

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Química

**Determinación de los parámetros de diseño y el porcentaje de
sustitución del cloruro férrico por el almidón de yuca en el
proceso de clarificación y remoción de arsénico de las
aguas del río Uchusuma (Provincia, Tacna) y
propuesta de diseño de un reactor
batch a nivel domiciliario**

TESIS

Presentada por:

Bach. Paola Gabriela Gutiérrez Cámero

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO QUÍMICO

TACNA – PERÚ

2019

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN - TACNA

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Química

Determinación de los parámetros de diseño y el porcentaje de sustitución del cloruro férrico por el almidón de yuca en el proceso de clarificación y remoción de arsénico de las aguas del río Uchusuma (Provincia, Tacna) y propuesta de diseño de un reactor batch a nivel domiciliario

Tesis sustentado por Bach. Paola Gabriela Gutiérrez Cámero el día 29 de Diciembre del 2018, estando integrado el jurado por:

Presidente : 

Mgr. Pedro Nolasco Cornejo del Carpio

Secretario : 

MSc. Hubert Orlando Oporto Siles

Vocal : 

Ing. William Edgar Torres Huayta

Asesor : 

Dr. Edgardo Oscar Avendaño Cáceres

DEDICATORIA

A mis padres por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo.

A mi esposo por creer en mí y apoyarme cada día a seguir adelante.

Todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos.

AGRADECIMIENTO

A nuestro Creador, que permite la existencia, las realizaciones y la posibilidad de alcanzar una meta, o quizás por estar comprendido en parte de su voluntad.

A mi asesor Dr. Edgardo Oscar Avendaño Cáceres por su apoyo en la presente tesis.

A mis colegas, amigos y compañeros de trabajo, que contribuyeron a materializar esta obra.

CONTENIDO

Dedicatoria	iii
Agradecimiento	iv
Resumen	xiii
Introducción	1
CAPÍTULO I	4
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.1. Descripción del problema	4
1.1.1. Antecedentes del problema	5
1.1.2. Problemática de la investigación	8
1.2. Formulación del problema	9
1.3. Justificación e importancia	9
1.4. Alcances y limitaciones	10
1.5. Objetivos	11
1.5.1. Objetivo general	11
1.5.2. Objetivo específicos	11

1.6.	Hipótesis	12
1.6.1.	Hipótesis general	12
1.6.2.	Hipótesis específica	12
CAPÍTULO II		13
MARCO TEÓRICO		13
2.1	Antecedentes del estudio	13
2.2	Bases teóricas	20
2.3	Definición de términos	24
CAPÍTULO III		28
MARCO METODOLÓGICO		28
3.1	Tipo y diseño de la investigación	28
3.2	Población y muestra (según el caso)	29
3.3	Operacionalización de variables	29
3.4	Técnicas e instrumentos para recolección de datos	31
3.4.1	Técnicas de recolección de datos	31
3.4.2	Instrumentos, equipos, materiales y reactivo	37
3.5	Procesamiento y análisis de datos	40

CAPÍTULO IV	48
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	48
4.1. Resultados	48
4.2. Discusión de resultados	95
CONCLUSIONES	98
RECOMENDACIONES	100
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
ANEXOS	109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Porcentaje de almidón, proteínas, fibras y ceniza de algunas fuentes de almidón.	7
Tabla 2: Operacionalización de variables	30
Tabla 3: Combinaciones de sustitución de cloruro férrico	37
Tabla 4: Arreglo experimental del diseño factorial 2 ⁴	41
Tabla 5: Arreglo experimental reducido del diseño compuesto central	42
Tabla 6: Variable codificada y no codificadas utilizando la estructura del diseño compuesto central más puntos centrales, para la remoción de arsénico	43
Tabla 7: Niveles de los factores principales para la remoción de turbidez	44
Tabla 8: Variables codificadas y no codificadas utilizando la estructura del diseño compuesto central más puntos centrales para la remoción de la turbiedad para turbiedades de 150 NTU	45
Tabla 9: Variables codificadas y no codificadas utilizando la estructura del diseño compuesto central más puntos centrales para la remoción de la turbiedad a 300 NTU	46

Tabla 10: Variables codificadas y no codificadas utilizando la estructura del diseño compuesto central más puntos centrales para la remoción de la turbiedad a 400 NTU	47
Tabla 11: Determinación de dosis óptima	48
Tabla 12: Matriz diseño factorial 24, respuesta de arsénico, hierro total	50
Tabla 13: Análisis de varianza para la remoción de arsénico	51
Tabla 14: Análisis respecto a la regresión para la remoción de arsénico	52
Tabla 15: Matriz de diseño experimental, respuesta de arsénico, hierro total	53
Tabla 16: Análisis de varianza para la remoción de hierro	55
Tabla 17: Análisis respecto a la regresión para la remoción de hierro	56
Tabla 18: Resumen de ajuste estadístico	56
Tabla 19: Matriz de diseño experimental y respuesta del proceso de clarificación con turbidez 150 NTU	60
Tabla 20: Matriz de diseño experimental y respuesta del proceso de clarificación con turbidez 300 NTU	61
Tabla 21: Matriz de diseño experimental y respuesta del proceso de clarificación con turbidez 400 NTU	62
Tabla 22: Análisis de varianza para el proceso de clarificación, con turbidez	

150 NTU	63
Tabla 23: Análisis respecto a la regresión para el proceso de clarificación, turbidez inicial 150 NTU	64
Tabla 24: Resumen de ajuste estadístico	65
Tabla 25: Análisis de varianza para el proceso de clarificación, turbidez inicial 300 NTU	71
Tabla 26: Análisis respecto a la regresión para el proceso de clarificación, turbidez inicial 300 NTU	72
Tabla 27: Resumen de ajuste estadístico	73
Tabla 28: Análisis de varianza para el proceso de clarificación, turbidez inicial 400 NTU	79
Tabla 29: Análisis respecto a la regresión para el proceso de clarificación, turbidez inicial 400 NTU	80
Tabla 30: Resumen de ajuste estadístico	81
Tabla 31: Caracterización del almidón de yuca	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tanque con deflectores y agitador de turbina de paletas planas con patrón de flujo axial, a) vista lateral, b) vista de fondo.	17
Figura 2. Varios tipos de agitadores: a) paleta de cuatro aspas, b) paleta de compuerta o ancla, c) turbina de seis aspas, d) turbina de aspas inclinadas (45°)	18
Figura 3. Estructura molecular de la amilasa	24
Figura 4. Estructura molecular de la amilopectina	25
Figura 5. Diagrama de pareto para la remoción de arsénico	51
Figura 6. Diagrama de pareto para la remoción de hierro	55
Figura 7. Superficie de respuesta para la variable dependiente hierro total vs las variables independientes velocidad de floculación y dosis de coagulante	58
Figura 8. Diagrama de pareto para la remoción de la turbidez	63
Figura 9. Superficie de respuesta para la variable de turbidez vs las variables independientes tiempo de sedimentación y dosis del coagulante, manteniendo constante la velocidad de floculación y tiempo de floculación	67

Figura 10. Superficie de respuesta para la variable de turbidez vs las variables independientes, velocidad de floculación y tiempo de floculación, manteniendo constante tiempo de sedimentación y dosis del coagulante	68
Figura 11. Diagrama de pareto para el proceso de clarificación, turbidez inicial 300 NTU	71
Figura 12. Superficie de respuesta para la variable de turbidez vs las variables independientes tiempo de sedimentación y dosis de coagulante, manteniendo constante la velocidad de floculación y el tiempo de floculación	75
Figura 13. Superficie de respuesta para la variable de turbidez vs las variables independientes, velocidad de floculación y tiempo de floculación.	76
Figura 14. Diagrama de Pareto en el proceso de clarificación	79
Figura 15. Superficie de respuesta para la variable de turbidez vs velocidad de floculación vs tiempo de floculación, manteniendo constante el tiempo de sedimentación y dosis del coagulante	83
Figura 16. Correlaciones de potencia para diversos impulsores y deflectores	89
Figura 17. Dimensionamiento del tanque	94

RESUMEN

El manejo de polímeros como ayudante de la coagulación y floculación está bastante extendido y es práctica corriente en muchas plantas de tratamiento de agua. Desde el punto de vista ambiental y de salud, hay reportes que en el análisis realizado a muestras de agua potable se han encontrado trazas de sulfato de aluminio y cloruro férrico (Arboleda et al, (1975)), que sobrepasan los límites máximos permisibles ocasionando potenciales problemas estéticos en el caso del hierro y a la salud para el caso del aluminio; por esta razón la investigación es orientada a encontrar qué porcentaje del cloruro férrico puede ser sustituido por almidón de yuca, en el proceso de coagulación- floculación.

En el presente trabajo se planteó como objetivo determinar el porcentaje de sustitución del cloruro férrico por el almidón de yuca en el proceso de clarificación y remoción de arsénico. Se utilizó un diseño experimental factorial y de superficie de respuesta donde se determinó que los factores significativos para el proceso de clarificación fueron velocidad de agitación (rpm), tiempo de agitación (min), tiempo de sedimentación (min) y proporción de coagulante (%). Para la remoción de arsénico total, las variables significativas encontradas son la velocidad de agitación (rpm) y dosis del coagulante (%). Se obtuvo remociones de arsénico total menores a 0,005 mg/L y de hierro total 0,15 mg/L; logrando sustituir el cloruro férrico en un 40 % por almidón de yuca.

Para el proceso de clarificación, se obtuvieron remociones de turbidez menores a 1 NTU, logrando sustituir al cloruro férrico en un 60 % por almidón de yuca.

Para la propuesta de diseño del reactor batch, se realizó el dimensionamiento para un reactor de 20 litros realizado en base a los factores de forma de reactor piloto (prueba de jarras), resultando las siguientes dimensiones diámetro del tanque es de 32,5 cm, diámetro de la paleta es de 16,3 cm, largo de la paleta es de 4,1 cm, altura de la paleta es 10,8 cm, ancho de la paleta es de 3,3 cm, y altura del tanque es 32,5 cm.

INTRODUCCIÓN

La calidad del agua es una creciente preocupación en las ciudades en vías de desarrollo. Las fuentes de agua potable están bajo la amenaza creciente de la contaminación, con consecuencias de gran alcance para la salud de niños y para el desarrollo económico y social de comunidades y naciones. (UNICEF, 2014).

Los recursos hídricos del planeta están sometidos a contaminación física, química y/o biológica. El avance de la actividad humana (industria, agricultura, ganadería, entre otras), el crecimiento demográfico, el desarrollo de las ciudades y la falta de medidas y programas para dar respuesta a dichos cambios, genera un ambiente que favorece al avance de la contaminación. Por esta razón las medidas que se deben tomar para descontaminar los efluentes deben ser cada vez más urgentes, siendo necesario la búsqueda de nuevas alternativas basadas en investigaciones sobre diferentes sistemas de tratamiento de aguas que faciliten una mejor calidad y una protección adecuada de los recursos hídrico, (Sánchez et al, 2011).

Países en vías de desarrollo, han adaptado una serie de tecnologías tradicionales para eliminar el arsénico y la turbidez del agua en el ámbito doméstico. De ellas la más estudiada es la utilización de extractos naturales de plantas para la clarificación del agua cruda (Dorea, 2006).

Los procesos de coagulación-floculación son metodologías propias y habituales en plantas potabilizadoras, principalmente para remoción de materia suspendida y clarificación del agua. En una primera etapa los compuestos químicos en solución se adsorben a la superficie de partículas sólidas en suspensión y posteriormente en la coagulación, estos coloides se agrupan formando flóculos de mayor tamaño, los cuales son removidos mediante precipitación o filtración.

La precipitación-coprecipitación consiste básicamente en la adición de productos químicos al agua; el mezclado, la formación de una matriz sólida y, a través de la precipitación, coprecipitación o una combinación de estos procesos, en la separación de la matriz sólida del agua. El tratamiento de precipitación-coprecipitación incluye la adición de oxidantes químicos, ajustes de pH y coagulantes o precipitantes químicos. Entre los factores de importancia para la remediación con este método, se han identificado el tipo y la dosis del coagulante, tiempo de mezcla, estado de oxidación y concentración de arsénico inicial, temperatura, presencia de otros solutos inorgánicos y el pH (Romero Rojas 1999)

Investigadores mediante distintos estudios y evaluaciones han podido identificar y distinguir varios tipos de plantas, para este propósito. El empleo de coagulantes naturales puede ayudar a minimizar o evitar la importación de los coagulantes químicos (Guzman, Villaboa, Tejada & García, 2013).

El arsénico representa una amenaza importante para la salud pública cuando se encuentra en aguas subterráneas contaminadas. El arsénico inorgánico está naturalmente presente en altos niveles en las aguas subterráneas de diversos países, entre ellos Argentina, Bangladesh, Chile, China, India, México y los Estados Unidos de América. Las principales fuentes de exposición son: el agua destinada a consumo humano, los cultivos regados con agua contaminada y los alimentos preparados con agua contaminada.

Los pescados, mariscos, carnes, aves de corral, productos lácteos y cereales también pueden ser fuentes alimentarias de arsénico, aunque la exposición a través de estos alimentos suele ser muy inferior a la exposición a través de aguas subterráneas contaminadas.

Dentro de este contexto se estudiará el uso de las proporciones del almidón de yuca como coagulante natural y el cloruro férrico, para la remoción de arsénico y el proceso de clarificación del agua del Río Uchusuma el cual nace de la confluencia de las Quebradas Carini y Uncalluta que tienen sus nacientes en los nevados de Coruña, Auquitaípe, Casiri, Mamuta, Paucarani, Barrosos, Huancune y en las Lagunas Paucarani, Sitpicota y Condorpico.

El Río Uchusuma presenta las siguientes características fisicoquímicas de pH de 8 a 8,5, concentración de arsénico de 0,2 mg/L y la concentración de hierro 0,3 mg/L.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

El agua es un recurso primordial para los seres vivos y para las actividades socioeconómicas del hombre. La clarificación del agua cruda es una de las etapas más importantes, ya que permite la remoción de materiales de naturaleza coloidal en suspensión. Para lograr el propósito de clarificar el agua, es necesaria la utilización de agentes coagulantes, así como coadyuvantes de coagulación, que permiten eliminar un porcentaje significativo de sólidos suspendidos, compuestos orgánicos disueltos, compuestos iónicos disueltos (sales), gases y microorganismos que pueden afectar la salud de los consumidores (Cartwright, 2009).

Los agentes convencionales utilizados en la coagulación - floculación son sales metálicas tales como el sulfato de aluminio, el cloruro férrico y el sulfato ferroso, siendo el coagulante más utilizado el sulfato de aluminio. “Este compuesto al disociarse en agua, sufre una serie de reacciones con los iones alcalinos presentes en el agua, formando iones complejos, polímeros e hidróxido de aluminio insoluble, que pueden ser adsorbidos por las partículas coloidales suspendidas en el agua, produciendo la desestabilización de las

cargas y favoreciendo la sedimentación de las mismas” (Solis Silvan, Rudy, Laines Canepa, José Ramón, 2012, pág. 230).

La efectividad de estos coagulantes es bien conocida, sin embargo hay desventajas asociadas con el uso de estos compuestos, tales como su ineficiencia a baja temperatura, altos costos de adquisición, producción de grandes volúmenes de lodo y el hecho de que afectan significativamente el pH del agua tratada.

La solución a la problemática de la falta de acceso al agua potable, debe encaminarse al desarrollo de tecnologías innovadoras, eficaces, sostenibles, económicas, fiables y fáciles de manejar, que sean socialmente aceptadas por la comunidad y que permitan dotar de agua de calidad a la población mejorando así su situación sanitaria y condiciones de vida. En los últimos años se ha tenido gran interés en el desarrollo del uso de coagulantes naturales, los cuales pueden ser producidos o extraídos a partir de microorganismos, tejidos de plantas o animales. Estos coagulantes son biodegradables y seguros para la salud humana.

1.1.1. Antecedentes del problema

Generalmente las plantas potabilizadoras utilizan como coagulantes las sales de aluminio o de hierro para desestabilizar partículas coloidales, pero con el propósito de reducir el consumo de reactivos químicos se utilizaron coagulantes de origen natural; sin embargo, el desarrollo de

estos coagulantes no tuvieron un auge significativo debido a la comercialización y utilización de polímeros sintéticos en procesos convencionales de tratamiento como coagulantes primarios o ayudantes de floculación, los cuales pueden ser contaminados durante su proceso de fabricación con monómeros u otras sustancias tóxicas, entre las cuales se encuentra la acrilamida y de este modo surge la posibilidad de que los agentes coagulantes sintéticos puedan reaccionar con las demás sustancias químicas añadidas al agua durante su tratamiento, como tal es el caso del ozono y del cloro, generando sustancias peligrosas para la salud, pudiendo no ser removidas en el tratamiento convencional antes de llegar al usuario y consumidor. (Pérez Carrión, 1992).

Los polímeros de origen natural presentan por lo general una mínima o nula toxicidad, dado que en muchos casos se utilizan como comestibles o con el propósito de tratamiento de aguas para consumo. De acuerdo con lo anterior, las alternativas de tratamiento de aguas basadas en la utilización de coagulantes naturales en los procesos de clarificación, se hace más que necesario e imprescindible teniendo en cuenta las condiciones económicas actuales de muchos países. (Rodríguez, Lugo, & Malaver, 2011).

Los coagulantes naturales empleados en América Latina, como: la papa, cactus, maíz, trigo y yuca, son utilizados en el proceso de clarificación de agua (Campos, 2000).

El coagulante natural estudiado es el almidón, se encuentra en abundancia en el reino vegetal (Tabla 1) y constituye la mayor reserva de carbohidratos de las plantas, el cual puede ser extraído de su fuente con relativa facilidad. Entre las principales fuentes de almidón en nuestro país se tienen: maíz, yuca, papa, arroz, trigo, sagú, sorgo, araruta.

Tabla 1

Porcentaje de almidón, proteínas, fibras y ceniza de algunas fuentes de almidón.

Componente	Composición (%)			
	Maíz	Trigo	Yuca	Papa
Almidón	55,05	64,0	21,5	20,0
Proteínas	8,2	12,5	1,1	2,1
Fibras	2,4	2,5	1,1	1,1
Ceniza	1,5	1,7	0,5	0,9

Fuente: Campos, 2000

En 1975, el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) 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.

Estos estudios lograron comprobar que las mezclas de sulfato de aluminio con almidón de yuca, tienen un potencial de coagulación-

floculación y ayudan al tratamiento de las aguas superficiales. El empleo de almidón como agente coadyuvante en la remoción de color, mezclado con sulfato de aluminio (agente coagulante), permitiría reducir el costo económico, el impacto ambiental y los efectos a la salud pública. (Solís Silvan, Laines Canepa, & Hernández Barajas, 2012).

1.1.2. Problemática de la investigación

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.

El desarrollo de nuevas alternativas para el empleo de polímeros de origen natural en el proceso de coagulación-floculación ayudará 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 alimento.

Los coagulantes naturales son procedentes de materiales de origen vegetal o animal, que actúan de modo similar a los coagulantes sintéticos, aglomerando las partículas en suspensión que contiene el agua cruda, facilitando su sedimentación y reduciendo la turbidez inicial de ésta. Algunos de estos coagulantes poseen además propiedades antimicrobianas,

por lo que reducen o eliminan el contenido de microorganismos patógenos susceptibles de producir enfermedades (Ganjidoust et al., 1997).

No se cuenta con mucha información sobre la determinación de la influencia de los parámetros de operación para una adecuada clarificación y las proporciones adecuadas de almidón de yuca que reemplace al coagulante metálico (cloruro férrico) para una adecuada remoción de arsénico en el Río Uchusuma.

1.2. Formulación del problema

¿Será viable determinar los parámetros de operación para el proceso de sustitución del cloruro férrico por almidón de yuca para la clarificación y remoción de arsénico de las aguas del Río Uchusuma?

1.3. Justificación e importancia

El agua es un recurso imprescindible para los seres vivos, de su potabilización depende la vida, por ello se la debe someter a procesos físico-químicos que utilizan coagulantes y floculantes sintéticos, siendo los más utilizados el sulfato de aluminio y el cloruro férrico.

La utilización del cloruro férrico se destaca por su capacidad de trabajar en un amplio rango de pH, que va desde 4,5 hasta 12, es muy eficaz en la eliminación de sólidos suspendidos, rastros de metales y DBO. 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.

En este sentido la ejecución de nuevas investigaciones justifica la necesidad de hallar nuevas alternativas de coagulantes y floculantes que brinden buenos resultados y disminuyan impactos en el hombre y en el medio ambiente; así es como en el presente caso se plantea determinar la eficiencia de un coagulante - floculante y de un ayudante de coagulación como es el almidón de yuca en el Río Uchusuma, este presenta un pH que va desde 8 a 8,5 y una concentración de arsénico total de 0,2 mg/L.

1.4. Alcances y limitaciones

El estudio se encuentra enfocado en determinar el porcentaje máximo que puede ser sustituido el cloruro férrico por almidón de yuca de la dosis óptima, y lograr que el proceso de clarificación y remoción de arsénico cumplan con la norma establecida para Límites máximos permisibles de parámetros de calidad organoléptica. (MINSA, 2010) (Anexo 1)

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

La recolección de muestras para el proceso de clarificación se realizó en época de lluvia, y la recolección de muestras para el proceso de remoción de arsénico se realizó temporada sin precipitación fluvial, ya que debido a esta precipitación varían sus características fisicoquímicas.

Las pruebas de arsénico residual e hierro residual se realizaron mediante el test de arsénico, y para determinación la concentración de hierro total se utilizó la técnica de la o-fenantrolina o método 3500-Fe B (Anexo 3).

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Determinar los parámetros de diseño y el porcentaje de sustitución del cloruro férrico por el almidón de yuca en el proceso de clarificación y remoción de arsénico de las aguas del Río Uchusuma (Provincia, Tacna) y propuesta de diseño de un reactor batch a nivel domiciliario.

