
ML Sulfato de aluminio	14.00 ml	11.20 ml	08.40 ml	05.60 ml	02.80 ml	00.00 ml
ML Almidón de yuca	00.00 ml	02.80 ml	05.60 ml	08.40 ml	11.20 ml	14.00 ml
Corrección por jeringa	14.00 ml	11.00 ml	08.00 ml	06.00 ml	03.00 ml	00.00 ml
	00.00 ml	03.00 ml	06.00 ml	08.00 ml	11.00 ml	14.00 ml

	0%	20.0%	40.0%	60.0%	80.0%	100.0%
Prueba 1	01.84 NTU	02.29 NTU	03.22 NTU	04.76 NTU	09.24 NTU	523.13 NTU
Prueba 2	01.34 NTU	01.94 NTU	03.07 NTU	04.85 NTU	08.74 NTU	536.63 NTU
Prueba 3	01.55 NTU	02.05 NTU	03.31 NTU	04.65 NTU	10.29 NTU	533.25 NTU
Prueba 4	01.72 NTU	02.28 NTU	02.58 NTU	04.96 NTU	09.71 NTU	529.88 NTU
Prueba 5	01.80 NTU	02.20 NTU	03.24 NTU	04.94 NTU	09.71 NTU	530.72 NTU
Prueba 6	01.74 NTU	02.13 NTU	03.37 NTU	04.96 NTU	09.00 NTU	536.86 NTU
Promedio	01.67 NTU	02.15 NTU	03.13 NTU	04.85 NTU	09.45 NTU	531.74 NTU
Desviación estándar	0.19	0.14	0.29	0.13	0.56	5.12

Fuente: Elaboración Propia

10: Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de yuca, para turbiedad de 700 a 800 NTU

La gráfica presenta los resultados de la sustitución del sulfato de aluminio por almidón de yuca, para una turbiedad entre 700 a 800 NTU, en la cual se denota las correcciones por jeringa realizadas y los parámetros iniciales (Io) y finales (Fo) del agua luego de la aplicación de caolín.



700 - 800 NTU		
Parámetros	Io	Fo
Turbiedad (NTU)	0.55	735
Color (UC)	XX	XX
pH	6.36	6.56
Temperatura (°C)	22	22
Dosis optima	70 mg/lit	14.00 ml
Caolín	01.70 g/lts	

Mezclas	100%	80.0%	60.0%	40.0%	20.0%	0.0%
ML Sulfato de aluminio	14.00 ml	11.20 ml	08.40 ml	05.60 ml	02.80 ml	00.00 ml
ML Almidón de yuca	00.00 ml	02.80 ml	05.60 ml	08.40 ml	11.20 ml	14.00 ml

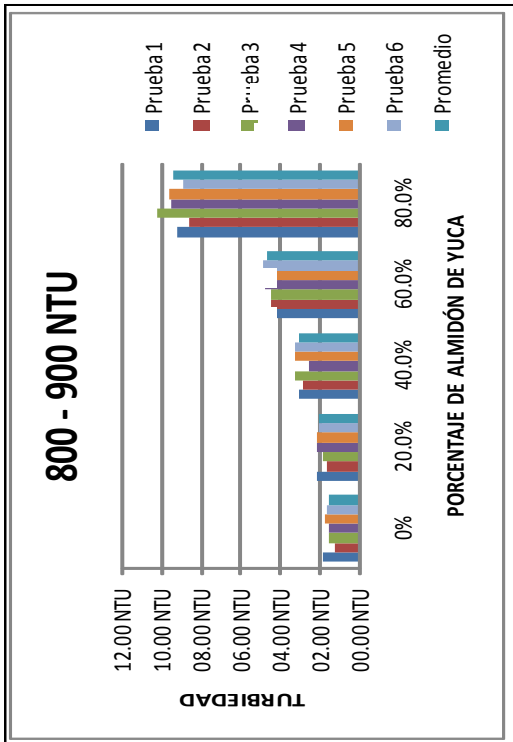
Corrección por jeringa	100%	80.0%	60.0%	40.0%	20.0%	0.0%
	14.00 ml	11.00 ml	08.00 ml	06.00 ml	03.00 ml	00.00 ml
	00.00 ml	03.00 ml	06.00 ml	08.00 ml	11.00 ml	14.00 ml