1.5.2. Objetivo específicos

- Determinar el efecto y los parámetros de diseño en el proceso de clarificación.
- Determinar el porcentaje de sustitución del cloruro férrico con almidón de yuca para la remoción de arsénico.
- Caracterizar el almidón de yuca (*Manihot esculenta* Crantz).
- Propuesta de diseño de un reactor batch para la clarificación y remoción de arsénico.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis general

- Es posible determinar los parámetros de diseño y el porcentaje de sustitución de cloruro férrico por almidón de yuca en el proceso de clarificación y remoción de arsénico de las aguas del Río Uchusuma.

1.6.2. Hipótesis específicas

- Los parámetros de diseño operación influyen en el proceso de clarificación y remoción de arsénico.
- Se establece el porcentaje de sustitución del cloruro férrico con almidón de yuca para el proceso de clarificación y remoción de arsénico.
- Se realiza la caracterización general del almidón de yuca.
- Los resultados obtenidos a escala de laboratorio son eficientes para el diseño de un reactor Batch a escala domiciliar.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio

En el Perú, el agua se ha clarificado tradicionalmente con la savia mucilaginosa de “pencas” obtenidas de ciertas especies de cactáceas (Kirchmer et al. 1975), los aldeanos añadían plantas nativas al agua para beber, con el fin de reducir la turbiedad, los olores y los sabores desagradables. Al mismo tiempo estas sustancias también han demostrado su eficacia como coadyuvantes de la coagulación en el tratamiento de aguas en pequeñas comunidades.

En Latinoamérica, actualmente se realizó investigaciones sobre el nopal mexicano (*Opuntia ficus*) en la clarificación de suspensiones coloidales y así como de diversos productos naturales en la clarificación de agua para consumo humano, (Almendárez, 2004; Martínez, 2003) utilizaron *Cactus Lefaria* (*Ceres repandus*) en la clarificación de aguas superficiales que actúa como un coagulante removiendo turbiedad y color. Almendárez (2004) comprobó la efectividad de coagulación de un polímero natural extraído de las pencas de *Opuntia cochinellifera* (planta nativa de Centroamérica) en

aguas superficiales, (Navarro et al. 2006) empleo biopolímeros naturales que tienen la capacidad de adsorber metales pesados de aguas industriales.

Almidones como agentes floculantes

El almidón es un compuesto que se localiza en raíces, tubérculos, frutas y semillas de las plantas. Es un polisacárido sintetizado por fotosíntesis a partir del dióxido de carbono que toman las plantas de la atmósfera y del agua que toman del suelo, formada por una mezcla de dos sustancias: la amilosa y la amilopectina, las que sólo difieren en su estructura (Méndez, 2010).

Los polímeros naturales tales como almidón, y celulosa han sido investigados como una alternativa atractiva en los procesos de coagulación-floculación para la remoción de partículas suspendidas y coloidales, y una de las ventajas que presentan, es que dichos polímeros naturales y sus derivados son biodegradables; asimismo, su degradación intermedia es inofensiva para el ser humano y el medio ambiente. Entre los más utilizados se encuentran los polisacáridos extraídos de los almidones de la papa, yuca y maíz (Shogren, 2009).

Solís, (2012) utilizó mezclas basadas en polímeros orgánicos a partir del almidón de plátano y yuca más sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$, para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios y aguas superficiales. (Solís, 2012) comparó mezclas con potencial coagulante compuestas por almidón

de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) y sulfato de aluminio grado comercial, que permitió reducir la cantidad sulfato de aluminio usado en plantas de tratamiento de agua potable.

Shahriari (2012), empleó mezclas de almidón con cloruro férrico (FeCl_3) para tratar agua preparada a partir de caolinita con turbiedad inicial de (50 y 100 NTU). Los resultados mostraron que la dosis óptima para la remoción de turbiedad fue de 10 mg/L de FeCl_3 más 0,2 mg/L de almidón, equivalente a una proporción 1:0,02.

Según Vandamme (2010) evaluó el potencial del almidón catiónico como un floculante para la colecta de micro algas realizando los experimentos en las pruebas de jarra. El almidón catiónico fue un eficiente floculante para agua de río, pero no para micro algas marinas. Majzoobi (2009) señala que, al modificar las propiedades del almidón, las aplicaciones como agentes floculantes pueden mejorar, ya que se lleva a cabo un cambio en su estructura molecular. La modificación de los almidones puede realizarse por métodos químicos, físicos, enzimáticos, genéticos o sus combinaciones. Entre las diferentes técnicas para la modificación de almidones, los métodos químicos son las técnicas más comúnmente utilizadas. Dicha modificación química involucra la introducción de algunos grupos funcionales entre las moléculas del almidón, resultando cambios bien marcados en las propiedades

fisicoquímicas de los almidones. El almidón entrecruzado es un ejemplo de almidón modificado.

El propósito de la presente investigación es comprobar el potencial de coagulación-floculación de la mezcla de un polímero natural basado en almidón extraído de la yuca (*Manihot Esculenta Crantz*) comparando la eficiencia de remoción de partículas suspendidas con la eficiencia alcanzada con solamente cloruro férrico grado comercial. Para evaluar la eficiencia, se utilizarán muestras de agua superficial del Río Uchusuma.

Agitación y mezclado de fluidos

Objetivos de la agitación

En las industrias químicas de procesos y en otras semejantes, muchas operaciones dependen del alto grado de agitación y del mezclado eficaz de los fluidos. Por lo general, la agitación se refiere a forzar un fluido por medios mecánicos para que adquiera un movimiento circulatorio en el interior de un recipiente. El mezclado implica partir de dos fases individuales, tales como un fluido y un sólido pulverizado o dos fluidos, y lograr que ambas fases se distribuyan al azar entre sí.

Equipo para agitación

Generalmente, los líquidos se agitan en un recipiente cilíndrico que puede estar cerrado o abierto.

La altura del líquido debe equivaler en forma aproximada al diámetro del tanque. Un motor eléctrico impulsa al propulsor agitador, que está montado en un eje. En la figura 1 se muestra un sistema de agitación típico.

1. **Agitador propulsor de tres aspas:** Existen varios tipos de agitadores de uso común. Uno de los más conocidos es el agitador de tres aspas de tipo marino, similar a la hélice de un motor fuera de borda para lanchas. El agitador puede ser móvil para introducirlo lateralmente en el tanque o estar montado en la pared de un tanque abierto, en posición desplazada del centro. Estos agitadores giran a velocidades de 400 a 1750 rpm (revoluciones por minuto) y son propios para líquidos de baja viscosidad. En la figura 1 se muestra el patrón de flujo en un tanque con deflectores y con un propulsor colocado en el centro del tanque.

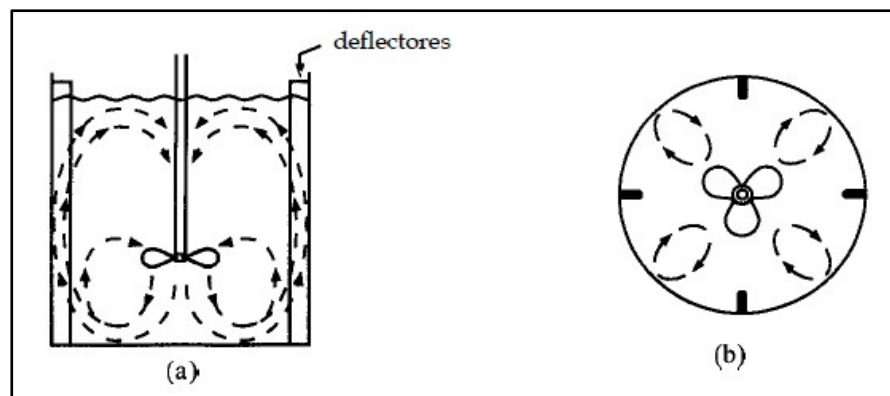


Figura 1. Tanque con deflectores y agitador de turbina de paletas planas con patrón de flujo axial, a) vista lateral, b) vista de fondo

Fuente: C. J. Geankopolis, 1998.

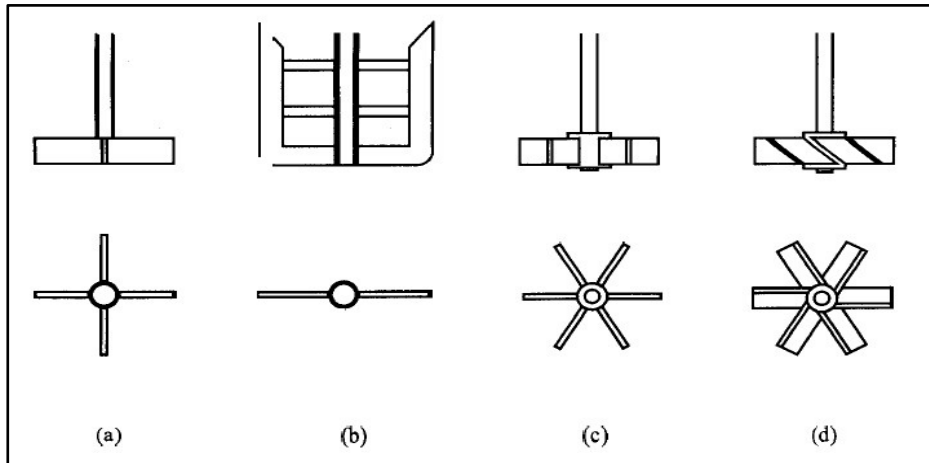


Figura 2. Varios tipos de agitadores: a) paleta de cuatro aspas, b) paleta de compuerta o ancla, c) turbina de seis aspas, d) turbina de aspas inclinadas (45°).

Fuente: C. J. Geankopolis, 1998.

2. **Agitadores de paletas:** Para velocidades de 20 a 200 rpm se emplean diversos tipos de agitadores de paletas. Tal como lo muestra en la Figura 2-a se tienen sistemas de dos a cuatro paletas planas.

La longitud total del propulsor de paletas mide del 60 al 80 % del diámetro del tanque y la anchura de la paleta es de 1/6 a 1/10 de su longitud. A bajas velocidades se consigue una agitación suave en un recipiente sin deflectores. A velocidades más altas se usan deflectores porque, sin ellos, el líquido simplemente hace remolinos. El agitador de paletas no es efectivo para sólidos en suspensión porque, aunque hay un buen flujo radial, hay poco flujo axial o vertical.

Se suele usar una paleta de ancla o compuerta, ilustrada en la Figura 2-b, la cual barre o raspa las paredes del tanque y a veces su fondo. Se emplea con líquidos viscosos que pueden generar depósitos en las paredes y para

mejorar la transferencia de calor hacia las mismas, pero no es buen mezclador. Se suele usar para procesar pastas de almidón, pinturas, adhesivos y cosméticos. (C. J. Geankopolis, 1998)

3. Agitadores de turbina. Cuando se procesan líquidos con amplia diversidad de viscosidades se usan turbinas semejantes a un agitador de paletas múltiples con aspas más cortas. El diámetro de una turbina suele medir del 30 al 50 % del diámetro del tanque. Normalmente las turbinas tienen cuatro o seis aspas. Para dispersar un gas en un líquido, el gas puede hacerse penetrar justo por debajo del propulsor de la turbina en su eje; de esa manera las paletas dispersan el gas en muchas burbujas finas. Con la turbina de hojas inclinadas que se muestra en la figura 2-d, con las aspas a 45°, se imparte cierto flujo axial, de modo que hay una combinación de flujos radial y axial. Este tipo es útil para sólidos en suspensión, ya que las corrientes fluyen hacia abajo y luego levantan los sólidos depositados. (C. J. Geankopolis, 1998)

4. Agitadores de banda helicoidal: Este tipo de agitadores se usa para soluciones sumamente viscosas y opera a pocos rpm, en la región laminar. La banda se forma en una trayectoria helicoidal y está unida a un eje central. El líquido se mueve en una trayectoria de flujo tortuosa hacia abajo en el centro y hacia arriba a los lados, con movimiento de giro,

otros tipos semejantes son el de banda helicoidal doble y el de banda helicoidal con tornillo. (C. J. Geankopolis, 1998).

En el presente trabajo, se utilizó un reactor con impulsor de turbina de hojas planas, sin manparas para el diseño del reactor a nivel domiciliario debido a su fácil diseño y su fácil acondicionamiento.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Coagulantes 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, oleratina, gelatina, etc.). (Arboleda V, 1975)

2.2.2. 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. La coagulación es el tratamiento más eficaz pero también es el que representa un gasto elevado cuando no está bien realizado. (Andía Cárdenas - SEDAPAL, 2000)

Factores que influyen en la coagulación

Es necesario tener en cuenta los siguientes factores con la finalidad de optimizar el proceso de coagulación:

- pH.
- Turbiedad.
- Sales disueltas.
- Temperatura del agua.
- Tipo de coagulante utilizado.
- Condiciones de mezcla.
- Sistemas de aplicación de los coagulantes.
- Tipos de mezcla y el color.

En general el color de un agua es debido a la descomposición de la materias orgánica que contienen los humos de los suelos; esto depende de una gran variedad de compuestos orgánicos como las sustancias húmicas que son de masa molecular variada de 800 a 50 000 g/mol.

2.2.3. 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. (Arboleda V, 1975).

Tipos de Floculación.

Hay 2 tipos de floculación:

a) Floculación Pericinética

Este tipo de floculación es producida por el movimiento natural de las moléculas del agua y está inducida por la energía térmica, este movimiento es conocido como el movimiento browniano.

b) Floculación Ortocinética

Se basa en las colisiones de las partículas debido al movimiento del agua, el que es inducido por una energía exterior a la masa de agua y que puede ser de origen mecánico o hidráulico. Después que el agua es coagulada es necesario que se produzca la aglomeración de los microflóculos; para que esto suceda se produce primero la floculación pericinética luego se produce la floculación ortocinética.

Parámetros de la Floculación

Los parámetros que se caracterizan la floculación son los siguientes:

- Floculación Ortocinética (Se da por el grado de agitación proporcionada:
 - Mecánica o Hidráulica).
 - Gradiente de Velocidad (energía necesaria para producir la mezcla).
 - Número de colisiones (choque entre microfloculos).
 - Tiempo de retención (tiempo que permanece el agua en la unidad de floculación).
 - Densidad y tamaño de floc.
 - Volumen de lodos (los floculos formados no deben sedimentar en las unidades de floculación).

2.2.4. Prueba de jarras

La prueba de jarras es un procedimiento común de laboratorio para determinar las condiciones óptimas de funcionamiento para el agua o el tratamiento de aguas residuales. Este método permite realizar ajustes en el pH, las variaciones en la dosis de coagulante o polímero, alternando velocidades de mezclado, o la prueba de coagulante o diferentes tipos de polímeros, a pequeña escala con el fin de predecir el funcionamiento de una operación a gran escala de tratamiento. Una prueba de jarras simula los procesos de coagulación y floculación que fomentan la eliminación de los coloides en

suspensión y materia orgánica que puede conducir a problemas de turbidez, olor y sabor. (Andía Cárdenas-SEDAPAL, 2000)

2.3. Definición de términos

2.3.1. Almidón de yuca

El almidón es el principal carbohidrato de reserva sintetizado por las plantas superiores constituyendo una fuente de energía esencial para muchos organismos, especialmente el hombre (Buleón et. al., 1990).

2.3.2. Amilosa

Está formada por α -D-glucopiranosas unidas por centenares o miles (normalmente de 300 a 3 000 unidades de glucosa) mediante enlaces α -(1 \rightarrow 4) en una cadena sin ramificar, o muy escasamente ramificada mediante enlaces α -(1 \rightarrow 6). Esta cadena adopta una disposición helicoidal y tiene seis monómeros por cada vuelta de hélice. (Arboleda V.; et al. (1975).).

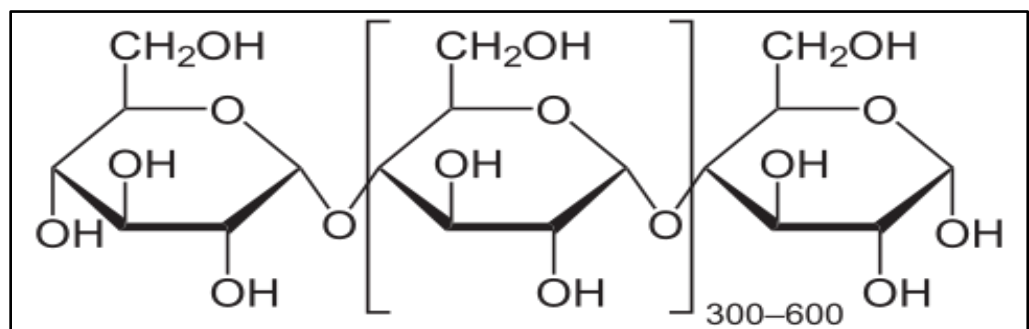


Figura 3. Estructura molecular de la amilosa

Fuente: Arboleda V.; et al. (1975).

2.3.3. Amilopectina

Representa el 70-75 % restante. También está formada por α -D-glucopiranosas, aunque en este caso conforma una cadena altamente ramificada en la que hay uniones α -(1 \rightarrow 4), como se indicó en el caso anterior, y muchos enlaces α -(1 \rightarrow 6) que originan lugares de ramificación cada doce monómeros. Su peso molecular es muy elevado, ya que cada molécula suele reunir de 2 000 a 200 000 unidades de glucosa. (Arboleda V.; et al. (1975).)

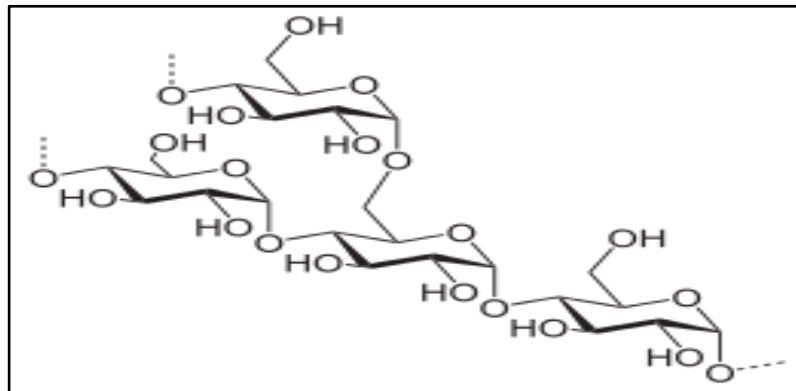


Figura 4. Estructura molecular de la amilopectina

Fuente: Arboleda V.; et al. (1975).

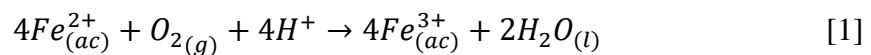
2.3.4. Arsénico

El arsénico (As) es un elemento natural distribuido extensamente en la corteza de la tierra. Su concentración en la superficie de la Tierra es de 1,5 a 2,0 mg /l, siendo principalmente inorgánico, sin embargo su distribución en el mundo no es uniforme. (Jones, 2007). En el ambiente, el arsénico se combina

con oxígeno, cloro, y azufre para formar compuestos inorgánicos de arsénico. Por el contrario, en animales y en plantas el arsénico se combina con el carbono y el hidrógeno para formar compuestos orgánicos de arsénico. A pesar de su distribución natural, el arsénico es un elemento tóxico que causa preocupación, estando clasificado como un carcinógeno humano. (Jones, 2007).

2.3.5. Hierro

El hierro existe en disolución acuosa en el estado de oxidación ya sea +2 ó +3. En presencia del aire tiende a oxidarse.



Dónde:

ac: Acuoso

g: gaseoso

l: líquido

2.3.6. Cloruro Férrico

Coagulante de alta eficiencia en dos presentaciones, líquido al 42 %, con propiedades ácidas y corrosivas. El cloruro férrico es usado en plantas de tratamiento de agua potable y aguas residuales como un excelente floculante, muy usado por su alta eficiencia en remoción de orgánicos y de metales pesados; usado

también como agente de grabado en litografías y fotografía, catalizador, mordiente, agente oxidante, desinfectante, pigmento, aditivo de piensos.

2.3.7. Prueba de Jarras

También conocido como prueba de jarras es un equipo muy útil para determinar la dosis óptima en el proceso de clarificación del agua. (Andía Cárdenas-SEDAPAL, 2000)

2.3.8. pH

El pH es una medida de acidez o alcalinidad que indica la cantidad de iones de hidrógeno presentes en una solución o sustancia.

2.3.9. Turbidez

Es un parámetro que permite medir la concentración de las partículas suspendidas en un líquido. La turbidez del agua superficial se debe a partículas de lodos de sílice de diámetros que varían entre 0,2 a 5 μm . (Andía Cárdenas-SEDAPAL, 2000)

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y diseño de la investigación

Para definir donde se ubica el tipo de investigación la clasificaremos según el tipo de diseño.

- Es prospectivo.
- Es transversal.
- Es experimental.

El presente trabajo de investigación, está basado en pruebas experimentales donde existe una relación del tipo causa- efecto. Se analizó el efecto producido por la manipulación de cuatro factores (X_1 , X_2 , X_3); sobre dos factores de respuesta (Y_1 y Y_2). Para el análisis de datos se utilizó el diseño compuesto central 2^4 más puntos centrales para la remoción de la turbidez y para la remoción de arsénico, el diseño compuesto central más puntos estrella sin réplicas para la remoción del arsénico total.

3.2. Población y muestra (según el caso)

La muestra de agua cruda fue recolectada en el punto de muestreo antes del partidador que divide el agua del Río Uchusuma destinada para consumo humano y la agricultura de Tacna siendo las coordenadas 17°58'17.4" latitud norte y 70°09'43.5" de longitud oeste del meridiano de Greenwich. El muestreo de agua al azar para la presente investigación fue de 33 litros para la remoción de arsénico, y 90 litros para la remoción de la turbidez.