	0%	20.0%	40.0%	60.0%	80.0%	100.0%
Prueba 1	01.74 NTU	02.19 NTU	03.12 NTU	04.66 NTU	09.14 NTU	653.91 NTU
Prueba 2	01.14 NTU	01.74 NTU	02.87 NTU	04.65 NTU	08.54 NTU	670.78 NTU
Prueba 3	01.43 NTU	01.93 NTU	03.19 NTU	04.53 NTU	10.17 NTU	666.56 NTU
Prueba 4	01.62 NTU	02.18 NTU	02.48 NTU	04.86 NTU	09.61 NTU	662.34 NTU
Prueba 5	01.78 NTU	02.18 NTU	03.22 NTU	04.92 NTU	09.69 NTU	663.40 NTU
Prueba 6	01.69 NTU	02.08 NTU	03.32 NTU	04.91 NTU	08.95 NTU	671.08 NTU
Promedio	01.57 NTU	02.05 NTU	03.03 NTU	04.75 NTU	09.35 NTU	664.68 NTU
Desviación estándar	0.24	0.18	0.31	0.16	0.59	6.40

Fuente: Elaboración Propia

11: Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de yuca, para turbiedad de 800 a 900 NTU

La gráfica presenta los resultados de la sustitución del sulfato de aluminio por almidón de yuca, para una turbiedad entre 800 a 900 NTU, en la cual se denota las correcciones por jeringa realizadas y los parámetros iniciales (I₀) y finales (F₀) del agua luego de la aplicación de caolín.



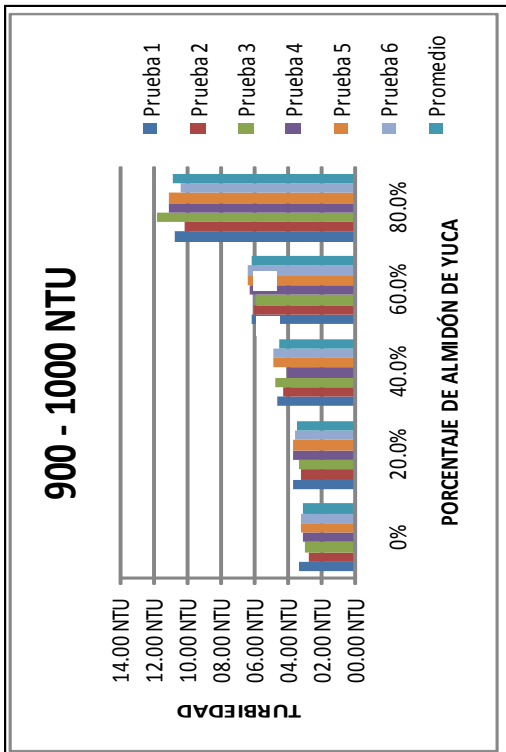
800 - 900 NTU		
Parámetros	I ₀	F ₀
Turbiedad (NTU)	0.55	855
Color (UC)	XX	XX
pH	6.7	6.75
Temperatura (°C)	22	22
Dosis optima	70 mg/lit	14.00 ml
Caolín	01.80g/lts	

Mezclas	100%	80.0%	60.0%	40.0%	20.0%	80.0%	100.0%
ML Sulfato de aluminio	14.00 ml	11.20 ml	08.40 ml	05.60 ml	02.80 ml	00.00 ml	00.00 ml
ML Almidón de yuca	00.00 ml	02.80 ml	05.60 ml	08.40 ml	11.20 ml	14.00 ml	14.00 ml
Corrección por jeringa	14.00 ml	11.00 ml	08.00 ml	06.00 ml	03.00 ml	00.00 ml	00.00 ml
	00.00 ml	03.00 ml	06.00 ml	08.00 ml	11.00 ml	14.00 ml	14.00 ml
Prueba 1	01.79 NTU	02.11 NTU	03.04 NTU	04.56 NTU	09.19 NTU	762.89 NTU	762.89 NTU
Prueba 2	01.19 NTU	01.66 NTU	02.79 NTU	04.45 NTU	08.59 NTU	782.58 NTU	782.58 NTU
Prueba 3	01.48 NTU	01.81 NTU	03.24 NTU	04.41 NTU	10.22 NTU	777.66 NTU	777.66 NTU
Prueba 4	01.54 NTU	02.10 NTU	02.53 NTU	04.78 NTU	09.51 NTU	772.73 NTU	772.73 NTU
Prueba 5	01.70 NTU	02.10 NTU	03.27 NTU	04.84 NTU	09.61 NTU	773.96 NTU	773.96 NTU
Prueba 6	01.64 NTU	02.03 NTU	03.27 NTU	04.86 NTU	08.87 NTU	782.92 NTU	782.92 NTU
Promedio	01.56 NTU	01.97 NTU	03.02 NTU	04.65 NTU	09.33 NTU	775.46 NTU	775.46 NTU
Desviación estándar	0.21	0.19	0.31	0.20	0.58	7.47	7.47

Fuente: Elaboración Propia

12: Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de yuca, para turbiedad de 900 a 1 000 NTU

La grafica presenta los resultados de la sustitución del sulfato de aluminio por almidón de yuca, para una turbiedad entre 900 a 1 000 NTU, en la cual se denota las correcciones por jeringa realizadas y los parámetros iniciales (Io) y finales (Fo) del agua luego de la aplicación de caolín.



900 - 1000 NTU		
Parámetros	Io	Fo
Turbiedad (NTU)	0.55	975
Color (UC)	XX	XX
pH	6.71	6.8
Temperatura (°C)	22	22
Dosis optima	70 mg/lt	14.00 ml
Caolín	02.00 g/lts	

Mezclas	100%	80.0%	60.0%	40.0%	20.0%	0.0%
ML Sulfato de aluminio	14.00 ml	11.20 ml	08.40 ml	05.60 ml	02.80 ml	00.00 ml
ML Almidón de yuca	00.00 ml	02.80 ml	05.60 ml	08.40 ml	11.20 ml	14.00 ml

Corrección por jeringa	100%	80.0%	60.0%	40.0%	20.0%	0.0%
	14.00 ml	11.00 ml	08.00 ml	06.00 ml	03.00 ml	00.00 ml
	00.00 ml	03.00 ml	06.00 ml	08.00 ml	11.00 ml	14.00 ml

	0%	20.0%	40.0%	60.0%	80.0%	100.0%
Prueba 1	03.29 NTU	03.61 NTU	04.54 NTU	06.06 NTU	10.69 NTU	858.25 NTU
Prueba 2	02.69 NTU	03.16 NTU	04.29 NTU	05.95 NTU	10.09 NTU	880.40 NTU
Prueba 3	02.98 NTU	03.31 NTU	04.74 NTU	05.91 NTU	11.72 NTU	874.86 NTU
Prueba 4	03.04 NTU	03.60 NTU	04.03 NTU	06.28 NTU	11.01 NTU	869.33 NTU
Prueba 5	03.20 NTU	03.60 NTU	04.77 NTU	06.34 NTU	11.11 NTU	870.71 NTU
Prueba 6	03.14 NTU	03.53 NTU	04.77 NTU	06.36 NTU	10.37 NTU	880.79 NTU
Promedio	03.06 NTU	03.47 NTU	04.52 NTU	06.15 NTU	10.83 NTU	872.39 NTU
Desviación estándar	0.21	0.19	0.31	0.20	0.58	8.40

Fuente: Elaboración Propia

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A través de las tablas y graficas expuestas anteriormente se puede determinar lo siguiente:

- En la grafica No. 3 se aprecia que se puede sustituir hasta un 80 % de sulfato de aluminio por almidón de yuca, para que se cumpla el Límite Máximo Permisible, según la Norma NTG Coguanor 29001, referente al parámetro de turbiedad, el cual corresponde para una turbiedad entre 0 a 100 NTU.
- A partir de la grafica No. 4 a la No. 11, equivalente a un rango de turbiedad de 100 a 900 NTU, se reduce la sustitución del sulfato de aluminio por almidón de yuca, hasta un 60 %, para que la calidad del agua cumpla con el Límite Máximo Permisible referente al parámetro de turbiedad, para la Norma NTG Coguanor 29001.
- La grafica No. 12 demuestra que para un rango de turbiedad de 900 a 1 000, se puede sustituir hasta un 40 % el sulfato de aluminio por almidón de yuca, para que la calidad del agua cumpla con el Límite Máximo Permisible referente al parámetro de turbiedad, para la Norma NTG Coguanor 29001.
- Al análisis el comportamiento de la sustitución del 100 % de sulfato de aluminio por almidón de yuca, se determinó que se obtienen mejores resultado en turbiedades para rangos de 300 a 400 NTU, donde se logro remover el 58,56 %.
- Al momento de sustituir el 100% del sulfato de aluminio únicamente se logra disminuir el 32,67% de la turbiedad, por lo cual el almidón de yuca debe de ir acompañado por el sulfato de aluminio para disminuir efectivamente la turbiedad.

4.1 Análisis de la sustitución del 100 % del sulfato de aluminio por almidón de yuca

Como parte y alcances del estudio se realizó el análisis de la sustitución del 100 % del sulfato de aluminio por almidón de yuca, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla VI: **Sustitución del 100% de sulfato de aluminio**

	0-100 NTU	100-200 NTU	200-300 NTU	300-400 NTU	400-500 NTU	500-600 NTU	600-700 NTU	700-800 NTU	800-900 NTU	900-1 000 NTU
Turbiedad inicial	82,22	148	262	383	451	561	640	735	855	975
Turbiedad final 100 % almidón de yuca	50,77	82,72	118,51	157,55	236,33	354,50	531,74	664,68	775,46	872,39
Porcentaje de turbiedad removida 100% almidón de yuca	38,26 %	44,11 %	54,77 %	58,86 %	47,60 %	36,81 %	16,92 %	9,57 %	9,30 %	10,52 %
Porcentaje turbiedad residual	61.74 %	55,89%	45,23 %	41,14 %	52,40 %	63,19 %	83,08 %	90,43 %	90,70 %	89,48 %

Fuente: Elaboración Propia

De lo anterior se observa que al sustituir el 100 % del sulfato de aluminio por almidón de yuca, no se logra reducir a menos de 5 NTU la turbiedad, solo fue posible reducir en la corrida total de pruebas un promedio del 32,67 %, por lo cual se puede afirmar que no es posible sustituir el 100% de sulfato de aluminio por almidón de yuca.

4.2 Factibilidad técnica y economía del uso del almidón de yuca en el proceso de coagulación-floculación

Para poder definir y comprender de mejor manera la factibilidad técnica y económica de la utilización del almidón de yuca, como ayudante en el proceso coagulación-floculación, a escala real, se realizan las siguientes anotaciones que se consideran se deberán tener en cuenta.

- Durante la realización del presente estudio, se realizó la búsqueda de empresas que se dedicaran al proceso de extracción de almidón de yuca en cantidades industriales, obteniendo como resultado que en la región, países como México y Colombia poseen industrias de este tipo, en Guatemala o Centro América no se logró constatar que contara con una industrial que se desarrolle en este ámbito.