La recolección de muestras para el proceso de clarificación se realizó en época de lluvia, y la recolección de muestras para el proceso de remoción de arsénico, se realizó temporada sin precipitación fluvial, ya que debido a esta precipitación varían sus características fisicoquímicas.

3.3. Operacionalización de variables

Para demostrar y comprobar la hipótesis formulada, se realizaron operaciones manipulando las variables, es así que a través de la relación causa-efecto, se evaluaron las variables dependientes. En la siguiente Tabla 2 se presenta la operacionalización de variables.

Tabla 2

Operacionalización de variables.

FACTORES	INDICADOR	UNIDAD	RANGO
Velocidad de agitación	Gradiente de velocidad	rpm	20 rpm - 50 rpm
Tiempo de floculación	Tiempo de floculación	min	10 min – 20 min
Tiempo de sedimentación	Tiempo de floculación	min	15 min – 30 min
Dosis del coagulante	Concentración de coagulante	%	20 % - 60 %
Turbidez	Partículas en suspensión	NTU	< 5 NTU
pH	Concentración de H ⁺	H ⁺	6,5 - 7,5
Concentración de hierro total	Concentración de hierro total	mg/L	< 0,3 mg/L
Concentración de arsénico total	Concentración de arsénico total	mg/L	< 0.005 mg/L

Fuente: Elaboración propia

Las variables se definen de la siguiente forma:

Factores: dosis de coagulante, velocidad de agitación, tiempo de floculación y tiempo de sedimentación. La dosis de coagulante se refiere al porcentaje en peso de la mezcla de cloruro férrico y almidón de yuca.

Variabes de respuesta: concentración de arsénico total, concentración de hierro total, turbidez y pH.

3.4. Técnicas e instrumentos para recolección de datos

3.4.1 Técnicas de recolección de datos

Los métodos de análisis químicos que se emplearon durante el desarrollo del presente trabajo se presentan a continuación:

3.4.1.1. Extracción y obtención del almidón de yuca

Anexo N° 4.

3.4.1.2. Recolección de muestras de agua cruda

Para realizar el estudio se utiliza agua del Río Uchusuma, a la cual se midió los parámetros iniciales: turbiedad, pH, arsénico total y hierro total.

La recolección de muestras de agua cruda se realizaron de acuerdo a lo establecido en el protocolo nacional de monitoreo de la calidad del agua (Anexo N° 5) (ANA, 2011).

3.4.1.3. Preparación del equipo prueba de jarras

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.

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 s.

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 o la adición casi simultánea de los compuestos en todas las jarras, facilita el cómputo del tiempo inicial de formación de floculo y evita errores al juzgar la velocidad, con que se ha realizado la reacción en cada caso o 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 cm) desde la superficie del agua a la cual se estaban extrayendo los sobrenadantes y obtener una velocidad de extracción constante en todos los ensayos.

3.4.1.4. Caracterización del almidón de yuca

a) Determinación de pH

Se preparó una suspensión pesando 10 g de almidón en un vaso de precipitado de 100 mL y adicionando 50 mL de agua, se agitó continuamente por 5 min. Se determinó el pH potenciométricamente con un multímetro THERMO SCIENTIFIC marca ORION previamente calibrado (Anexo N° 6).

b) Determinación de humedad

Se utilizó el método 952.46 A.O.A.C. (2005). (Anexo N° 7)

c) Determinación de cenizas

Se utilizó el método 942.05 A.O.A.C. (2005). (Anexo N° 8)

d) Determinación del contenido de proteínas

Se utilizó el método 984.13 A.O.A.C. (2005). (Anexo N° 9)

e) Determinación de contenido lipídico

Se utilizó el método 2003.05 A.O.A.C. (2005). (Anexo N° 10)

f) Determinación del contenido de fibra cruda

Se utilizó el método 962.09 A.O.A.C. (2005). (Anexo N° 11)

g) Determinación de amilosa y amilopectina

El contenido de amilosa se determinó mediante una modificación hecha por (Hoover y Ratnayake, 2001) al método propuesto de McGrance *et al.* (1998). La amilosa tiene una afinidad de formar complejos con el yodo, con una capacidad de 20 mg de yodo por 100 mg de amilosa, los complejos producen una coloración azul que puede ser cuantificado colorimétricamente.

Se disolvieron 20 mg de almidón (base seca) en 8 mL de dimetilsulfoxido (DMSO) al 90 %, la mezcla se agitó vigorosamente en un vórtex por 20 min y posteriormente se calentó la dispersión en un baño de maría Mermet a 85 °C por

15 min. Se enfrió la mezcla a temperatura ambiente y se aforó a 25 mL con agua destilada. Se tomó 1 mL de esta dispersión, transfiriéndose a un matraz aforado de 50 mL, al cual se le había agregado 40 mL de agua destilada y 5 mL de una solución de yoduro. Finalmente se aforó con agua, homogeneizándose, luego se dejó en reposo por 15 min antes de leer la absorbancia en el Espectrofotómetro UV visible, GENESIS 10S UV-VIS, Marca Thermo Scientific a 635 nm.

Los resultados se compararon contra una curva de calibración construida con almidón soluble (amilasa 100 %) procesado de igual manera que las muestras.

3.4.1.5. Determinación de la dosis óptima del cloruro férrico

El coagulante utilizado será el cloruro férrico FeCl_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 floculo pesado y compacto de fácil sedimentación y que no se rompe al pasar por el filtro.

Para determinar la dosis óptima de cloruro férrico, se preparó una solución madre de cloruro férrico al 1 %, esto quiere decir que en 1 l de agua destilada se disolvió 10 g de cloruro férrico.

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

- a) Distribución del agua a las seis jarras de 1 litro.
- b) Ajuste de la velocidad de las paletas a 200 rpm para efectuar la mezcla rápida.
- c) Se agregó el polímero y el almidón de yuca al mismo instante. En todos los ensayos, el tiempo total de mezcla rápida fue de 1 min.
- d) Ajuste de velocidad de las paletas a 50 rpm para efectuar la mezcla lenta 15 min.
- e) Sedimentación del floc en un tiempo de 30 min.
- f) 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 (NTU).

De esto se inició el proceso de la prueba de jarras donde a cada jarra se le aplicó diferente dosis de cloruro férrico.

3.4.1.6. Sustitución de cloruro férrico por almidón de yuca

Una vez determinada la dosis óptima de cloruro férrico, se corre otra serie de prueba de jarras, sustituyendo en intervalos del 20 % el cloruro férrico 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 cloruro férrico por almidón de yuca.

Tabla 3

Combinaciones de sustitución de cloruro férrico

Diferentes Turbiedades		
N° Prueba	Porcentaje de FeCl₃ (%)	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

3.4.2 Instrumentos, equipos, materiales y reactivos

3.4.2.1. Equipos e instrumentos

- 01 Balanza analítica
- 01 Equipo probador de Jarras, VELD SCIENTIFICA JLT6

- 01 Turbidímetro Hach 2 100Q (2 100Q Portable, rango 0-1000NTU)
- 01 Centrifuga
- 01 Espectrofotómetro UV visible, GENESIS 10S UV-VIS, Marca Thermo Scientific
- 01 Estufa, Marca MEMERT desde 10 °C por encima de la temperatura ambiente hasta 300 °C.
- 01 Multiparametro Marca Thermo Scientific
- 01 Termómetro digital, rango de medición de temperatura: -50°C to 300°C (-58°F a 572°F)
- 01 Licuadora, Marca Oster, Modelo: 250-22
- 01 Refrigeradora, Marca Lg, Modelo: GS65SPPN
- 01 malla para tamizado, Tamaño de malla 100 (Diámetro de Alambre 0.150mm), Marca ADVANTECH
- 01 malla para tamizado Tamaño de malla 200 (Diámetro de Alambre 0.0750 mm) , Marca ADVANTECH

3.4.2.2. Materiales

- 01 Pera de goma para pipetas de goteo dosificadoras (3x vías)
- 06 vasos de precipitados de 1000 mL
- 04 vasos de precipitados de 250 mL
- 04 vasos de precipitados de 100 mL

- 06 vasos de precipitados de 50 mL
- 01 probeta de 100 mL
- 02 pipetas graduadas de 10 mL
- 02 pipetas graduadas de 5 mL
- 02 fioles de 100 mL
- Tela tipo yute 1m.
- 02 baldes de 3 L
- 03 frascos de vidrio de 500 mL
- 03 Bandejas de metal
- Varillas de vidrio
- Papel filtro, tipo rápido.

3.4.2.3. Reactivos

- Cloruro férrico al 1 %
- Agua destilada
- Yuca
- Reactivos para determinar arsénico (test de Merck de comparación visual mediante varilla analítica en rango: 0,00–005 – 0,010 – 0,025 – 0,05 – 0,10 – 0,25 – 0,50 ppm (mg/L) (Anexo 3).
- 1,10 - fenantrolina.
- Solución buffer de acetato de amonio.

- Ácido acético glacial.
- Solución de hidroxilamina.
- Ácido clorhídrico concentrado

3.5. Procesamiento y análisis de datos

La estrategia que se ha seguido para el análisis de datos, es utilizar la metodología de superficie de respuesta aplicando el Diseño Compuesto Central. En la Tabla 4 se muestra el arreglo experimental planteado, para la remoción de arsénico y en la Tabla 5 se muestra el arreglo experimental reducido manteniendo constante el tiempo de floculación y el tiempo de sedimentación, para la remoción de arsénico aplicando el Diseño Compuesto Central.

Tabla 4Arreglo experimental del diseño factorial 2⁴

N°	Velocidad de agitación (rpm)	Tiempo de floculación (min)	Tiempo de sedimentación (min)	Dosis de coagulante
1	20	10	15	20
2	50	10	15	20
3	20	20	15	20
4	50	20	15	20
5	20	10	30	20
6	50	10	30	20
7	20	20	30	20
8	50	20	30	20
9	20	10	15	60
10	50	10	15	60
11	20	20	15	60
12	50	20	15	60
13	20	10	30	60
14	50	10	30	60
15	20	20	30	60
16	50	20	30	60
17	35	15	22.5	40
18	35	15	22.5	40
19	35	15	22.5	40
20	35	15	22.5	40
21	35	15	22.5	40
22	35	15	22.5	40

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5

Arreglo experimental reducido del diseño compuesto central 2^2 más puntos estrella

N°	Velocidad de agitación (rpm)	Dosis de coagulante (mg/L)
1	20	20
2	50	20
3	20	60
4	50	60
5	14	40
6	56	40
7	35	12
8	35	68
9	35	40
10	35	40
11	35	40

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6

VARIABLES CODIFICADAS Y NO CODIFICADAS UTILIZANDO LA ESTRUCTURA DEL DISEÑO COMPUESTO CENTRAL MÁS PUNTOS CENTRALES, PARA LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO.

Nº	Variable de nivel codificado		Variable de nivel real		Respuesta	
	Velocidad de Agitación	Dosis de Coagulante	Velocidad de Agitación	Dosis de Coagulante	Arsénico	Hierro
	X ₁	X ₂	X ₁	X ₂	y ₁	y ₂
1	-1	-1	20	20		
2	1	-1	50	20		
3	-1	-1	20	60		
4	1	-1	50	60		
5	-α	1	14	40		
6	α	1	56	40		
7	0	-α	35	12		
8	0	α	35	68		
9	0	0	35	40		
10	0	0	35	40		
11	0	0	35	40		

Fuente: Elaboración propia

Para la remoción de la turbidez se utilizó un Diseño Compuesto Central más puntos estrella como herramienta para el análisis de datos, donde:

A: Velocidad de Agitación, rpm

B: Dosis del coagulante, %

La especificación del modelo es el siguiente:

$$y_1 = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_1x_2 + \beta_4x_1^2 + \beta_5x_2^2 + \varepsilon \quad [2]$$

Tabla 7

Niveles de los factores principales para la remoción de turbidez.

Niveles	Factores Principales			
	Velocidad de Agitación (rpm)	Tiempo de Flocculación (min)	Tiempo de Sedimentación (min)	Dosis de Coagulante (mg/L)
Alto	50	20	30	60
Medio	35	15	22,5	40
Bajo	20	10	15	20

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8

Variables codificadas y no codificadas utilizando la estructura del diseño compuesto central más puntos centrales para la remoción de la turbiedad para turbiedades de 150 NTU.

N°	Variable de nivel codificado				Variable de nivel real				Respuesta	
	Velocidad de Agitación	Tiempo de Floculación	Tiempo de Sedimentación	Dosis de Coagulante	Velocidad de Agitación	Tiempo de Floculación	Tiempo de Sedimentación	Dosis de Coagulante	Turbidez (NTU)	pH
	(rpm)	(min)	(min)		(rpm)	(min)	(min)		y_1	y_2
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_1	x_2	x_3	x_4		
1	-1	-1	-1	-1	20	10	15	20		
2	1	-1	-1	-1	50	10	15	20		
3	-1	1	-1	-1	20	20	15	20		
4	1	1	-1	-1	50	20	15	20		
5	-1	-1	1	-1	20	10	30	20		
6	1	-1	1	-1	50	10	30	20		
7	-1	1	1	1	20	20	30	20		
8	1	1	1	1	50	20	30	20		
9	-1	-1	-1	1	20	10	15	60		
10	1	-1	-1	1	50	10	15	60		
11	-1	1	-1	1	20	20	15	60		
12	1	1	-1	1	50	20	15	60		
13	-1	-1	1	-1	20	10	30	60		
14	1	-1	1	-1	50	10	30	60		
15	-1	1	1	-1	20	20	30	60		
16	1	1	1	-1	50	20	30	60		
17	$-\alpha$	-1	-1	-1	5	15	22,5	40		
18	α	-1	-1	-1	65	15	22,5	40		
19	-1	α	-1	1	35	5	22,5	40		
20	1	α	-1	1	35	25	22,5	40		
21	-1	-1	α	1	35	15	7,5	40		
22	1	-1	α	1	35	15	37,5	40		
23	-1	1	1	α	35	15	22,5	0		
24	1	1	1	α	35	15	22,5	80		
25	0	0	0	0	35	15	22,5	40		
26	0	0	0	0	35	15	22,5	40		
27	0	0	0	0	35	15	22,5	40		
28	0	0	0	0	35	15	22,5	40		
29	0	0	0	0	35	15	22,5	40		
30	0	0	0	0	35	15	22,5	40		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9

Variables codificadas y no codificadas utilizando la estructura del diseño compuesto central más puntos centrales para la remoción de la turbiedad para turbiedades de 300 NTU.

N°	Variable de nivel codificado				Variable de nivel real				Respuesta	
	Velocidad de Agitación	Tiempo de Floculación	Tiempo de Sedimentación	Dosis de Coagulante	Velocidad de Agitación	Tiempo de Floculación	Tiempo de Sedimentación	Dosis de Coagulante	Turbidez (NTU)	pH
	(rpm)	(min)	(min)		(rpm)	(min)	(min)		(Y ₁)	(Y ₂)
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄		
1	-1	-1	-1	-1	20	10	15	20		
2	1	-1	-1	-1	50	10	15	20		
3	-1	1	-1	-1	20	20	15	20		
4	1	1	-1	-1	50	20	15	20		
5	-1	-1	1	-1	20	10	30	20		
6	1	-1	1	-1	50	10	30	20		
7	-1	1	1	1	20	20	30	20		
8	1	1	1	1	50	20	30	20		
9	-1	-1	-1	1	20	10	15	60		
10	1	-1	-1	1	50	10	15	60		
11	-1	1	-1	1	20	20	15	60		
12	1	1	-1	1	50	20	15	60		
13	-1	-1	1	-1	20	10	30	60		
14	1	-1	1	-1	50	10	30	60		
15	-1	1	1	-1	20	20	30	60		
16	1	1	1	-1	50	20	30	60		
17	-α	-1	-1	-1	5	15	22,5	40		
18	α	-1	-1	-1	65	15	22,5	40		
19	-1	α	-1	1	35	5	22,5	40		
20	1	α	-1	1	35	25	22,5	40		
21	-1	-1	α	1	35	15	7,5	40		
22	1	-1	α	1	35	15	37,5	40		
23	-1	1	1	α	35	15	22,5	0		
24	1	1	1	α	35	15	22,5	80		
25	0	0	0	0	35	15	22,5	40		
26	0	0	0	0	35	15	22,5	40		
27	0	0	0	0	35	15	22,5	40		
28	0	0	0	0	35	15	22,5	40		
29	0	0	0	0	35	15	22,5	40		
30	0	0	0	0	35	15	22,5	40		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10

Variables codificadas y no codificadas utilizando la estructura del diseño compuesto central más puntos centrales para la remoción de la turbiedad para turbiedades de 400 NTU.

N°	Variable de nivel codificado				Variable de nivel real				Respuesta	
	Velocidad de Agitación (rpm)	Tiempo de Floculación (min)	Tiempo de Sedimentación (min)	Dosis de Coagulante	Velocidad de Agitación (rpm)	Tiempo de Floculación (min)	Tiempo de Sedimentación (min)	Dosis de Coagulante	Turbidez (NTU)	pH
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Y ₁	Y ₂
1	-1	-1	-1	-1	20	10	15	20		
2	1	-1	-1	-1	50	10	15	20		
3	-1	1	-1	-1	20	20	15	20		
4	1	1	-1	-1	50	20	15	20		
5	-1	-1	1	-1	20	10	30	20		
6	1	-1	1	-1	50	10	30	20		
7	-1	1	1	1	20	20	30	20		
8	1	1	1	1	50	20	30	20		
9	-1	-1	-1	1	20	10	15	60		
10	1	-1	-1	1	50	10	15	60		
11	-1	1	-1	1	20	20	15	60		
12	1	1	-1	1	50	20	15	60		
13	-1	-1	1	-1	20	10	30	60		
14	1	-1	1	-1	50	10	30	60		
15	-1	1	1	-1	20	20	30	60		
16	1	1	1	-1	50	20	30	60		
17	-α	-1	-1	-1	5	15	22,5	40		
18	α	-1	-1	-1	65	15	22,5	40		
19	-1	α	-1	1	35	5	22,5	40		
20	1	α	-1	1	35	25	22,5	40		
21	-1	-1	α	1	35	15	7,5	40		
22	1	-1	α	1	35	15	37,5	40		
23	-1	1	1	α	35	15	22,5	0		
24	1	1	1	α	35	15	22,5	80		
25	0	0	0	0	35	15	22,5	40		
26	0	0	0	0	35	15	22,5	40		
27	0	0	0	0	35	15	22,5	40		
28	0	0	0	0	35	15	22,5	40		
29	0	0	0	0	35	15	22,5	40		
30	0	0	0	0	35	15	22,5	40		

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.Resultados

4.1.1.Resultados de la determinación de la dosis óptima

Se determinó que la dosis óptima para el proceso experimental es de 60 mg/L, ya que al hacer el análisis de los datos se denotó que es la que tiene menor turbiedad.

Tabla 11

Determinación de dosis óptima

			Turbidez inicial 90	Turbidez inicial 130	Turbidez inicial 250
N° Pruebas	Dosis (mg/L)	Dosis (mL)	Turbiedad 1 (NTU)	Turbiedad 2 (NTU)	Turbiedad 3 (NTU)
1	10	1	5,11	4,87	4,21
2	20	2	4,05	4,01	3,75
3	30	3	3,75	3,85	2,65
4	40	4	3,04	3,12	3,18
5	50	5	2,21	2,18	1,98
6	60	6	0,85	1,28	1,16

Fuente: Elaboración propia

4.1.2. Resultados de diseño compuesto central para la remoción de arsénico total y hierro total.

El screening se realizó siguiendo el diseño factorial 2^4 , el cual permitió evaluar los cuatro factores (velocidad de agitación, tiempo de floculación, tiempo de sedimentación y dosis del coagulante) teniendo como variable respuesta (arsénico y hierro total).

En la Tabla 12, se observa los resultados obtenidos utilizando el programa Staticgraphics Centurion XV versión demo, se optó por el diseño compuesto central 2^2 más puntos estrellas, para la remoción de arsénico total y hierro total.

Tabla 12Matriz diseño factorial 2⁴, respuesta de arsénico, hierro total.

N°	Velocidad de Agitación (rpm)	Tiempo de floculación (min)	Tiempo de sedimentación (min)	Dosis de FeCl ₃	As (mg/L)	Fe (mg/L)
1	20	10	15	20	0,1	0,77
2	50	10	15	20	0,005	0,54
3	20	20	15	20	0,05	0,37
4	50	20	15	20	0	0,31
5	20	10	30	20	0,05	0,92
6	50	10	30	20	0	0,42
7	20	20	30	20	0	0,86
8	50	20	30	20	0,005	0,3
9	20	10	15	60	0,01	1,08
10	50	10	15	60	0	0,5
11	20	20	15	60	0	0,69
12	50	20	15	60	0	0,29
13	20	10	30	60	0,005	0,81
14	50	10	30	60	0	0,29
15	20	20	30	60	0	0,19
16	50	20	30	60	0,001	0,15
17	35	15	22,5	40	0,005	0,24
18	35	15	22,5	40	0,005	0,23
19	35	15	22,5	40	0,005	0,25
20	35	15	22,5	40	0,005	0,24
21	35	15	22,5	40	0,01	0,23
22	35	15	22,5	40	0,005	0,24

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13

Análisis de varianza para la remoción de arsénico

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados libertad	Suma de Cuadrado Medio	Estadístico F
Regresión	0,014741967	14	0,0011	
residuos/errores	$2,0833 \times 10^{-05}$	15	$1,39 \times 10^{-06}$	758,1595
	0,0147628	29		

Fuente: Elaboración propia

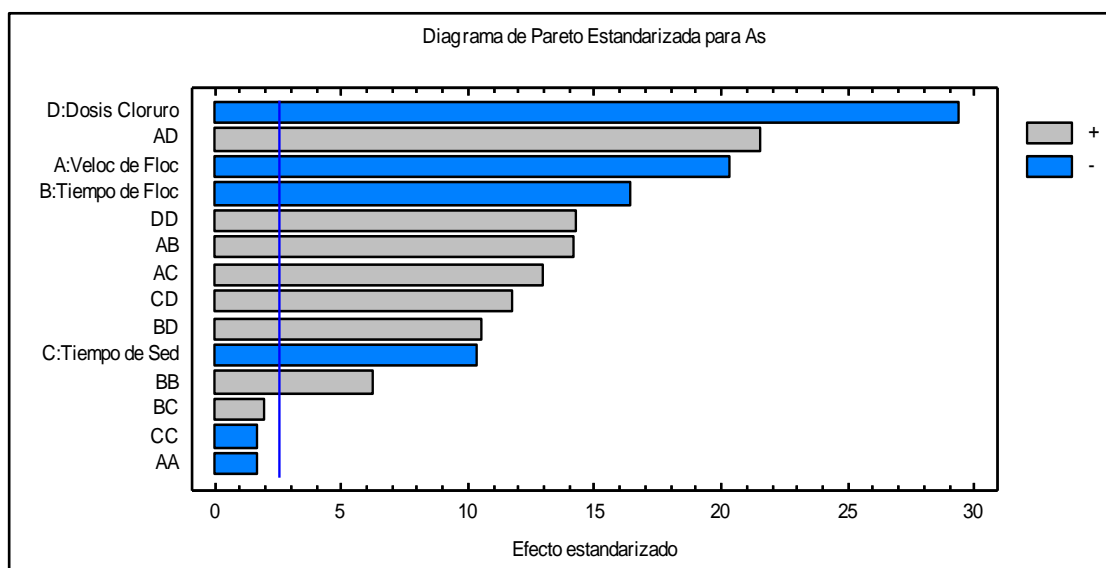


Figura 5. Diagrama de pareto para la remoción de arsénico

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14

Análisis respecto a la regresión para la remoción de arsénico.

Parámetro	Coefficiente	Error estándar	F	P	Significancia
A: Veloc de Floc.	0,3442040	0,00083333	416,16	0	SI
B: Tiempo de Floc	-0,0046009	0,00083333	268,96	0	SI
C: Tiempo de Sed	-0,0104500	0,00083333	108,16	0,0001	SI
D: Dosis Cloruro	-0,0041056	0,00083333	864,36	0	SI
AA	-0,0047188	0,00077951	2,93	0,1479	NO
AB	-0,0000030	0,00102062	201,84	0	SI
AC	0,0000967	0,00102062	168,54	0	SI
AD	0,0000589	0,00102062	464,64	0	SI
BB	0,0000367	0,00077951	39,78	0,0015	SI
BC	0,0000983	0,00102062	3,84	0,1073	NO
BD	0,0000267	0,00102062	110,94	0,0001	SI
CC	0,0000538	0,00077951	2,93	0,1479	NO
CD	-0,0000119	0,00102062	138,24	0,0001	SI
DD	0,0000400	0,00077951	205,21	0	SI

Fuente: Elaboración propia

El análisis de varianza, permitió evaluar la significancia de los efectos determinantes sobre la remoción de arsénico total, bajo parámetros controlados de la remoción, por lo cual se determinó que el tiempo de floculación o el tiempo de sedimentación si aumentaba o disminuía no habrá variación en la remoción de arsénico, tal como se muestra en el Diagrama de Pareto. Por lo cual se optó por mantener constante el tiempo de floculación a 20 min y el tiempo de sedimentación a 30 min.

El valor encontrando R^2 0,847787, es decir que el 84,7787 % de la variación de la remoción de arsénico está explicada por las variables independientes y R^2 ajustado 0,705722.

En la tabla 15, se muestra la reducción de los factores y sus respuestas para el diseño compuesto central 2^2 más puntos centrales, manteniendo constante el tiempo de floculación y tiempo de sedimentación.

Tabla 15

Matriz de diseño experimental, respuesta de arsénico, hierro total.

Nº	Variable de nivel codificado		Variable de nivel real		Respuesta	
	Velocidad de Agitación	Dosis de Coagulante	Velocidad de Agitación	Dosis de Coagulante	Arsénico	Hierro
	X_1	X_2	X_1	X_2	y_1	y_2
1	-1	-1	20	20	0,005	0,35
2	1	-1	50	20	0,005	0,29
3	-1	-1	20	60	0,005	0,22
4	1	-1	50	60	0,001	0,2
5	$-\alpha$	1	14	40	0,01	0,40
6	α	1	56	40	0,005	0,3
7	0	$-\alpha$	35	12	0,01	0,3
8	0	α	35	68	0,005	0,2
9	0	0	35	40	0,005	0,24
10	0	0	35	40	0,005	0,2
11	0	0	35	40	0,01	0,24

Fuente: Elaboración propia

4.1.2.1. Análisis estadístico para la remoción de arsénico

De los resultados obtenidos de la remoción de arsénico que se muestran en la Tabla 15, se observa que las concentraciones de arsénico total están por debajo de norma (Anexo 2) por lo tanto, no es necesario realizar un análisis estadístico, ya que en todas las condiciones de ensayo se logra remociones de arsénico total bajo los valores de la norma nacional.

4.1.2.2. Análisis estadístico para la remoción de hierro

En la Tabla 16, se muestra el arreglo del diseño compuesto central, con las variables independientes (codificadas y sin codificar) y los resultados obtenidos de hierro total en el agua tratada.

Se muestra que el estadístico F es igual a 40,64, implica la existencia de dependencia conjunta en el modelo al 5 % de significancia, lo que implica que el modelo es significativo.

En la tabla 17 se observa el valor encontrando R^2 0,8928, es decir que el 89,28 % de la variación de la remoción de hierro está explicada por las variables independientes (velocidad de agitación y dosis del coagulante) y R^2 ajustado 0,78567.

Tabla 16

Análisis de varianza para la remoción de Hierro

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Gl	Suma de Cuadrado Medio	Estadístico F
regresión	0,04335153	5	0,008670306	40,6419324
residuos/errores	0,00106667	5	0,000213334	
	0,0444182	10		

Fuente: Elaboración propia

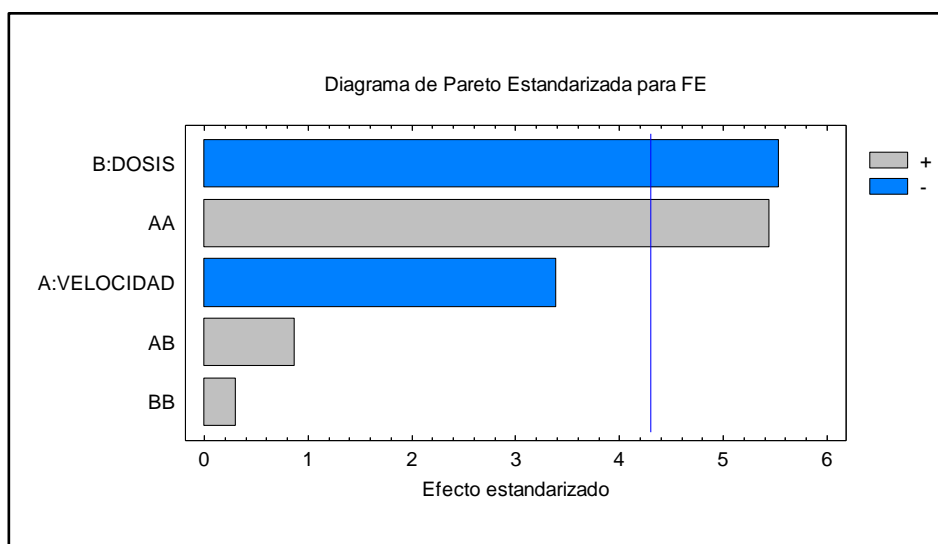


Figura 6. Diagrama de pareto para la remoción de hierro

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 17 se resalta que la dosis del coagulante y la interacción cuadrática de la velocidad de agitación son significativas.

Tabla 17

Análisis respecto a la regresión para la remoción de hierro.

Parámetro	Coefficiente	Error típico	Razón-F	Probabilidad	Significancia
A:Velocidad de Agitación	-0,019642	0,0163299	11,49	0,0311	SI
B:Dosis de Coagulante	-0,004009	0,0163299	30,62	0,0321	SI
AA	0,000235	0,0194365	29,65	0,4778	NO
AB	0,000033	0,023094	0,75	0,7924	NO
BB	0,000007	0,0194365	0,09	0,3165	NO

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18

Resumen de ajuste estadístico

Estadística de regresión	
Coefficiente de la determinación (R^2)	0,8928
R^2 ajustado	0,78567
Observaciones	15

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2.3.Desarrollo de la ecuación del modelo de regresión

El diseño compuesto central 2^2 más puntos estrellas, se ha utilizado para desarrollar una correlación entre dos variables y la remoción de hierro total. El rango experimental y los niveles de variables independientes se han representado en la Tabla 18, con el diseño compuesto central se

obtiene modelo cuadrático. El diseño de este experimento se muestra en la Tabla 18 junto con los resultados experimentales. El modelo empírico final en términos de factores codificados y el factor real para la remoción de hierro (Y_1) se muestra en la ecuación (3).

$$Y_1 = 0,728039 - 0,0196415A - 0,00400889B + 0,000235185A^2 + 0,0000333333AB + 0,0000072917B^2 \quad [3]$$

Dónde:

A: Velocidad de Agitación

B: Dosis del Coagulante

4.1.2.4. Efecto combinado de las condiciones de operación sobre la remoción de hierro

La Figura 7 muestra la superficie de respuesta tridimensional que se han construido para mostrar las dos variables (velocidad de agitación y dosis de coagulante) en la remoción de hierro. Se observa que a mayor velocidad y mayor dosis de coagulante, disminuye la concentración de hierro, obteniéndose los mejores resultados en la remoción de arsénico y hierro, tal como se muestra en la Tabla 13, es de 0,001 mg/l (1 μ g/l) de arsénico total y 0,2 mg/l (2000 μ g/l) de hierro total.

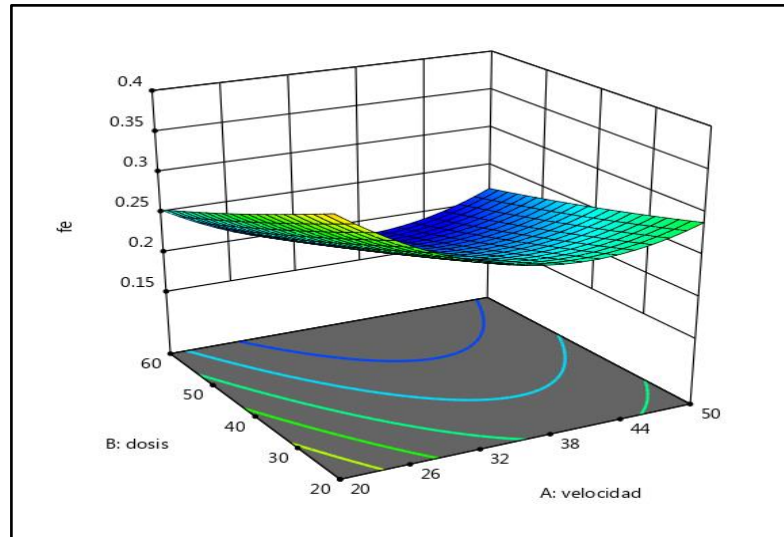


Figura 7. Superficie de respuesta para la variable de dependiente hierro total vs las variables independientes velocidad de agitación y dosis de coagulante.

Fuente: Elaboración propia

4.1.2.5. Determinación de las mejores condiciones de operación de velocidad de agitación y dosis del coagulante en la remoción de hierro

A partir de la ecuación de la regresión múltiple y aplicando el teorema o criterio de la segunda derivada (matriz Hessiana).

De las primeras derivadas parciales e igualando a 0 la ecuación (2) para hallar los puntos críticos:

Puntos críticos: (120,2659; 589,0460).

Calculando los Hessiano (criterio de la segunda derivada) para estudiar si los puntos obtenidos son máximos, mínimos o puntos de silla.

Del criterio de la segunda derivada

Si $H_1(f) > 0$, $H_2(f) > 0$ y $H_3(f) > 0$, entonces f posee un mínimo local.

Si $H_1(f) < 0$, $H_2(f) > 0$ y $H_3(f) < 0$, entonces f posee un máximo local.

Si $H_2(f) < 0$, entonces f posee un punto de silla.

De las Hessianas $H f(x_1, x_2)$:

$$H_1(f) = 5,53 \times 10^{-08} > 0$$

$$H_2(f) = -1,11 \times 10^{-09} < 0$$

Donde $y_1 = f$.

Al evaluar $f(x_1, x_2)$ alrededor de los puntos críticos (120,2659; 589,0460), con el criterio de la segunda derivada o Hessianas, no satisface el orden de los signos en la sucesión de los determinantes para que haya un extremo local (máximo y mínimo), el hecho es que el punto crítico es un punto de silla multidimensional (Anexo 12).

Por lo tanto, podríamos decir que, a 50 rpm de velocidad de agitación, 60 % de dosis de coagulante (60 mg/L de cloruro férrico y 40 mg/L de almidón de yuca) manteniendo constante el tiempo de floculación de 20 min y tiempo de sedimentación de 30 min, se obtiene una mejor remoción de arsénico y hierro total.

4.1.2.6. Resultados de la matriz de superficie de respuesta diseño compuesto central más puntos estrellas para la remoción de la turbidez.

Tabla 19

Matriz de diseño experimental y respuesta del proceso de clarificación con turbidez de 150 NTU

N°	Variable de nivel codificado				Variable de nivel real				Respuesta	
	Velocidad de Agitación (rpm)	Tiempo de Floculación (min)	Tiempo de Sedimentación (min)	Dosis de Coagulante	Velocidad de Agitación (rpm)	Tiempo de Floculación (min)	Tiempo de Sedimentación (min)	Dosis de Coagulante	Turbidez (NTU)	pH
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2
1	-1	-1	-1	-1	20	10	15	20	7,75	7,52
2	1	-1	-1	-1	50	10	15	20	3,97	7,51
3	-1	1	-1	-1	20	20	15	20	4,58	7,39
4	1	1	-1	-1	50	20	15	20	2,98	7,63
5	-1	-1	1	-1	20	10	30	20	6,54	7,41
6	1	-1	1	-1	50	10	30	20	2,41	7,48
7	-1	1	1	1	20	20	30	20	1,68	7,31
8	1	1	1	1	50	20	30	20	2,33	7,45
9	-1	-1	-1	1	20	10	15	60	1,98	6,6
10	1	-1	-1	1	50	10	15	60	1,21	6,6
11	-1	1	-1	1	20	20	15	60	1,05	6,61
12	1	1	-1	1	50	20	15	60	1,13	6,63
13	-1	-1	1	-1	20	10	30	60	1,05	6,6
14	1	-1	1	-1	50	10	30	60	0,99	6,56
15	-1	1	1	-1	20	20	30	60	0,91	6,54
16	1	1	1	-1	50	20	30	60	0,93	6,59
17	$-\alpha$	-1	-1	-1	5	15	22,5	40	2,05	6,8
18	α	-1	-1	-1	65	15	22,5	40	0,88	6,75
19	-1	α	-1	1	35	5	22,5	40	2,31	6,8
20	1	α	-1	1	35	25	22,5	40	1,16	6,68
21	-1	-1	α	1	35	15	7,5	40	0,97	6,91
22	1	-1	α	1	35	15	37,5	40	0,85	6,82
23	-1	1	1	α	35	15	22,5	0	10,47	8,48
24	1	1	1	α	35	15	22,5	80	1,12	6,45
25	0	0	0	0	35	15	22,5	40	0,96	6,86
26	0	0	0	0	35	15	22,5	40	0,95	6,84
27	0	0	0	0	35	15	22,5	40	1,81	6,79
28	0	0	0	0	35	15	22,5	40	1,8	6,83
29	0	0	0	0	35	15	22,5	40	1,82	6,92
30	0	0	0	0	35	15	22,5	40	0,96	6,82

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20

Matriz de diseño experimental y respuesta del proceso de clarificación con turbidez de 300 NTU

N°	Variable de nivel codificado				Variable de nivel real				Respuesta	
	Velocidad de Agitación (rpm)	Tiempo de Floculación (min)	Tiempo de Sedimentación (min)	Dosis de Coagulante	Velocidad de Agitación (rpm)	Tiempo de Floculación (min)	Tiempo de Sedimentación (min)	Dosis de Coagulante	Turbidez (NTU)	pH
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Y ₁	Y ₂
1	-1	-1	-1	-1	20	10	15	20	6,85	7,42
2	1	-1	-1	-1	50	10	15	20	5,23	7,4
3	-1	1	-1	-1	20	20	15	20	4,32	7,34
4	1	1	-1	-1	50	20	15	20	3,81	7,54
5	-1	-1	1	-1	20	10	30	20	5,83	7,3
6	1	-1	1	-1	50	10	30	20	3,53	7,23
7	-1	1	1	1	20	20	30	20	2,52	7,31
8	1	1	1	1	50	20	30	20	1,13	7,54
9	-1	-1	-1	1	20	10	15	60	2,63	6,74
10	1	-1	-1	1	50	10	15	60	1,35	6,66
11	-1	1	-1	1	20	20	15	60	1,98	6,59
12	1	1	-1	1	50	20	15	60	1,76	6,61
13	-1	-1	1	-1	20	10	30	60	1,04	6,5
14	1	-1	1	-1	50	10	30	60	1,12	6,59
15	-1	1	1	-1	20	20	30	60	1,51	6,48
16	1	1	1	-1	50	20	30	60	1,05	6,55
17	-α	-1	-1	-1	5	15	22,5	40	2,54	6,81
18	α	-1	-1	-1	65	15	22,5	40	1,85	6,68
19	-1	α	-1	1	35	5	22,5	40	2,34	6,8
20	1	α	-1	1	35	25	22,5	40	2,04	6,5
21	-1	-1	α	1	35	15	7,5	40	1,62	6,89
22	1	-1	α	1	35	15	37,5	40	1,13	6,79
23	-1	1	1	α	35	15	22,5	0	9,22	8,09
24	1	1	1	α	35	15	22,5	80	2,83	6,51
25	0	0	0	0	35	15	22,5	40	1,77	6,94
26	0	0	0	0	35	15	22,5	40	0,94	6,94
27	0	0	0	0	35	15	22,5	40	1,71	6,71
28	0	0	0	0	35	15	22,5	40	1,78	6,76
29	0	0	0	0	35	15	22,5	40	1,89	6,8
30	0	0	0	0	35	15	22,5	40	1,75	6,92

Fuente: Elaboración propia

Tabla 21

Matriz de diseño experimental y respuesta del proceso de clarificación con turbidez de 400 NTU

N°	Variable de nivel codificado				Variable de nivel real				Respuesta	
	Velocidad de Agitación (rpm)	Tiempo de Floculación (min)	Tiempo de Sedimentación (min)	Dosis de Coagulante	Velocidad de Agitación (rpm)	Tiempo de Floculación (min)	Tiempo de Sedimentación (min)	Dosis de Coagulante	Turbidez (NTU)	pH
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2
1	-1	-1	-1	-1	20	10	15	20	9,67	7,53
2	1	-1	-1	-1	50	10	15	20	6,43	7,38
3	-1	1	-1	-1	20	20	15	20	6,46	7,31
4	1	1	-1	-1	50	20	15	20	4,67	7,45
5	-1	-1	1	-1	20	10	30	20	6,97	7,31
6	1	-1	1	-1	50	10	30	20	4,35	7,27
7	-1	1	1	1	20	20	30	20	3,78	7,13
8	1	1	1	1	50	20	30	20	2,65	7,45
9	-1	-1	-1	1	20	10	15	60	2,56	6,82
10	1	-1	-1	1	50	10	15	60	2,11	6,77
11	-1	1	-1	1	20	20	15	60	2,92	6,71
12	1	1	-1	1	50	20	15	60	2,01	6,52
13	-1	-1	1	-1	20	10	30	60	2,23	6,5
14	1	-1	1	-1	50	10	30	60	2,37	6,6
15	-1	1	1	-1	20	20	30	60	2,06	6,51
16	1	1	1	-1	50	20	30	60	3,24	6,61
17	α	-1	-1	-1	5	15	22,5	40	3,27	6,97
18	α	-1	-1	-1	65	15	22,5	40	2,32	6,78
19	-1	α	-1	1	35	5	22,5	40	3,78	6,79
20	1	α	-1	1	35	25	22,5	40	2,87	6,51
21	-1	-1	α	1	35	15	7,5	40	2,74	6,91
22	1	-1	α	1	35	15	37,5	40	2,05	6,8
23	-1	1	1	α	35	15	22,5	0	10,67	7,89
24	1	1	1	α	35	15	22,5	80	3,21	6,54
25	0	0	0	0	35	15	22,5	40	1,95	6,89
26	0	0	0	0	35	15	22,5	40	1,87	6,91
27	0	0	0	0	35	15	22,5	40	1,41	6,69
28	0	0	0	0	35	15	22,5	40	1,32	6,73
29	0	0	0	0	35	15	22,5	40	1,39	6,76
30	0	0	0	0	35	15	22,5	40	1,85	6,85

Fuente: Elaboración propia

4.1.2.7. Análisis estadístico de los resultados obtenidos turbidez de 150 NTU

En la Tabla 22 se muestra el análisis de varianza donde se visualiza los efectos de factores experimentales en el proceso de clarificación teniendo una turbidez inicial de 150 NTU; los resultados se han evaluado a

partir del modelo de regresión múltiple donde A, B, C y D son relevantes al 5 % de significancia.

Adicionalmente se observa, el Estadístico F es 145,39, lo que implica que el modelo es significativo.