De lo anterior se toma como base que el uso de productos naturales busca la reducción de costos y por ende lograr la producción regional o nacional, con el fin de reducir costos de importación y otros. La producción del almidón de yuca pasaría a ser una actividad puramente artesanal, la cual reduciría el campo de acción de la sustitución de sulfato de aluminio a almidón de yuca, en aquellos sistemas pequeños, donde el manejo se dé a nivel comunitario donde, todos los beneficiarios del proceso de potabilización tomarán parte en la extracción de almidón de yuca.

- Antes de determinar y seleccionar al almidón de yuca como opción para el uso de ayudante en el proceso coagulación-floculación, es necesario realizar un análisis a fondo de la situación alimentaria de la región o lugar donde se empleará, ya que el uso de la yuca como un agente para el proceso de potabilización de agua podría poner en peligro la situación alimentaria.

- La utilización del almidón de yuca en el proceso de potabilización, requiere la capacitación del personal enrolado en el tema, enseñando para el uso del mismo, almacenamiento, manejo y extracción. En referencia al almacenamiento es importante mencionar que debido a que es un material orgánico, el mismo es perecedero, lo cual indica que se deber de determinar el tiempo de uso del mismo, porque es posible que al agregar perseverantes al almidón el mismo pueda perder o disminuir su propiedades.
- Al realizar el análisis económico se determinó que el precio de un kilogramo de sulfato de aluminio⁸ es de alrededor de Q. 3,75, lo cual indica que con referencia al precio de un kilogramo de yuca este posee un precio de Q. 22.00, pero del kilogramo de yuca se obtienen 0,20 kilogramos de almidón de yuca, esto indica que para obtener 1 kilogramos de almidón de yuca se requiere una inversión de Q.110,00, al cual habría que sumarle el costo de extracción del almidón, pasa a ser poco viable desde el punto de vista económico la sustitución de este.

⁸ Precio consultado en el portal de Guatecompras.gt – Evento 5,000 toneladas métricas de sulfato de aluminio, febrero 2014, EMPAGUA.

CONCLUSIONES

1. El almidón de yuca puede sustituir al sulfato de aluminio hasta un 60 % de la dosis óptima, para lograr valores de turbiedad inferiores a 5 NTU, logrando así comprobar y demostrar la hipótesis planteada
2. Se determinó que para turbiedades entre 0–100 NTU, se puede sustituir hasta un 80 % de sulfato de aluminio por almidón de yuca de la dosis óptima. Para turbiedades que oscilan entre 100 NTU y 900 NTU es posible sustituir hasta un 60 % de la dosis óptima, y para turbiedades de 900–1 000 NTU es posible únicamente sustituir hasta un 40 % el sulfato de aluminio por almidón de yuca.
3. Los mejores resultados en el uso del almidón de yuca como ayudante en el proceso floculación-coagulación se da en turbiedades entre 300 a 400 NTU, ya que al sustituir el 100 % del sulfato de aluminio por almidón de yuca, se obtuvo una remoción del 58,56 % del valor de turbiedad.
4. Tanto técnica como económica, no es factible el uso del almidón de yuca como ayudante en el proceso de coagulación- floculación, porque no existen en el país o región centroamericana empresas que se dediquen a la extracción de almidón de yuca en cantidades industriales, por lo cual el proceso pasa a ser artesanal, y desde el punto de vista económico el costo del kilogramo de almidón de yuca es 29,33 veces más caro que el sulfato de aluminio, esto sin incluir el costo de la extracción de almidón.

RECOMENDACIONES

1. No se recomienda el uso del almidón de yuca para uso a gran escala, debido a que el manejo de este producto orgánico es más complejo, como también su vida útil es más reducido, además presenta el inconveniente económico, que el valor del kilogramo de sulfato de aluminio es 5,87 veces más bajo que el del almidón de yuca y este no incluye el costo del proceso de extracción del almidón.
2. El uso de la yuca para la obtención de almidón compite con el de sustento alimenticio, por lo cual se debe sopesar tal situación al momento de ser seleccionado como tecnología para el proceso de coagulación-floculación para la potabilización del agua.
3. Es factible el uso del almidón de yuca, como ayudante en el proceso floculación-coagulación, en procesos de potabilización artesanales, además donde no se ponga en peligro el sustento alimenticio y realizar la capacitación necesaria a los usuarios para la obtención del almidón de yuca.
4. Realizar otros estudios donde se compare varios tipos de almidones naturales para ser utilizados como ayudantes en el proceso de floculación-coagulación, luego con los resultados obtenidos por este estudio y así determinar cuál es más aconsejable y factible para utilizar en la región.