Tabla 22

Análisis de varianza para el proceso de clarificación, turbidez de 150NTU

Fuente de variación	Suma de cuadrados (SC)	Grados de Libertad (gl)	Suma de cuadrados medios (SCM)	Estadístico F
Debido a la regresión	148,25747	14	10,58981929	145,393984
Debido a los residuales de error	1,09253	15	0,072835333	
Total	149,35	29		

Fuente: Elaboración propia

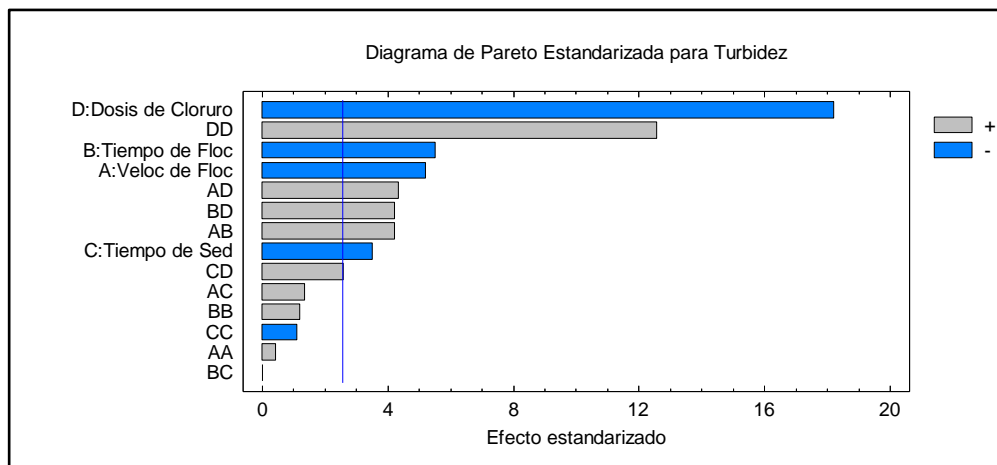


Figura 8. Diagrama de pareto para la remoción de la turbidez

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 23 se muestra, que los cuatro parámetros analizados, son significativos.

Tabla 23

Análisis respecto a la regresión para el proceso de clarificación, turbidez inicial de 150 NTU

Parámetro	Coefficiente	Error típico	Razón-F	Probabilidad	Significancia
A: Veloc. de Floc.	-0,24380	0,17669	27,14	0,0034	SI
B: Tiempo de Floc.	-0,66246	0,17669	30,32	0,0027	SI
C: Tiempo de Sed.	-0,09647	0,17669	12,36	0,017	SI
D: Dosis de Cloruro	-0,48987	0,17669	331,43	0	SI
AA	0,00018	0,21641	0,2	0,6736	NO
AB	0,00658	0,21641	17,81	0,0083	SI
AC	0,00142	0,21641	1,86	0,2308	NO
AD	0,00169	0,21641	18,91	0,0074	SI
BB	0,00430	0,21641	1,45	0,2827	NO
BC	0,00005	0,21641	0	0,9878	NO
BD	0,00493	0,16528	17,81	0,0083	SI
CC	-0,00176	0,16528	1,23	0,3185	NO
CD	0,00201	0,16528	6,67	0,0492	SI
DD	0,00281	0,16528		0,0001	SI

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 24 se observa, el valor encontrando R^2 0,9247, es decir que el 92,4743 % de la variación del proceso de clarificación teniendo una turbidez inicial de 150 NTU, está explicada por las variables independientes (velocidad de agitación, tiempo de floculación, tiempo de sedimentación y dosis de coagulante) y R^2 ajustado 0,854504.

Tabla 24

Resumen de ajuste estadístico

Estadística de regresión	
Coefficiente de la determinación (R^2)	0,924743
R^2 ajustado	0,854504
Observaciones	30

Fuente: Elaboración propia

4.1.2.7.1. Desarrollo de la ecuación del modelo de regresión

El Diseño Compuesto Central se ha utilizado para desarrollar una correlación entre cuatro variables y el proceso de clarificación. El rango experimental y los niveles de variables independientes se han representado en la Tabla 24. Con el Diseño Compuesto Central se obtiene un modelo cuadrático.

El diseño de este experimento se muestra en la Tabla 24 junto con los resultados experimentales. El modelo empírico final en términos de factores codificados y el factor real para el proceso de clarificación (Y_2) se muestra en la ecuación [4].

$$\begin{aligned}
Y_2 = & 25,1092 - 0,243801A - 0,662458B - 0,0964722C - \\
& 0,489865D + 0,000177315A^2 + 0,006575AB + 0,00141667AC + \\
& 0,00169375AD + 0,00429583B^2 + 0,00005BC + 0,00493125BD - \\
& 0,00175741C^2 + 0,0020125CD + 0,00280599D^2 \quad [4]
\end{aligned}$$

Donde:

A= Velocidad de Agitación (rpm)

B= Tiempo de Floculación (min)

C= Tiempo de Sedimentación (min)

D= Dosis de coagulante (Cloruro Férrico/Almidón de Yuca)

4.1.2.7.2. Efecto combinado de las condiciones de operación sobre el proceso de clarificación.

Para ver los efectos de los cuatro factores sobre el proceso de clarificación, se ha utilizado la metodología de la superficie de respuesta y se han trazado gráficos tridimensionales.

La Figura 9 muestra la superficie de respuesta tridimensional que se han construido para mostrar las dos variables (tiempo de sedimentación y dosis de coagulante) en el proceso de clarificación, en la Tabla 18 se observa que el pH se encuentra entre el rango de 6,5 - 8,5; por lo cual en todas las condiciones experimentales se cumple con

el pH referido por norma, no siendo necesario el análisis estadístico para el rango de exploración.

La turbidez en los rangos establecidos anteriormente se reduce hasta 0,88 NTU, se observa también que a medida que aumenta el tiempo de sedimentación y la dosis de coagulante aumenta la remoción de la turbidez.

La gráfica de superficie muestra la típica “silla de montar”, que no ofrece máximo y mínimo relativo, por lo que no se puede precisar un punto óptimo en el área de exploración.

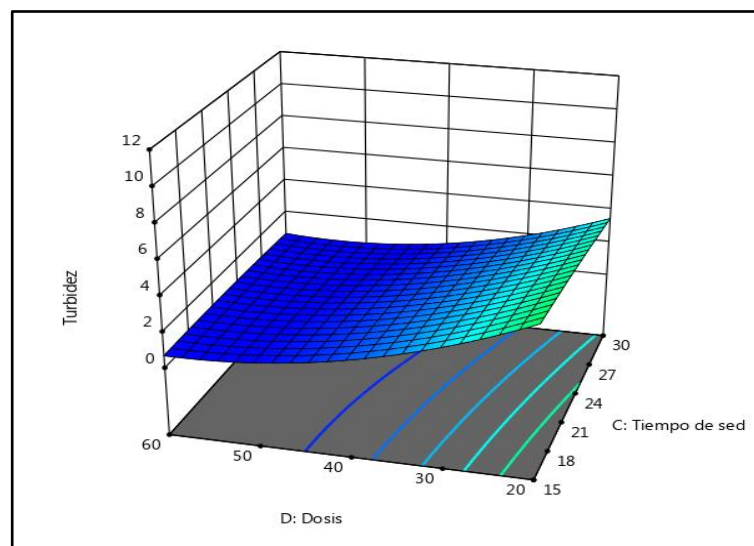


Figura 9. Superficie de respuesta para la variable de turbidez vs las variables independientes tiempo de sedimentación y dosis del coagulante, manteniendo constante la velocidad de agitación y tiempo de floculación.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 10 muestra la superficie de respuesta tridimensional que se ha construido para mostrar las dos variables (velocidad de agitación y tiempo de floculación) en el proceso de clarificación la turbidez.

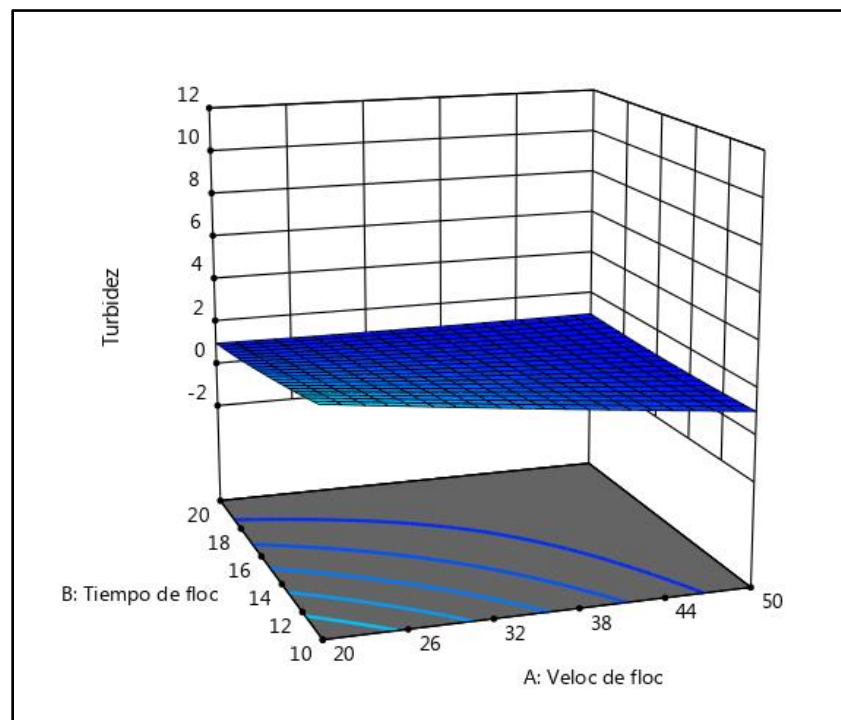


Figura 10. Superficie de respuesta para la variable de turbidez vs las variables independientes velocidad de agitación y tiempo de floculación, manteniendo constante tiempo de sedimentación y dosis del coagulante.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2.7.3. Determinación de las mejores condiciones de operación en el proceso de clarificación

A partir de la ecuación de la regresión múltiple [4] y aplicando el teorema o criterio de la segunda derivada (Matriz Hessiana).

De las primeras derivadas parciales e igualar a 0 la ecuación 3 para hallar los puntos críticos:

Punto crítico (37,80321356; 17,00151273; 19,01924833; 54,12008955).

Calculando los Hessianos (criterio de la segunda derivada) para estudiar si los puntos obtenidos son máximos, mínimos o puntos de silla.

Del criterio de la segunda derivada

Si $H_1(f) > 0$, $H_2(f) > 0$ y $H_3(f) > 0$, entonces f posee un mínimo local.

Si $H_1(f) < 0$, $H_2(f) > 0$ y $H_3(f) < 0$, entonces f posee un máximo local.

Si $H_2(f) < 0$, entonces f posee un punto de silla.

De las Hessianas $H f(x_1, x_2, x_3, x_4)$:

$$H_1(f) = 0,00035463 > 0$$

$$H_2(f) = -4,01838 \times 10^{-5} < 0$$

$$H_3(f) = -4,01838 \times 10^{-5} < 0$$

$$H_4(f) = 5,3857 \times 10^{-10} > 0$$

Donde $y_1 = f$.

Al evaluar la $f(x_1, x_2, x_3, x_4)$ alrededor de los puntos críticos (37,8032; 17,0015; 19,0192; 54,1201), con el criterio de la segunda derivada o Hessianas pues no satisface el orden de los signos en la sucesión de los determinantes para que haya un extremo local (máximo y mínimo), el hecho es que el punto crítico es punto de silla multidimensional (Anexo 13).

Según los resultados obtenidos se observa que la velocidad de agitación a 35 rpm, tiempo de floculación a 15 min, tiempo de sedimentación a 37,5 min y dosis del coagulante de 40 % (40 mg/L de cloruro férrico y 60 mg/L almidón de yuca) se obtiene una mejor turbidez, menor a 1 NTU.

4.1.2.8. Análisis estadístico de los resultados obtenidos, teniendo como turbidez inicial a 300 NTU

Se continúa con el análisis del diseño experimental DCC (diseño compuesto central más puntos estrella), en la Tabla 25 se muestra el análisis de varianza, donde se visualiza los efectos de factores experimentales en el proceso de clarificación teniendo una turbidez inicial de 300 NTU; los resultados se han evaluado a partir de la regresión múltiple donde A, B, C y D son relevantes al 5 % de significancia.

Adicionalmente se observa, el estadístico F es igual a 189,4837, lo que implica la existencia de dependencia conjunta, por lo tanto, el modelo es significativo.

Tabla 25

Análisis de varianza para el proceso de clarificación, turbidez inicial de 300 NTU

Fuente de variación	Suma de cuadrados (SC)	Grados de Libertad (gl)	Suma de cuadrados medios (SCM)	Estadístico F
Regresión	107,172	14	7,6551	189,4837
residuos /errores	0,606	15	0,0404	
total	107,778	29		

Fuente: Elaboración propia

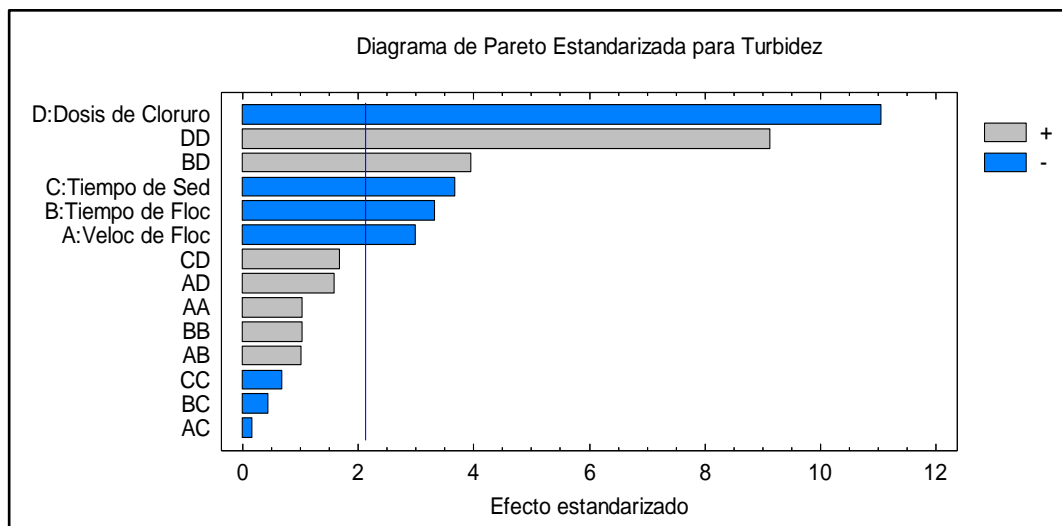


Figura 11. Diagrama de Pareto para el proceso de clarificación, turbidez inicial 300 NTU.

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 26, se observa que, de los cuatro factores analizados, son significativos.

Tabla 26

Análisis respecto a la regresión para el proceso de clarificación, turbidez inicial de 300 NTU

Parámetro	Coefficiente	Error típico	Razón-F	Probabilidad	Significancia
A: Veloc de Floc.	-0,122676	0,142127	28,34	0,0031	SI
B: Tiempo de Floc.	-0,50825	0,142127	35,07	0,002	SI
C: Tiempo de Sed.	-0,0302222	0,142127	42,97	0,0012	SI
D:Dosis de Cloruro	-0,44625	0,142127	387,2	0	SI
AA	0,00054815	0,132947	3,44	0,1227	NO
AB	0,00211667	0,174069	3,33	0,1278	NO
AC	-0,00024444	0,174069	0,1	0,7648	NO
AD	0,00082083	0,174069	8,01	0,0367	SI
BB	0,00488333	0,132947	3,37	0,1257	NO
BC	-0,00186667	0,174069	0,65	0,4578	NO
BD	0,0061375	0,174069	49,73	0,0009	SI
CC	-0,00145185	0,132947	1,51	0,2739	NO
CD	0,00175	0,174069	9,1	0,0296	SI
DD	0,00270208	0,132947	264,37	0	SI

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 27 se observa el valor encontrado de R^2 es 0,946554, es decir que el 94,6554 % de la variación del proceso de remoción de turbidez de 300 NTU, está explicada por las variables independientes (velocidad de agitación, tiempo de floculación, tiempo de sedimentación y dosis de coagulante) y R^2 ajustado es igual a 0,896671.

Tabla 27

Resumen de ajuste estadístico

Estadística de regresión	
Coefficiente de la determinación (R^2)	0,946554
R^2 ajustado	0,896671
Observaciones	30

Fuente: Elaboración propia

4.1.2.8.1. Desarrollo de la ecuación del modelo de regresión

El diseño compuesto central se ha utilizado para desarrollar una correlación entre cuatro variables y el proceso de la remoción de la turbidez. El rango experimental y los niveles de variables independientes se han representado en la Tabla 27. El diseño compuesto central nos brinda un modelo cuadrático. El diseño de este experimento se muestra en la Tabla 27 junto con los resultados experimentales.

El modelo empírico final en términos de factores codificados y el factor real para el proceso de remoción de la turbidez (Y_3) se muestra en la ecuación [5].

$$Y_3 = 20,0334 - 0,122676A - 0,50825B - 0,0302222C - 0,44625D + 0,000548148A^2 + 0,00211667AB -$$

$$0,000244444AC + 0,000820833AD + 0,00488333B^2 - 0,00186667BC + 0,0061375BD - 0,00145185C^2 + 0,00175CD + 0,00270208D^2 \quad [5]$$

Dónde:

A= Velocidad de Agitación (rpm)

B= Tiempo de Floculación (min)

C= Tiempo de Sedimentación (min)

D= Dosis de coagulante (Cloruro Férrico/Almidón de Yuca)

4.1.2.8.2. Efecto combinado de las condiciones de operación sobre el proceso de clarificación

Para ver los efectos de los cuatro factores sobre el proceso de clarificación, se ha utilizado la metodología de la superficie de respuesta y se han trazado gráficos tridimensionales.

La Figura 12 muestra la superficie de respuesta tridimensional que se han construido para mostrar las dos variables (tiempo de sedimentación y dosis del coagulante) manteniendo constante la velocidad de agitación y tiempo de floculación, el pH se encuentra entre el rango de 6,5 - 8,5 por lo cual en todas las condiciones

experimentales se cumple el pH referido por norma, no siendo necesario el análisis estadístico para el rango de exploración.

Se observa que la turbidez en los rangos establecidos y durante todo el proceso se reduce hasta 0,94 NTU, también se puede observar que se reduce la turbidez a medida que se reduce la dosis del coagulante y la velocidad de agitación.

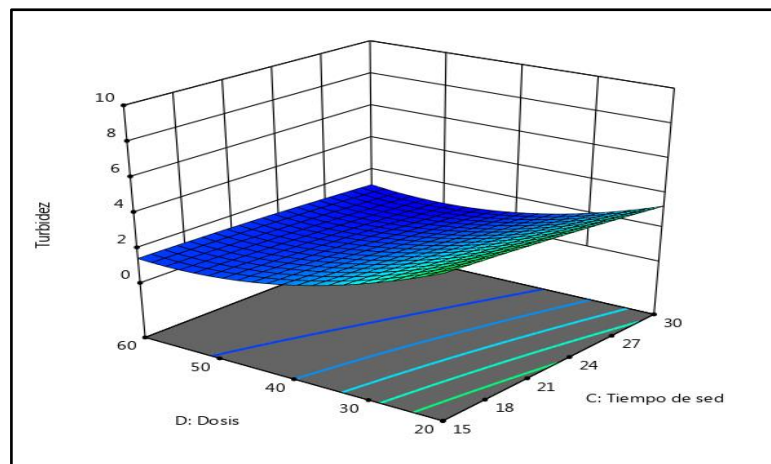


Figura 12. Superficie de respuesta para la variable de turbidez vs las variables independientes tiempo de sedimentación y dosis de coagulante, manteniendo constante la velocidad de agitación y el tiempo de floculación

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 13, muestra superficie de respuesta para la turbidez vs la velocidad de agitación vs tiempo de floculación, manteniendo constante el tiempo de sedimentación y la dosis del coagulante.

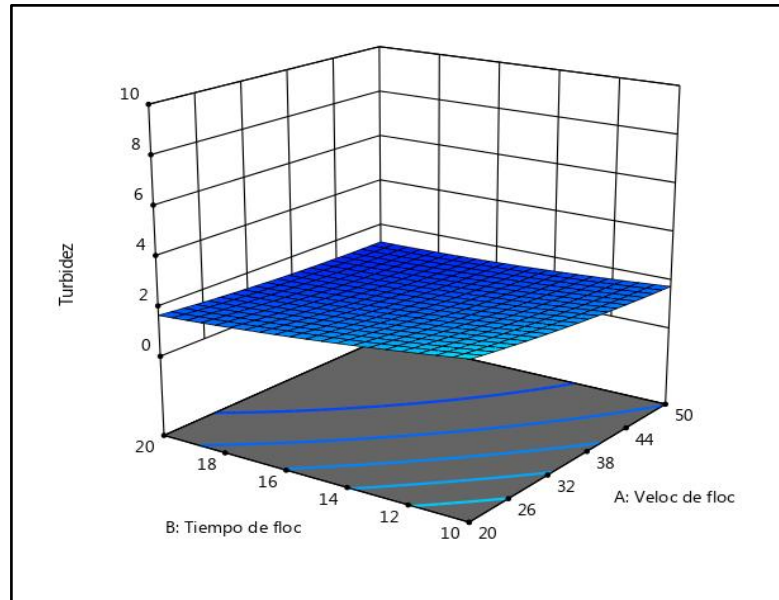


Figura 13. Superficie de respuesta para la variable de turbidez vs las variables independientes, velocidad de agitación y tiempo de floculación.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2.8.3. Determinación de las mejores condiciones de operación en el proceso de remoción de la turbidez.

A partir de la ecuación de la regresión múltiple y aplicando el teorema o criterio de la segunda derivada (matriz Hessiana).

De las primeras derivadas parciales e igualar a 0 la ecuación [5] para hallar los puntos críticos:

Puntos críticos: (65,2567976; 1,88157138; 21,0450539; 63,7116737).

Calculando los Hessiano (criterio de la segunda derivada) para estudiar si los puntos obtenidos son máximos, mínimos o puntos de silla.

Del criterio de la segunda derivada

Si $H_1(f) > 0$, $H_2(f) > 0$ y $H_3(f) > 0$, entonces f posee un mínimo local.

Si $H_1(f) < 0$, $H_2(f) > 0$ y $H_3(f) < 0$, entonces f posee un máximo local.

Si $H_2(f) < 0$, entonces f posee un punto de silla.

De las Hessianas $H f(x_1, x_2, x_3, x_4)$:

$$H_1(f) = 0.0010963 > 0$$

$$H_2(f) = 6,229 \times 10^{-6} < 0$$

$$H_3(f) = -2,07603 \times 10^{-8} > 0$$

$$H_4(f) = -8,16369 \times 10^{-11} > 0$$

Donde $y_1 = f$.

Al evaluar la $f(x_1, x_2, x_3, x_4)$ alrededor de los puntos críticos (65,257; 1,882; 21,045; 63,712), con el criterio de la segunda derivada o Hessianas pues no satisface el orden de los signos en la sucesión de los determinantes para que haya un extremo local (máximo y mínimo), El

hecho es que el punto crítico es un punto de silla multidimensional (Anexo 14 de la resolución).

Se puede decir que a una velocidad de agitación de 35 rpm, tiempo de floculación 15 min, tiempo de sedimentación 22,5 min y dosis del coagulante 40 % (40 mg/L de cloruro férrico y 60 mg/L de almidón de yuca) se obtiene una turbidez menor a 1 NTU.

4.1.2.9. Análisis estadístico de los resultados obtenidos turbidez 400 NTU

En la Tabla 28 se muestra el análisis de varianza donde se visualiza los efectos de factores experimentales en el proceso de clarificación teniendo una turbidez inicial de 400 NTU; los resultados se han evaluado a partir del modelo de regresión múltiple donde A, B, C y D, son relevantes al 5 % de significancia.

Adicionalmente se observa, el estadístico F es 411,85, implica la existencia de dependencia conjunta en el modelo, por lo tanto, el modelo es significativo.

Tabla 28

Análisis de varianza para el proceso de clarificación, turbidez inicial de 400 NTU

Fuente de variación	Suma de cuadrados (SC)	Grados de Libertad (gl)	Suma de cuadrados medios (SCM)	Estadístico F
REGRESION	157,78852	14	11,27060836	411,854146
RESIDUOS /ERRORES	0,41048	15	0,027365533	
	158,199	29		

Fuente: Elaboración propia

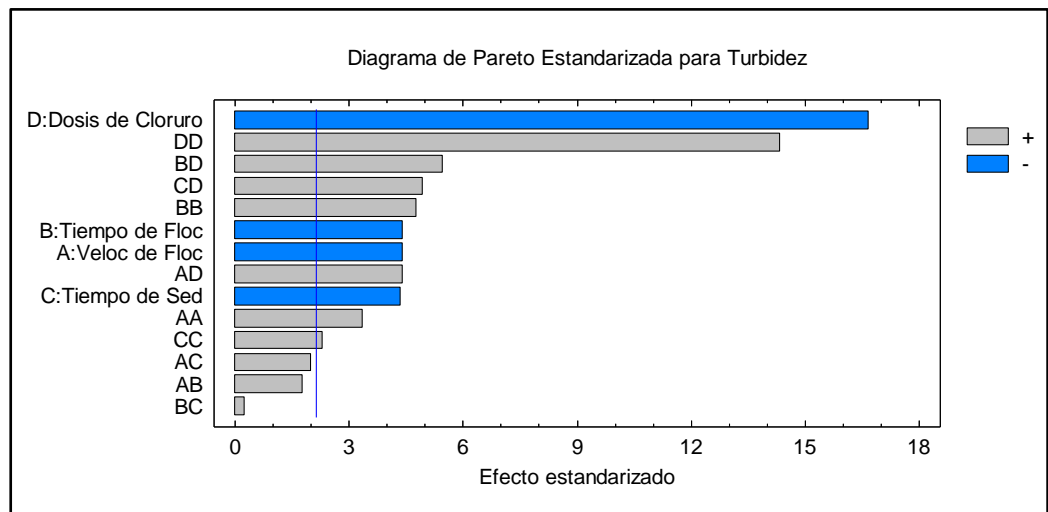


Figura 14. Diagrama de Pareto en el proceso de clarificación

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 29, se observa que, de los cuatro factores analizados, los cuatro factores son significativos.

Tabla 29

Análisis respecto a la regresión para el proceso de clarificación, turbidez inicial de 400 NTU

Parámetro	Coefficiente	Error Estándar	T Calc	P	Significancia
A:Veloc de Floculación	-0,295213	0,116973	58,32	0,0005	SI
B:Tiempo de Floculación	-1,02325	0,116973	58,32	0,0006	SI
C:Tiempo de Sedimentación	-0,4865	0,116973	56,6	0	SI
D:Dosis de Cloruro	-0,611979	0,116973	828,37	0,0042	SI
AA	0,0014157	0,109419	33,9	0,0957	NO
AB	0,0029333	0,143263	9,43	0,0639	NO
AC	0,0022	0,143263	11,94	0,0005	SI
AD	0,0018208	0,143263	58,15	0,0002	SI
BB	0,0180417	0,109419	67,97	0,7964	NO
BC	0,0008667	0,143263	0,21	0,0001	SI
BD	0,0067625	0,143263	89,13	0,0354	SI
CC	0,0038852	0,109419	15,96	0,0002	SI
CD	0,004075	0,143263	72,82	0	SI
DD	0,003387	0,109419	613,23	0,0034	SI

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 30 se observa el valor encontrando R^2 0,976775, es decir que el 97,6775 % de la variación del proceso de clarificación teniendo una turbidez inicial de 400 NTU, esta explicada por las variables independientes (velocidad de agitación, tiempo de floculación, tiempo de sedimentación y dosis de coagulante) y R^2 ajustado 0,955098.

Tabla 30

Resumen de ajuste estadístico

Estadística de regresión	
Coefficiente de la determinación (R^2)	0,976775
R^2 ajustado	0,95098
Observaciones	15

Fuente: Elaboración propia**4.1.2.9.1. Desarrollo de la ecuación del modelo de regresión**

El diseño compuesto central se ha utilizado para desarrollar una correlación entre cuatro variables y la clarificación. El rango experimental y los niveles de variables independientes se han representado en la Tabla 30. El diseño compuesto central da un modelo cuadrático. El diseño de este experimento se muestra en la Tabla 30 junto con los resultados experimentales. El modelo empírico final en términos de factores codificados y el factor real para el proceso de clarificación (Y_4) se muestra en la ecuación [6].

$$\begin{aligned}
 Y_4 = & 35,7194 - 0,295213A - 1,02325B - 0,4865C - 0,61198D + \\
 & 0,001416A^2 + 0,002933AB + 0,0022AC + 0,001820AD + \\
 & 0,0180417B^2 + 0,0008667BC + 0,0067625BD + 0,00388519C^2 + \\
 & 0,004075CD + 0,00338698D^2
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Donde:

A= Velocidad de Agitación (rpm)

B= Tiempo de Floculación (min)

C= Tiempo de Sedimentación (min)

D= Dosis de coagulante (Cloruro Férrico/Almidón de Yuca)

4.1.2.9.2. Efecto combinado de las condiciones de operación sobre el proceso de clarificación

Para ver los efectos de los cuatro factores sobre el proceso de clarificación, se ha utilizado la metodología de la superficie de respuesta y se han trazado gráficos tridimensionales.

La figura 15 muestra la superficie de respuesta tridimensional que se han construido para mostrar las dos variables (velocidad de agitación y tiempo de floculación) vs Turbidez, se observa que el pH se encuentra entre el rango de 6,5 – 8,5 por lo cual en todas las condiciones experimentales se cumple el pH referido por norma, no siendo necesario el análisis estadístico para el rango de exploración analizado.

Se observar que se reduce la turbidez a medida que se aumenta la dosis del coagulante y aumenta la velocidad de agitación.

En la figura 15, muestra la superficie de respuesta para la variabilidad de turbidez vs la velocidad de agitación vs tiempo de floculación, manteniendo constante el tiempo de sedimentación y dosis del coagulante.

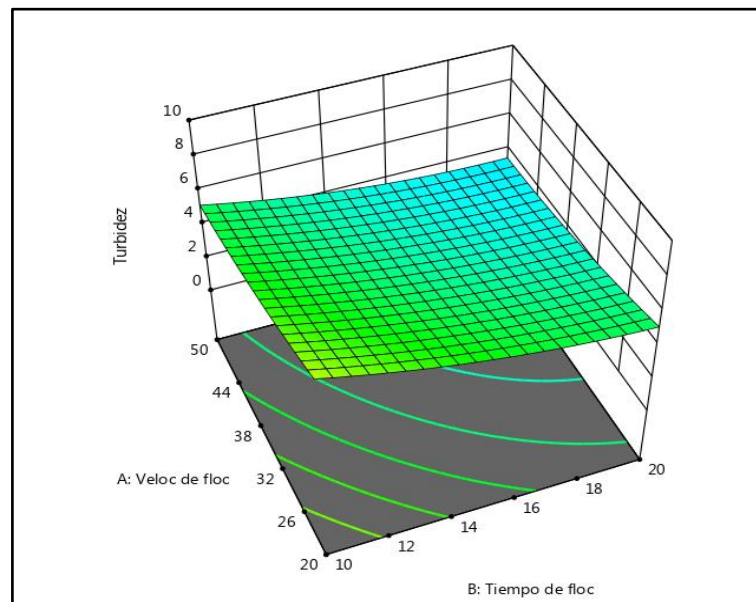


Figura 15. Superficie de respuesta para la variable de turbidez vs velocidad de agitación vs tiempo de floculación, manteniendo constante el tiempo de sedimentación y dosis del coagulante.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2.9.3. Determinación de las mejores condiciones de operación en el proceso de remoción de la turbidez.

A partir de la ecuación de la regresión múltiple y aplicando el teorema o criterio de la segunda derivada (matriz Hessiana).

Puntos críticos: (37,4185844; 15,2111985; 23,6353606; 50, 8810644)

Calculando los Hessiano (criterio de la segunda derivada) para estudiar si los puntos obtenidos son máximos, mínimos o puntos de silla.

Del criterio de la segunda derivada

Si $H_1(f) > 0$, $H_2(f) > 0$ y $H_3(f) > 0$, entonces f posee un mínimo local.

Si $H_1(f) < 0$, $H_2(f) > 0$ y $H_3(f) < 0$, entonces f posee un máximo local.

Si $H_2(f) < 0$, entonces f posee un punto de silla.

De las Hessianas $H f(x_1, x_2, x_3, x_4)$:

$$H_1(f) = 0.00283148 > 0$$

$$H_2(f) = 9,3565 \times 10^{-5} > 0$$

$$H_3(f) = 5,61451 \times 10^{-7} > 0$$

$$H_4(f) = 1,97187 \times 10^{-09} > 0$$

Donde $Y_4 = f$.

Al evaluar la $f(x_1, x_2, x_3, x_4)$ alrededor de los puntos críticos (37,4185844; 15,2111985; 23,6353606; 50,8810644), con el criterio de la segunda derivada o Hessianas, se determina que hay un mínimo local. (Anexo 15 de la resolución).

Se puede decir que, a una velocidad de agitación de 35 rpm, tiempo de floculación 15 min, tiempo de sedimentación 22,5 min y dosis del coagulante 40 % (40 mg/L de cloruro férrico y 60 mg/L de almidón de yuca), se obtiene una mejor remoción menor a 2 NTU.

4.1.3. Caracterización del almidón de yuca

Se obtuvieron los siguientes resultados, que se muestran en la Tabla 31.

Tabla 31

Caracterización del almidón de yuca

Almidón de yuca							
pH	Humedad %	Cenizas %	Proteína %	Contenido lipídico %	Fibra %	Amilosa %	Amilopectina %
5,70	9,21	1,87	4,56	0,22	1,58	27,21	72,79

Fuente: Elaboración propia.

4.1.4. Propuesta de diseño de un reactor batch para la clarificación y remoción de arsénico.

Para la propuesta de diseño, se utilizaron las condiciones de operación más cercanas a las condiciones naturales de mayor remoción de turbidez y mayor remoción de arsénico de la fuente analizada; con el fin de reducir al máximo errores de operación por parte de los usuarios, porque los ácidos son insumos controlados por el decreto supremo N° 348-2015-EF.

Las condiciones de operación propuestas para la remoción de arsénico son: 50 rpm velocidad de agitación, dosis de la combinación del

coagulante 60 %, manteniendo constante tiempo de floculación 20 min, tiempo de sedimentación 30 min y para un volumen de agua de 20 L.

Los condiciones de operación propuestas para la remoción de la turbidez son: 35 rpm velocidad de agitación, tiempo de floculación 15 min, tiempo de sedimentación 27,5 min y dosis de la combinación del coagulante 40 %.

4.1.4.1. Cálculo del volumen del tanque (REACTOR).

Para el volumen de un tanque (reactor) de forma cilíndrica el cálculo se realiza multiplicando el área de la base por la altura del reactor.

$V_{T1} = AH$ (Geankopolis C.J., (1998).).

$$V_{T1} = \frac{\pi(D_{T1})^2}{4} H_{T1} \quad [7]$$

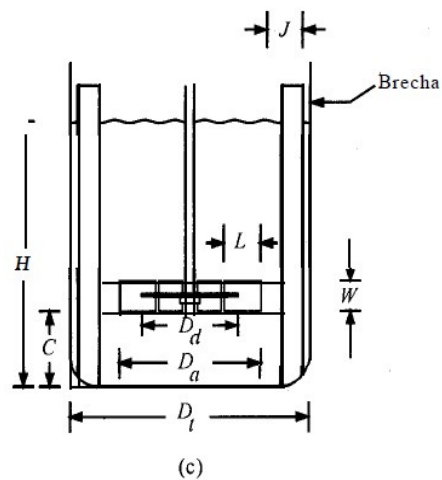
Para el escalamiento del tanque (reactor) (Kayode Coker A., 2012.), la relación de escala R es:

$$R = \frac{V_1}{V_2} = \frac{\pi(D_{T2})^3/4}{\pi(D_{T1})^3/4} = \frac{D_{T2}^3}{D_{T1}^3} \quad [8]$$

$$R = \frac{D_{T2}}{D_{T1}} = \left(\frac{V_{T2}}{V_{T1}} \right)^{1/3} \quad [9]$$

$$D_{T2} = RD_{T1} \quad [10]$$

Para el volumen del tanque (reactor) trabajado, utilizando proporciones geométricas para un sistema de agitación normal (Geankopolis, 1998), es el siguiente:



$$\frac{D_a}{4} = 0,3a0,5; \frac{H}{D_t} = 1; \frac{C}{D_t} = \frac{1}{3}$$

$$\frac{W}{D_a} = \frac{1}{5}; \frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}; \frac{J}{D_t} = \frac{1}{12}$$

$$\frac{D_d}{D_a} = \frac{2}{3}$$

Datos iniciales del reactor para 1L:

D_T	12 cm
D_A	6 cm
L	1,5 cm
C	4 cm
W	1,2 cm
D_a	4 cm
H	12 cm

Utilizando la ecuación 7, se obtiene el volumen del tanque inicial.

$$V_{T1} = \frac{\pi(12)^2}{4} \cdot 12$$

$$V_{T1} = 1357,2 \text{ cm}^3 = 1,4 \text{ L}$$

Para volumen aumentado 20 veces el volumen es:

$$V_2 = 20V_1$$

[11]

$$V_2 = 20 * 1357,2 \text{ cm}^3 = 27143,4 \text{ cm}^3 = 27,1 \text{ L}$$

$$R = \left(\frac{V_{T2}}{V_{T1}} \right)^{1/3} = \left(\frac{27,1}{1,4} \right)^{1/3} = (20,0)^{1/3} = 2,7$$

Por lo tanto multiplico los datos iniciales del reactor por el valor de R.

D_T	32,5 cm
D_A	16,3 cm
L	4,1 cm
C	10,8 cm
W	3,3 cm
D_d	10,8 cm
H	32,5 cm

Para la remoción de Arsénico y hierro total

a) Para mezcla rápida

$$N_1 = 200 \text{ rpm} = (200/60) = 3,3 \text{ rev/s}$$

- Determinar el Número de Reynolds, N_{RE} :

$$N_{RE} = \frac{\rho N D_A^2}{\mu}$$

[12]

Dónde:

$$\rho = \text{densidad del agua; } 998,68 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = \text{Viscosidad del agua a } 18 \text{ }^\circ\text{C; } 0,001054 \text{ kg/m.s}$$

$$N = \text{Rapidez del agitador; } 3,33 \text{ rev/s}$$

$$D_A = \text{Diámetro de la paleta; } 16,26 \text{ cm}$$

- Por lo tanto reemplazando en la ecuación 12, el Número de Reynolds es:

$$N_{RE} = \frac{\rho N D_A^2}{\mu} = \frac{998,68 \times 3,33 \times (0,1626)^2}{0,001054} = 83420,2$$

- Revisar la Figura 16 Correlaciones de potencia para diversos impulsores y deflectores, para hallar el Np: 0,7.

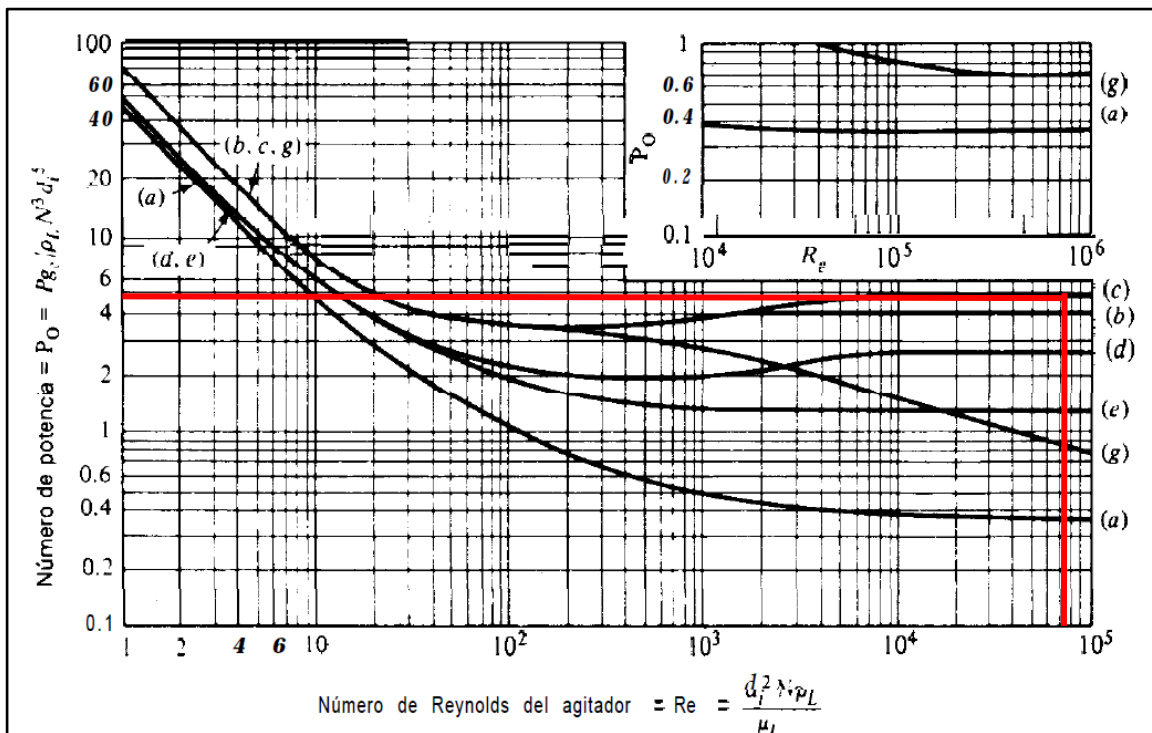


Figura 16. Correlaciones de potencia para diversos impulsores y deflectores

Fuente: Geankopolis, 1998.

- Considérese la curva 1 en la figura 16, turbinas de hojas planas, sin manparas, sin interfase gas/líquido, sin vórtices. Para $N_{Re} = 83420,17$, determinar la potencia y sustituir los valores conocidos tenemos:

$$P = N_p \rho N^3 D_a^5$$

$$P = (0,7)(998,68)(3,33)^3 (0,1626)^5$$

$$P = 2,93399 \text{ W} = 0.00293399 \text{ Kw} = 0,004 \text{ hp}$$

b) Para la mezcla lenta

$$N_1 = 50 \text{ rpm} = (50/60) = 0,8 \text{ rev/s}$$

Determinar el Número de Reynolds, N_{RE} :

$$N_{RE} = \frac{\rho N D_A^2}{\mu} \quad [13]$$

Dónde:

$$\rho = \text{densidad del agua; } 998,68 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = \text{Viscosidad del agua a } 18 \text{ }^\circ\text{C; } 0,001054 \text{ kg/m.s}$$

$$N = \text{Rapidez del agitador; } 0,833 \text{ rev/s}$$

$$D_A = \text{Diámetro de la paleta; } 16,26 \text{ cm}$$

- Por lo tanto reemplazando en la ecuación 14, el Número de Reynolds es:

$$N_{RE} = \frac{\rho N D_A^2}{\mu} = \frac{(998,68)(0,833)(0,1626)^2}{0,001054} = 20867,6$$

- Revisar la Figura 16 Correlaciones de potencia para diversos impulsores y deflectores, para hallar el N_p : 1,2.
- Considérese la curva 1 en la figura 16, turbinas de hojas planas, sin manparas, sin interfase gas/líquido, sin vortices. Para $N_{Re} = 8342017$.