BIBLIOGRAFÍA

1. Andía, Yolanda. 2000. *Tratamiento de agua coagulación y floculación*. Lima, Peru : SEDAPAL, 234 p.
2. Aparicio, M. A. 2003. *Caracterización fisicoquímica de los almidones nativos y modificados de yuca (Manihot esculenta Crantz), camote (Ipomeae batata Lam) y plátano valery (Musa cavendish)*. Veracruz, México : Tesis Doctoral, Universidad Veracruzana, 123 p.
3. Arboleda V., Jorge, Castro, María Luisa y Kirchmer, Dr. Cliff J. 1975. *Polímeros Naturales y su aplicación como ayudantes de floculación*. Lima, Peru : Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), 205 p.
4. Aspinal, G. 1983. *The Polysaccharides*. New York, Estados Unidos de América : Academic Press., Vol. 3. 89 p.
5. Bratby, J. 2006. *Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment*. s.l. : IWA Publishing, 2006. 2a. Ed. 178 p.
6. Cock, H. 1980. *Dátil de la yuca*. Mexico : CONACYT,65 p.
7. DelaVega, Gustavo. 2009. *Proteínas de la harina de trigo: Clasificación y propiedades funcionales*. Mexico : Universidad Tecnológica de la Mixteca, 98 p.
8. Duprat, F.; et al. 1980. *Les polymères végétaux*. Paris : Monties.,. 312 p.

9. Guillen, Juan Manuel Mejia. 1986. *La utilización de la Moringa Oleifera como coagulante natural*. Guatemala : Estudio Especial, ERIS - USAC -, 65 p.
10. Martínez, D., y otros. 2003. *Eficiencia del catus lefaria para su uso como coagulante en la clarificación de aguas*. s.l. : Rev. Téc. Fac. Ing. Univ. (RTFIUZ), 156 p.
11. Hernández Barajas, José Roberto, Laines, José Ramón y Solís, Rudy. 2012. *Mezclas con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales*. 3, Villahermosa, Tabasco, México : División Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Vol. 28. 276 p.
12. Morán, Eddy René Martínez. 1987. *El uso de fécula de maiz como una alternativa de ayuda en el proceso de coagulación del agua cuando se emplea el sulfato de aluminio*. Guatemala : Estudio Especial, (ERIS-USAC), 102 p.
13. OMS. 2006. *Guías para la calidad del agua potable*. Suiza : Organización Mundial de la Salud, 2006. 133 p.
14. R., Guerrero. 1979. *Manual de Tratamiento de aguas*. Mexico : Limusa, 125p.
15. Sasso, Lo. 1972. *Handling, storing, application, and purchase of water soluble polyelectrolyte*. Chicago : AWWA Symposium, 172 p.
16. Schulz, C. R. y Okun, D. A. 2005. *Tratamiento de aguas superficiales para países en desarrollo*. Mexico : Limusa, 259 p.
17. Suarez, Diana. 1984. *Solar Desinfección Drinking Water and Oral Rehydration Solutions*. Suiza : UNICEF, 120 p.

18. Taggart, P. 2004. *Starch as an ingrediente: manufacture and applications*. In. Eliasson, A-C. *Starch in food. Structure, function and applications*. Cambridge, Reino Unido : Woodhead Publishing Limited, 204 p.

19. Teresa, Johana y Mejía, Danilo. 2007. *Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca*. Roma, Italia : Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 217 p.

20. Vargas, Lidia de. 2003. *Floculación*. Peru : s.n., 243p.