Determinar la potencia y sustituir los valores conocidos tenemos:

$$P = N_p \rho N^3 D_a^5$$

$$P = (1,2)(998,68)(0,833)^3 (0,1626)^5$$

$$P = 0,027037W = 0,00002703Kw = 3,6 \times 10^{-5} \text{ hp}$$

Por lo tanto se utiliza una sumatoria de potencia a diferentes velocidades de mezcla:

$$P_T = P_{MR} + P_{ML} \quad [14]$$

Dónde:

P_T = Potencia Total

P_{MR} = Potencia cuando se produce la mezcla rápida

P_{ML} = Potencia cuando se produce la mezcla lenta

Reemplazando en la ecuación [14]:

$$P_T = 2,93399W + 0,027037W = 2,961027 W = 0,004 \text{ hp}$$

Para el proceso de clarificación:

a) Para la mezcla rápida

$$N_1 = 200 \text{ rpm} = (200/60) = 3,3 \text{ rev/s}$$

- Por lo tanto reemplazando en la ecuación 13, el Número de Reynolds es:

$$N_{RE} = \frac{\rho N D_A^2}{\mu} = \frac{(998,68)(3,33)(0,1626)^2}{0,001054} = 83420,2$$

- Revisar la Figura 16 Correlaciones de potencia para diversos impulsores y deflectores, para hallar el N_p : 0,7.

Considérese la curva 1 en la figura 16, turbinas de hojas planas, sin manparas, sin interfase gas/líquido, sin vórtices. Para $N_{Re} = 834202$.

Determinar la potencia y sustituir los valores conocidos tenemos:

$$P = N_p \rho N^3 D_a^5$$

$$P = (0,7)(998,68)(3,33)^3 (0,1626)^5$$

$$P = 2,93W = 0,0029Kw = 0,0039hp$$

b) Para la mezcla lenta

$$N_1 = 35 \text{ rpm} = (35/60) = 0,583 \text{ rev/s}$$

Utilizando y reemplazando los datos en la ecuación 14, se obtiene el Número de Reynolds

$$N_{RE} = \frac{\rho N D_A^2}{\mu} = \frac{(998,68)(0,583)(0,1626)^2}{0,001054} = 146131$$

- Utilizando la Figura 16 Correlaciones de potencia para diversos impulsores, se obtuvo N_p : 1,5

Considérese la curva g en la figura 16, $N_p = 1,5$ para $N_{Re} = 146131$. Determinar la potencia y sustituir los valores conocidos tenemos:

$$P = N_p \rho N^3 D_a^5$$

$$P = (1,5)(998,68)(0,583)^3 (0,1626)^5$$

$$P = 0,034W = 0,000034Kw = 4,52 \times 10^{-5} HP$$

Por lo tanto se utiliza una sumatoria de potencia a diferentes velocidades de mezcla

$$P_T = P_{MR} + P_{ML} \quad [15]$$

Dónde:

P_T = Potencia Total

P_{MR} = Potencia cuando se produce la mezcla rápida

P_{ML} = Potencia cuando se produce la mezcla lenta

Reemplazando en la ecuación (15):

$$P_T = 2,9339W + 0,033738W = 2,967728W = 0,0039 \text{ HP}$$

4.2. Discusión de resultados

Esta investigación tuvo como propósito estudiar el poder coagulante del almidón de yuca con el coagulante químico cloruro férrico según las recomendaciones hechas por Arboleda J (1975), Los floculantes y coagulantes, así como las ayudas de floculación deben de diluirse antes de añadirse al proceso para mejorar la eficiencia de éste, por tal motivo se utilizó el almidón de yuca en solución para obtener buenos resultados.

Se comparó los resultados obtenidos en la presente investigación con otros estudios realizados donde utilizaron almidón de yuca pero con diferentes coagulantes químicos, como el realizado por Moscozo (2015), que utilizó almidón de yuca y sulfato de aluminio obtuvieron turbiedades inferior a 5 NTU, pero la presente investigación utilizó almidón de yuca y cloruro férrico obteniéndose resultados mejores inferiores a 3 NTU, pero ambas investigaciones concuerdan que se puede sustituir hasta un 60 % del coagulante químico por almidón de yuca, para que se cumpla los límites máximos permisibles según las normas establecidas.

Los resultados obtenidos del análisis fisicoquímico de la yuca (*Manihot esculentum*) analizado, muestra en la tabla N° 30, la humedad de la yuca variedad presenta 9,21 % resultado que no es similar al valor reportado por Ospina y Ceballos (2002) de 66 %; según Collazos (1996) reporta un valor de 58,9 %, el valor de la humedad depende mucho de la variedad y otros

factores como: Estado de madurez, tipos de suelos, condiciones climáticas etc. El contenido proteico de 4,56 %, el cual es superior a los valores de reportados por Ospina y Ceballos (2002); Collazos (1996), donde hacen mención que el porcentaje de proteínas es de 1,2 % y 0,8 % respectivamente.

Respecto al contenido de amilasa obtenido del almidón de yuca analizado se obtuvo un 27,21 %, según Ríos (2014) en su investigación reporto un contenido de amilosa en almidón de yuca de 23,88 %; Hernández et. al., (2008), en su investigación hace mención que el contenido de amilosa en almidón de yuca es de 17 %. Así mismo en el almidón de mandioca o yuca existe un amplio rango de valores reportados por otros autores: Swinkels (1985) y Hung y Morita (2005) informaron que contiene 17 % de amilosa; mientras que Aryee et. al., (2006) trabajo con 31 variedades de mandioca encontraron que el mismo varió entre 10,9 y 44, relacionadas con las variedades de mandioca empleadas, las condiciones de crecimiento del cultivo como así también el método de cuan. (Mali et al relacionarse con la alta digestibilidad y estabilidad de sus pastas et al, 1999)

Ríos (2014), en su investigación reporto contenidos de amilosa para los almidones de tres variedades de malanga: M. coco 13,05 %, M. Isleña 14,78 %, M. Edoes 16,74 %; Hernández et. al., (2008), en su investigación reportaron valores del contenido de amilosa en tubérculos como el de makal

23,6 %, camote 19,6 %, sagú 22,7 %; según Agama et. al., (2005) mencionan en su investigación que el contenido de amilosa para el almidón de maíz blanco es de 27 %, maíz azul 20 % y maíz negro 22 %; y (Sánchez González, 2007) para el almidón de papa con 22 % de amilosa. El contenido de amilosa de almidón de yuca se encuentra en valores muy parecidos a los tubérculos antes mencionados y con una clara diferencia respecto al almidón de maíz blanco.

CONCLUSIONES

Se logró determinar los parámetros de diseño en el proceso de clarificación a diferentes turbiedades iniciales para el rango de 0-150 NTU; se obtuvo una velocidad de agitación de 35 rpm, tiempo de floculación 15 min, tiempo de sedimentación 37,5 min. y dosis de la combinación de coagulante 40 % (40 % de cloruro férrico y 60 % de almidón de yuca). Para turbiedades entre 150-300 NTU se obtuvo una velocidad de agitación de 35 rpm, tiempo de floculación 15 min, tiempo de sedimentación 22,5 min. y una dosis de la combinación de coagulante de 40 % (40 % de cloruro férrico y 60 % de almidón de yuca) y para turbiedades entre 300-400 NTU se obtuvo una velocidad de agitación de 35 rpm, tiempo de floculación 15 min, tiempo de sedimentación 22,5 y Dosis de la combinación de coagulante 40 % (40 % de cloruro férrico y 60 % de almidón de yuca).

Se logró determinar el porcentaje de sustitución del cloruro férrico con almidón de yuca de 60 % para lograr una mayor remoción de arsénico, para el proceso de remoción de la turbiedad, se logró determinar el porcentaje de sustitución de cloruro férrico con almidón de yuca de 40 % para lograr una mayor remoción de la turbiedad.

Se caracterizó el almidón de yuca, obteniéndose valores promedios obtenidos de la composición fisicoquímica del almidón de yuca como:

proteínas 4,26 %, fibra cruda 1,56 %, cenizas 1,84 %, también se determinó el contenido de amilasa 27,15 % y amilopectina 72,85 %.

El dimensionamiento para la propuesta de diseño del reactor batch de 20 l fue realizado en base a los factores de forma de reactor piloto (prueba de jarras), resultando las siguientes dimensiones diámetro del tanque de 32,5 cm, diámetro de la paleta de 16,3 cm, largo de la paleta s de 4,1 cm, altura de la paleta 10,8 cm, ancho de la paleta de 3,3 cm, y altura del tanque 32,5 cm y una potencia total para el proceso de remoción de arsénico de 0,0039708 HP y la potencia total para el proceso de clarificación de 0,0039798 HP.

RECOMENDACIONES

El empleo de almidón como agente coadyuvante en la remoción de turbidez, mezclado con cloruro férrico (agente coagulante), permitiría reducir el costo económico, el impacto ambiental y los efectos a la salud pública. Como resultado de esta investigación, se abre una posibilidad de experimentar con otros tipos de aguas tales como las residuales industriales o municipales.

Es importante realizar futuras investigaciones con almidones estructuralmente modificados con el propósito de aumentar la efectividad en la remoción de color y turbiedad en procesos de tratamiento de aguas superficiales y eliminar el uso de coagulantes metálicos.

Realizar estudios de aplicación para aguas superficiales reales con alta turbiedad utilizando los polímeros naturales identificados en cada región geográfica, como coagulante y coadyuvante en el proceso de clarificación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agama, E., Ottenhof, M., Farhat, I. A., Paredes-López, O., Ortíz-Cereceres, J. y Bello-Pérez, L. A. (2005). Aislamiento y caracterización del almidón de maíces pigmentados. *Agrociencia*. 39:419-429.
- Almendárez N. (2004). Comprobación de la efectividad del coagulante (Cochifloc) en aguas del Lago de Managua, Nicaragua. *Revista Iberoamericana de Polímeros* 5, 46-54.
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2011). Protocolo Nacional de Monitoreo de Calidad de Agua. Recuperado el 13 de setiembre del 2016 de <http://www.ana.gob.pe/media/361356/3%20protocolo%20nacional%20d%20monitoreo%20af.pdf>
- Andía Cárdenas, Yolanda; SEDAPAL, (2000), Evaluación de plantas y desarrollo tecnológico-tratamiento del agua.
- AOAC. (2005). Ash of flour. Association of Analytical Chemists International (AOAC). 7 ed. MD, Estados Unidos de América.
- 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). Tesis Doctoral. Universidad Veracruzana. Veracruz, México, 119 p.

Arboleda V., Jorge, Castro, María Luisa & Kirchmer, Dr. Cliff J. (1975). Polímeros Naturales y su aplicación como ayudantes de floculación. Lima, Perú: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), 205 p.

Aryee, F.; Oduro, I.; Ellis, W. & Afuakwa, J. (2006). The physicochemical properties of flour samples from the roots of 31 varieties of cassava. *Food Control*, 17(11), 916-922.

Buleón, A., Colonna, P., & Leloup, V. (1990). Les amidones et leurs dérivés dans les industries des céréales. *Industries alimentaires et agro-industrielles*. juin. 515-532.

Campos, José Roberto; Di Bernardo Luís, (2000). Uso de polímeros Naturales en el Tratamiento De Agua para abastecimiento, Cinara, centro inter. Umbral científico/ 15 evaluación del proceso de la coagulación Regional de abastecimiento y Remoción de Agua, Universidad de Sao Paulo, Escuela de ingeniería de Sao Carlos – Brasil.

- Cartwright, M.A. (2009). Caracterización fisicoquímica de los almidones nativos y modificados de Yuca (*Manihot esculenta* Crantz), camote (*Ipomeae batata* Lam) y plátano valery (*Musa cavendish*). Veracruzana. Veracruz, México.
- Dorea C. (2006). Use of *Moringa* spp. seeds for coagulation: a review of a sustainable option. *Water Science* 6 No. 1, 219-227.
- Collazos, C. (1996). La composición de los alimentos de mayor consume en el Perú. Ministerio de salud VI edición.
- Ganjidoust, H.; Tatsumi, K.; Yamagishi, T.; Gholian, R.N. (1997). Effect of syntethic and natural coagulant on ligning removal from pulp and paper waste water. *Water Sci. Techn.* 35:286-291.
- Geankopolis, C. J. (1998), *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*.
- Guzman, Villaboa, Tejada & García, (2013); Reducción de la turbidez del agua usando coagulantes naturales.
- Hernández Medina Marilyn, Torruco Juan Gabriel, Chel Guerrero Luis, Betancur Ancona David. (2008). Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México. *Ciênc. Tecnol. Aliment.* Campinas, 28(3): 718-726.

Hoover, R. (2001). Composition, molecular structure, and physicochemical properties of tuber and root starches a review. *Carbohydrate Polymers*, 45: 253- 267.

Hung, P.V. & Morita, N. (2005). Thermal and rheological properties of dough and bread as affected by various cross-linked corn starch substitutions, *Starch/Starke*, 57, 540–546.

Jones, F.T. (2007); “Abroad view of arsenic” *Poult Sci*, Volt 86 N°1 pp 2-14.

Kirchmer J.C., Arboleda J. & Castro M. (1975). *Polímeros naturales y su aplicación como ayudantes de floculación*. Serie Documentos Técnicos 2, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Lima, Perú.

Kayode Coker A., 2012. *Modeling of Chemical Kinetics and Reactor Design*

Majzoobi M, Radi M, Farahnaky A, Jamalian J, & Tongdang T. (2009). Physico chemical properties of phosphoryl chloride cross-linked wheat starch, *Iranian Polymer Journal*, 18(6): 491-499.

Mali, S.; Grossmann, M.; García, M.; Martino, M. Y Zaritzky, N (1999).
Microstructural characterization of yam starch films. *Carbohydrate
Polymers*, 50, 379–386

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.

McGrance, S.; Cornell, H.; Rix, C. 1998. A simple and rapid colorimetric method
for the determination of amylose in starch products. *Starch/Stärke* 50: 158-
163.

Méndez A. (2010). Evaluación de la extracción de almidón del Banano verde
(*Musa sapientum*, variedad gran enano) Producto de Desecho de las
Industrias Bananeras y Evaluación de su función como excipiente en la
Formulación de Comprimidos, Proyecto Fodecyt 059-2009 Informe Final.
Guatemala.

Ministerio de Salud (MINSA). (2010). D. S. N°031-2010-SA. Límites Máximos
Permisibles de parámetros de calidad organoléptica del reglamento de
calidad de agua para consumo humano. Publicado en el diario el Peruano
569082, 24 de septiembre del 2010. Recuperado el 11 de abril del 2016 de
http://www.digesa.minsa.gob.pe/publicaciones/descargas/reglamento_calidad_agua.pdf.

Moscozo, A. (2015). Almidón de yuca como sustituto del sulfato de aluminio en el proceso de coagulación-floculación en sistemas de tratamiento de agua para potabilización. Guatemala.

Navarro A., Ramos K., Campos K. y Maldonado H. (2006). Elucidación del efecto del pH en la adsorción de metales pesados mediante biopolímeros naturales: cationes divalentes y superficies activas. Revista Iberoamericana de Polímeros (RIP). 7, 113-126.

Ospina B., Ceballos H. (2002). La yuca en el tercer milenio: Sistemas modernos de producción, procesamiento, utilización comercial y comercialización/compilado. Cali Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical.

Pérez, M. (1992). La eliminación de un colorante aniónico (Acid Blue 92) por coagulación-floculación usando almidón de papa. Colombia. Recuperado el 31 de octubre del 2016 <http://www.scielo.org.co/scielo.php?scrp>.

Pérez Carrión, José (1992). Programa Regional HPE/OPS/CEPIS de mejoramiento de la calidad del agua para consumo humano.

Ríos, K. (2014). Tesis “Análisis comparativo de las propiedades físico-químicas y nutrimentales de almidón obtenido a partir de dos especies de malanga

(*Colocasia antiquorum* y *Colocasia esculenta*) cultivadas en el estado de Oaxaca”.

Rodríguez M., J. P.; Lugo U., I. P.; Rojas C., A. V.; Malaver C., C. (2011)

Evaluación del proceso de la coagulación para el diseño de una planta potabilizadora Umbral Científico, núm. 11, semestral, pp. 8-16

Romero Rojas J.A. (1999) Potabilización del agua. Alfaomega, México. 327 pp.

Sánchez González, I. (2007). Propiedades fisicoquímicas de almidones catiónicos elaborados por extrusión. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional. Centro de Investigación en ciencia aplicada y tecnología avanzada

Sánchez J, Beltran J, Carmona C, y Gibello P. (2011). Absorbentes naturales a partir de taninos. Una propuesta de reutilización de residuos forestales para la purificación de aguas. Cuides, Universidad de Extremadura, 7: 125- 139, ISSN 1889-0660.

Shogren R. (2009). Flocculation of kaolin by waxy maize starch phosphates, *Carbohydrate Polymers*, 76: 639–644.

Shahriari T., Bidhendi N. y Shariari S. (2012). Evaluating the efficiency of *plantago ovata* and starch in water turbidity removal. *Int. J. Environ. Res.* 6, 259-264.

Solis Silvan, Rudy, Laines Canepa, Jose Ramon & Hernandez Barajas Jose Roberto, (2012). Mezclas con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales. Bogota: s.n., Revista internacional de contaminación ambiental, 28(3): 229-236.

Swinkels, J.J. (1985). Composition and Properties of Commercial Native Starches. *Starch/Stärke*, 37(1), 1–5.

United Nations International Children's Emergency Fund (UNICEF). (2014). Objetivos del desarrollo del milenio. USA. Recuperado el 14 de abril del 2017 de http://unicef.org/spanish/people_audrey_hepburn.htm.

Vandamme D, Foubert I, Meesschaert B, y Muylaert K. (2010). Flocculation of microalgae using cationic starch, *Springer Science*, 22: 525-530.

ANEXOS

ANEXO 1: Límites máximos permisibles de parámetros de calidad organoléptica del agua potable.

Parámetros	Unidad de medida	Límite máximo permisible
1 Olor	---	Aceptable
2 Sabor	---	Aceptable
3 Color	UCV escala Pt/Co	15
4 Turbiedad	NTU	5
5 pH	Valor de pH	6,5 a 8,5
6 Conductividad (25°C)	µmho/cm	1 500
7 Sólidos totales disueltos	mg/L	1 000
8 Cloruros	mg Cl ⁻ /L	250
9 Sulfatos	mg SO ₄ /L	250
10 Dureza total	mg CaCO ₃ /L	500
11 Amoniacó	mg N/L	1,5
12 Hierro	mg Fe/L	0,3
13 Manganeso	mg Mn/L	0,4
14 Aluminio	mg Al/L	0,2
15 Cobre	mg Cu/L	2
16 Zinc	mg Zn/L	3
17 Sodio	mg Na/L	200

UCV = Unidad de color verdadero

UNT = Unidad nefelométrica de turbiedad

Fuente: MINSA, 2010

**ANEXO 2: Límites máximos permisibles de parámetros químicos
inorgánicos del agua potable.**

Parámetros Inorgánicos	Unidad de medida	Límite máximo permisible
1 Antimonio	mg Sb/L	0,02
2 Arsénico (nota 1)	mg As/L	0,01
3 Bario	mg Ba/L	0,7
4 Boro	mg B/L	1,5
5 Cadmio	mg Cd//L	0,003
6 Cianuro	mg CN/L	0,07
7 Cloro (nota 2)	mg/L	5
8 Clorito	mg/L	0,7
9 Clorato	Mg/L	0,7
10 Cromo total	mg Cr/L	0,05
11 Flúor	mg F/L	1
12 Mercurio	mg Hg /L	0,001
13 Niquel	mg Ni/L	0,02
14 Nitratos	mg NO ₃ /L	50
15 Nitritos	mg NO ₂ /L	3,00 Exposición corta 0,20 Exposición larga
16 Plomo	mg Pb/L	0,01
17 Selenio	mg Se/L	0,01

Nota 1: En caso de los sistemas existentes se establecerá en los Planes de Adecuación Sanitaria el plazo para lograr el límite máximo permisible para el arsénico de 0,010 mg/l.

Nota 2: Para una desinfección eficaz en las redes de distribución la concentración residual libre de cloro no debe ser menor de 0,5 mg/l.

Fuente: MINSa, 2010

ANEXO 3: Determinación de hierro, método de la o-fenantrolina

1. Discusión general

El hierro se pone en solución, se reduce al estado ferroso hirviéndolo con ácido e hidroxilamina y se trata con 1,10-fenantrolina a un pH de 3.2 a 3.3. Tres moléculas de fenantrolina quelatan cada átomo de hierro ferroso para formar un complejo naranja-rojo. Los estándares de color son estables durante al menos 6 meses.

2. Aparato

a. Equipo colorimétrico: Se requiere uno de los siguientes:

1) Espectrofotómetro, para uso a 510 nm, que proporciona una trayectoria de luz de 1 cm o más.

b. Cristalería lavada con ácido: lave toda la cristalería con ácido clorhídrico concentrado (HCl) y enjuáguela con agua reactiva antes de usarla para eliminar los depósitos de óxido de hierro.

3. Reactivos

Almacenar los reactivos en frascos con tapón de vidrio. Las soluciones de HCl y acetato de amonio son estables indefinidamente si se cierran herméticamente. Las soluciones de hidroxilamina, fenantrolina y hierro común son estables durante varios meses. Las soluciones de hierro estándar no son estables; preparar diariamente según sea necesario diluyendo la solución madre.

- a. Ácido clorhídrico concentrado, que contenga menos de 0,5 ppm de hierro.
- b. Solución de hidroxilamina: disolver 10 g de $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ en 100 ml de agua.
- c. Solución tampón de acetato de amonio: disolver 250 g de $\text{NH}_4\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2$ en 150 ml de agua. Añadir 700 ml de ácido acético (glacial) conc.
- d. Solución de acetato de sodio: disolver 200 g de $\text{NaC}_2\text{H}_3\text{O}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ en 800 ml de agua.
- e. Solución de fenantrolina: disolver 100 mg 1,10-fenantrolina monohidrato, $\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$, en 100 ml de agua, agitando y calentando a 80°C . No hervir. Deseche la solución si se oscurece. El calentamiento no es necesario si se agregan 2 gotas de HCl concentrado al agua. (NOTA: Un mililitro de este reactivo es suficiente para no más de $100\ \mu\text{g}$ de Fe.)
- f. Permanganato de potasio, 0,1 M: disolver 0.316 KMnO_4 en agua reactiva y diluir hasta 100 ml.
- g. Solución de hierro común: use metal (1) o sal (2) para preparar la solución madre.
 - 1) Utilice un cable de hierro electrolítico o "cable de hierro para estandarizar" para preparar la solución. Si es necesario, limpie el alambre con papel de lija fino para eliminar cualquier recubrimiento de óxido y producir una superficie brillante. Pese 200.0 mg de alambre y colóquelo en un matraz volumétrico de 1000 ml. Disuelva

en 20 mL de ácido sulfúrico 6N (H_2SO_4) y diluya con agua; 1,00 mL = 200 μg de Fe.

- 2) Si se prefiere sulfato de amonio ferroso, añada lentamente 20 ml de H_2SO_4 concentrado a 50 ml de agua y disuelva 1.404 g de $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Añadir 0.1M permanganato de potasio (KMnO_4) gota a gota hasta que persista un color rosado tenue. Diluir a 1000 ml con agua y mezclar; 1.00 mL = 200 μg de Fe.

h. Soluciones de hierro estándar: preparar diariamente para su uso.

- 1) Pipetear 50,00 ml de solución madre en un matraz aforado de 1000 ml y diluir para marcar con agua; 1.00 mL = 10.0 μg de Fe.
- 2) Pipetear 5,00 ml de solución madre en un matraz aforado de 1000 ml y diluir para marcar con agua; 1.00 mL = 1.00 μg de Fe.

PRECAUCIÓN: Los éteres pueden formar peróxidos explosivos; prueba antes de usar.

4. Procedimiento

a. Hierro total: mezcle la muestra completamente y mida 50.0 ml en un matraz erlenmeyer de 125 ml. Si este volumen de muestra contiene más de 200 μg de hierro, use una porción más pequeña medida con precisión y diluya a 50.0 mL. Añadir 2 ml de HCl concentrado y 1 ml de solución de $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$. Añadir unas cuantas perlas de vidrio y calentar a ebullición. Para asegurar la disolución de todo el hierro, continúe hirviendo hasta que

el volumen se reduzca a 15 a 20 ml. (Si la muestra está descascarada, retire el residuo en 2 ml de HCl concentrado y 5 ml de agua). Enfríe a temperatura ambiente y transfiera a un matraz aforado de 50ml. Agregue 10 ml de solución tampón $\text{NH}_4\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2$ y 4 ml de solución de fenantrolina, y diluya para marcar con agua. Mezcle bien y deje un mínimo de 10 minutos para obtener el máximo desarrollo de color.

b. Medición de color: Prepare una serie de estándares mediante el pipeteo calculado con precisión los volúmenes de soluciones de hierro estándar para medir porciones de 1 a 10 μg en matraces erlenmeyer de 125 ml, diluyendo a 50 ml agregando volúmenes medidos de agua.

Para una comparación visual, prepare un juego de al menos 10 patrones, que van desde 1 a 100 μg de Fe en 100 ml de volumen final.

5. Cálculo

Cuando la muestra ha sido tratada de acuerdo:

$$\text{mg} \frac{\text{Fe}}{\text{L}} = \frac{\mu\text{gFe (en 100ml de volumen final)}}{\text{ml de muestra}}$$

ANEXO 4: Extracción y obtención del almidón de yuca

Para la obtención del almidón, se utilizó la metodología de Aparicio (2003). Se pesaron y lavaron 1 kg de yuca. Los tubérculos ya pelados se picaron en porciones de aproximadamente 2,0 x 1,2 cm, remojándose en un recipiente que contenía un volumen de agua seis veces el peso de la muestra a temperatura de 40 °C.

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 h. 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 °C por 24 h, pulverizándose finalmente.

ANEXO 5: Recolección de muestras de agua cruda

La toma de muestras de agua natural deberá ser realizada en los puntos de control y a la profundidad establecida en la autorización de vertimiento de aguas residuales tratadas en concordancia con lo señalado en el instrumento de gestión ambiental y de acuerdo con las disposiciones establecida en el Protocolo.

En caso las condiciones climáticas (tormentas, lluvias o nevadas) u oceanográficas (braveza del mar) que no permitan la toma de muestra en condiciones seguras, se prescindirá de realizar el monitoreo en el cuerpo receptor, lo que deberá ser debidamente sustentado. (ANA, 2011)

ANEXO 6: Calibración de sensor de pH.

1. Presione la tecla de encendido y apagado para poner en funcionamiento el pH metro, espere hasta que la pantalla sea estable.
2. Enjuague el electrodo con agua destilada, limpie suavemente y sumérjalo en solución buffer de pH 7,00.
3. Presione la tecla calibración, el equipo automáticamente inicia con la calibración y en la parte inferior se observa la frase CAL. 1 esperar hasta que deje de destellar la frase pH y una vez arroje el valor del buffer en la pantalla del medidor presione nuevamente la tecla calibración este último sin retirar el electrodo de la solución tampón y usted observará la frase CAL. 2.
4. Enjuague el electrodo con agua destilada, seque suavemente y sumerja el electrodo en la solución de pH 4.00, el equipo automáticamente realiza el reconocimiento y espere hasta que deje de destellar la frase pH y una vez arroje el valor del buffer en la pantalla del medidor presione la tecla medición, en ese momento aparece un pantallazo donde se observa la pendiente entre 92,0 y 102,0, en este momento terminó el proceso de calibración.
5. Oprima la tecla medición, y espere hasta que la pantalla deje de destellar.

6. Retire el electrodo de la solución, enjuague el electrodo con agua destilada, seque suavemente y sumerja en la solución buffer de pH 7,00 y oprima la tecla de medición y espera hasta que deje de destellar.

ANEXO 7: Determinación de la humedad del almidón de yuca

El porcentaje de humedad se determina por el método gravimétrico para la cual se pesa 1 g de muestra triturada se pesa en crisoles libres de grasa y humedad y pesados previamente. La muestra se somete a un proceso de secado a 105°C para evaporar el agua libre, hasta alcanzar peso constante. Una vez seca, la muestra se vuelve a pesar y el contenido de humedad se determina como:

$$\%Humedad = \frac{M_f - M_i}{M_i} \times 100$$

Dónde:

M_f : Masa del crisol con la muestra seca

M_i : Masa muestra inicial

ANEXO 8: Determinación de ceniza del almidón de yuca

El contenido de cenizas se determina por el método gravimétrico en el cual se pesa 1 g de muestra triturada es pesada en crisoles disecados y pesados previamente. A continuación, la muestra se coloca en una estufa a 105°C para evaporar el agua libre por al menos 12 horas, y luego se calcina en una mufla a 550 °C por 5 horas para eliminar la materia orgánica. Se deja enfriar hasta temperatura ambiente y se vuelve a pesar la muestra calcinada. El contenido de cenizas se determina con la siguiente fórmula:

$$Cenizas(\%) = \frac{M_f - M_c}{M_i - M_c} \times 100\%$$

Dónde:

M_f : Peso del crisol con la muestra calcinada, g

M_i : Peso del crisol con la muestra inicial, g

M_c : Peso del crisol seco y vacío, g

ANEXO 9: Determinación del contenido de proteínas

El contenido de proteína se determinó por el método de Kjeldahl. El método consiste en la determinación de nitrógeno a través de tres pasos: digestión, destilación y titulación. Durante la digestión, se descompone el nitrógeno de la muestra orgánica por ebullición en ácido sulfúrico concentrado para formar una solución de sulfato de amonio. En la destilación, se añade una base en exceso a la mezcla resultante de la destilación ácida para convertir el ion amonio en amoniaco. A continuación se somete a ebullición y se condensa el gas amoniaco en una solución receptora. Finalmente, se titula la solución para cuantificar la cantidad de amoniaco. Se calcula la cantidad de nitrógeno presente a partir de la cantidad de iones en la solución receptora.

Para la digestión, se usa un catalizador compuesto por 9 g de sulfato de potasio y 1 gramo de sulfato de cobre. Para la determinación de proteína se pesan 0.5 g de la muestra seca y 2 pastillas de catalizador de Kjeldahl en un balón de digestión de 100 ml, para luego añadir 13 ml de ácido sulfúrico al 97 %. Los balones se calientan hasta que la digestión esté completa, la cual se alcanza cuando se torna de un color claro azulado. El producto de la digestión se hace reaccionar con una solución de hidróxido de sodio (NaOH) al 40 % y a continuación se calienta y se destila. El destilado se recibe sobre 25 ml de solución de ácido bórico (H_3BO_3) al 4 % hasta doblar su volumen.

Por último, se titula con una solución estandarizada de ácido clorhídrico (HCl) 0,01M utilizando verde de bromocresol como indicador. A partir del volumen de ácido clorhídrico utilizado para la titulación se calcula el porcentaje de proteína de acuerdo a la ecuación:

$$\%Proteína: \frac{V \times C_{HCl} \times MW_{N2}}{M_i} \times f \times 100\%$$

Dónde:

V: Volumen de HCl utilizado para la titulación de la muestra, ml

C_{HCl}: Concentración de ácido clorhídrico, mol/l

MW_{N2}: Peso molecular del nitrógeno, g/mol

M_i: Peso inicial de la muestra, mg

f: Factor de proteína (6,25)

ANEXO 10: Determinación del contenido lipídico

A cantidad de grasa presente en una muestra se determinó por el método de Randall. La extracción se realizó con solvente orgánico en el equipo extractor de solvente.

Se prepara un cartucho de celulosa, en el que se pesa la muestra seca. El cartucho con la muestra se inserta en el tubo extractor, el cual se conecta al balón extractor por la parte superior y este tubo al condensador.

El balón contiene 200 ml de hexano como solvente, y se coloca sobre una manta de calentamiento de forma que el solvente se volatilice y se lleve a cabo el proceso de extracción. Esto se realiza por un período de 8 horas, luego de lo cual el solvente es recuperado.

Para ello, se retira el cartucho del tubo extractor y se recupera todo el solvente libre de la muestra en el balón de destilación.

A continuación el balón es llevado al rotavapor en el cual se somete a calentamiento indirecto al sumergirlo en agua caliente. El hexano se evapora y es recuperado al llegar a un tubo condensador.

El restante de líquido en el balón representa la fracción lipídica presente en la muestra, y su peso se obtiene por diferencia entre el peso final del balón con el residuo y el peso del balón vacío.

$$Grasas(\%) = \frac{M_f}{M_i} \times 100\%$$

Donde:

M_f : Peso de la fracción lipídica recuperada, g

M_i : Peso inicial de la muestra, g

ANEXO 11: Determinación del contenido de fibra cruda

La determinación de la cantidad de fibra cruda presente en una muestra se llevó a cabo mediante el proceso de digestión ácida y posteriormente alcalina con el cual se obtuvo fibra cruda y sales. Las sales se eliminaron posteriormente por calcinación.

El procedimiento consiste en pesar de 1 a 2 g de muestra libre de grasa. Transferir una muestra libre de grasa a un vaso de precipitación. Agregar 200 ml de ácido sulfúrico al 1,25 % hirviendo a la muestra. Calentar una hornilla y una vez caliente colocar el vaso de precipitación sobre la misma.

Hervir exactamente por 30 minutos. Filtrar la solución caliente a través del papel de filtro. Lavar con agua hirviendo varias veces con porciones de 50 ml cada vez, hasta que el agua de lavado no tenga reacción ácida. Filtrar con succión.

Regresar el residuo con mucho cuidado a su vaso original utilizando el frasco lavador, conteniendo 200 ml de NaOH al 1,25 % hirviendo. Hervir durante 30 minutos. Retirar de la hornilla y filtrar inmediatamente sobre crisol Gooch. Lavar el residuo con agua hirviendo, hasta la eliminación del hidróxido de sodio en el filtrado. Lavar finalmente con pequeñas porciones de alcohol.

Llevar el residuo a la estufa y secar a 105°C durante 2 horas. Enfriar y pesar. Colocar en la mufla a 500-600 °C hasta que el contenido sea de color blanco (aproximadamente una hora).

Retirar de la mufla, enfriar y pesar.

$$Fibra(\%) = \frac{M_f - M_c}{M_i} \times 100$$

Dónde:

M_f : Masa de la muestra secada, g

M_c : Masa de la muestra calcinada, g

M_i : Masa inicial de la muestra, g

ANEXO 12: Determinación de las mejores condiciones de operación de en el proceso de remoción de hierro.

$$y_1 = f(A, B)$$

$$f(A, B) = 0,728039 - 0,0196415A - 0,00400889B + 0,000235185A^2 + 0,0000333333AB + 0,0000072917B^2$$

Calculamos las derivadas parciales e igualamos a 0 para hallar los puntos críticos:

$$\frac{df(A, B)}{A} = -0,0196415 + 5,5311984225 \times 10^{-8}A + 3,33 \times 10^{-5}B = 0$$

$$\frac{df(A, B)}{B} = -0,00400889 + 3,33 \times 10^{-5}A + 5,316888889 \times 10^{-11}B = 0$$

$$\begin{bmatrix} 5,53 \times 10^{-8} & 3,33 \times 10^{-5} \\ 3,33 \times 10^{-5} & 5,32 \times 10^{-11} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 0,0196415 \\ 0,00400889 \end{pmatrix}$$

Del sistema de ecuaciones:

$$A = 120,2658807$$

$$B = 589,0460679$$

Punto crítico (120, 2658807; 589,0460679)

Calculamos los Hessiano para estudiar si los puntos obtenidos son máximos, mínimos o puntos de silla.

Criterio de la segunda derivada

$$\Delta(f) = \begin{vmatrix} \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dA^2} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dAB} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dAC} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dAD} \\ \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dBA} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dB^2} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dAD} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dAC} \\ \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dCA} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dBA} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dC^2} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dDA} \\ \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dDA} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dAC} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dAB} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dD^2} \end{vmatrix}$$

Si $\Delta_1(f) > 0$, $\Delta_2(f) > 0$, $\Delta_3(f) > 0$ y $\Delta_4(f) > 0$, entonces f posee un mínimo local.

Si $\Delta_1(f) < 0$, $\Delta_2(f) > 0$, $\Delta_3(f) < 0$ y $\Delta_4(f) > 0$, entonces f posee un máximo local.

Si $\Delta_2(f) < 0$, entonces f posee un punto de silla.

$$\Delta_1(f) = \begin{vmatrix} 0,0000000553 & 0,0000333333333333 \\ 0,0000333333 & 0,0000000000531689 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_1(f) = 5,53 \times 10^{-8} > 0$$

$$\Delta_2(f) = \begin{vmatrix} 0,0000000553 & 0,0000333333333333 \\ 0,0000333333 & 0,0000000000531689 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_2(f) = -1,11 \times 10^{-9} < 0$$

ANEXO 13: Determinación de las mejores condiciones de operación en el proceso de remoción de turbidez, teniendo como turbidez inicial de 150 NTU

$$y_1 = f(A, B, C, D)$$

$$f(A, B, C, D) = 25,1092 - 0,243801A - 0,662458B - 0,0964722C - 0,489865D + 0,000177315A^2 + 0,006575AB + 0,00141667AC + 0,00169375AD + 0,00429583B^2 + 0,00005BC + 0,00493125BD - 0,00175741C^2 + 0,0020125CD + 0,00280599D^2$$

Calculamos las derivadas parciales e igualamos a 0 para hallar los puntos críticos:

$$\frac{df(A, B, C, D)}{A} = -0,243801 + 0,00035463A + 0,006575B + 0,00141667C + 0,00169375D = 0$$

$$\frac{df(A, B, C, D)}{B} = -0,662458 + 0,006575A + 0,00859166B + 0,00005C + 0,00493125D = 0$$

$$\frac{df(A, B, C, D)}{C} = -0,0964722 + 0,00141667A + 0,00005B - 0,00351482C + 0,0020125D = 0$$

$$\frac{df(A, B, C, D)}{D} = -0,489865 + 0,00169375A + 0,00493125B + 0,0020125C + 0,00561198D = 0$$

$$\begin{bmatrix} 0,00035463 & 0,006575 & 0,00141667 & 0,00169375 \\ 0,006575 & 0,00859166 & 0,00005 & 0,00493125 \\ 0,00141667 & 0,00005 & -0,00351482 & 0,0020125 \\ 0,00169375 & 0,00493125 & 0,0020125 & 0,00561198 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,243801 \\ 0,662458 \\ 0,0964722 \\ 0,489865 \end{bmatrix}$$

Del sistema de ecuaciones

$$A = 37,80321356$$

$$B = 17,00151273$$

$$C = 19,01924833$$

$$D = 54,12008955$$

Punto crítico (37, 80321356; 17,00151273; 19, 01924833; 54,12008955)

Calculamos los Hessiano para estudiar si los puntos obtenidos son máximos, mínimos o puntos de silla.

Criterio de la segunda derivada

$$\Delta(f) = \begin{vmatrix} \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dA^2} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dAB} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dAC} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dAD} \\ \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dBA} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dB^2} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dAD} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dAC} \\ \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dCA} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dBA} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dC^2} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dDA} \\ \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dDA} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dAC} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dAB} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dD^2} \end{vmatrix}$$

Si $\Delta_1(f) > 0$, $\Delta_2(f) > 0$, $\Delta_3(f) > 0$ y $\Delta_4(f) > 0$, entonces f posee un mínimo local.

Si $\Delta_1(f) < 0$, $\Delta_2(f) > 0$, $\Delta_3(f) < 0$ y $\Delta_4(f) > 0$, entonces f posee un máximo local.

Si $\Delta_2(f) < 0$, entonces f posee un punto de silla.

$$\Delta(f) = \begin{vmatrix} 0,00035463 & 0,006575 & 0,00141667 & 0,00169375 \\ 0,06575 & 0,00859166 & 0,00005 & 0,00493125 \\ 0,00141667 & 0,00005 & -0,00035463 & 0,0020125 \\ 0,00169375 & 0,00493125 & 0,0020125 & 0,00561198 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_1(f) = |0,00035463| = 0,00035463 > 0$$

$$\Delta_2(f) = \begin{vmatrix} 0,00035463 & 0,006575 \\ 0,06575 & 0,00859166 \end{vmatrix} = -4,01838 \times 10^{-5} < 0$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 0,00035463 & 0,006575 & 0,00141667 \\ 0,06575 & 0,00859166 & 0,00005 \\ 0,00141667 & 0,00005 & -0,00035463 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_3 = -4,01838 \times 10^{-5} < 0$$

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} 0,00035463 & 0,006575 & 0,00141667 & 0,00169375 \\ 0,06575 & 0,00859166 & 0,00005 & 0,00493125 \\ 0,00141667 & 0,00005 & -0,00035463 & 0,0020125 \\ 0,00169375 & 0,00493125 & 0,0020125 & 0,00561198 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_4 = 5,3857 \times 10^{-10} > 0$$

ANEXO 14: Determinación de las mejores condiciones de operación en el proceso de remoción de turbidez, teniendo como turbidez inicial de 300 NTU

$$y_1 = f(A, B, C, D)$$

$$f(A, B, C, D) = 20,0334 - 0,122676A - 0,50825B - 0,0302222C - 0,44625D + 0,000548148A^2 + 0,00211667AB - 0,000244444AC + 0,000820833AD + 0,00488333B^2 - 0,00186667BC + 0,0061375BD - 0,00145185C^2 + 0,00175CD + 0,00270208D^2$$

Calculamos las derivadas parciales e igualamos a 0 para hallar los puntos críticos:

$$\frac{df(A, B, C, D)}{A} = -0,122676 + 0,0010963A + 0,00211667B - 0,000244444C + 0,000820833D = 0$$

$$\frac{df(A, B, C, D)}{B} = -0,50825 + 0,00211667A + 0,00976666B - 0,00186667C + 0,0061375D = 0$$

$$\frac{df(A, B, C, D)}{C} = -0,0302222 - 0,000244444A - 0,00186667B - 0,002937C + 0,00175D = 0$$

$$\frac{df(A, B, C, D)}{D} = -0,44625 + 0,000820833A + 0,0061375B + 0,00175C + 0,00540416D = 0$$

$$\begin{bmatrix} 0,0010963 & 0,00211667 & -0,00024444 & 0,000820833 \\ 0,00211667 & 0,00976666 & -0,00186667 & 0,0061375 \\ -0,00024444 & -0,00186667 & -0,002937 & 0,00175 \\ 0,00082083 & 0,0061375 & 0,00175 & 0,00540416 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,122676 \\ 0,50825 \\ 0,0302222 \\ 0,44625 \end{bmatrix}$$

Del sistema de ecuaciones

$$A = 65,2567976$$

$$B = 1,88157138$$

$$C = 21,0450539$$

$$D = 63,7116737$$

Punto crítico (65,2567976; 1,88157138; 21, 0450539; 63,7116737)

Calculamos los Hessiano para estudiar si los puntos obtenidos son máximos, mínimos o puntos de silla.

Criterio de la segunda derivada

$$\Delta(f) = \begin{vmatrix} \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dA^2} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dAB} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dAC} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dAD} \\ \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dBA} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dB^2} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dAD} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dAC} \\ \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dCA} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dBA} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dC^2} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dDA} \\ \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dDA} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dAC} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dAB} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dD^2} \end{vmatrix}$$

Si $\Delta_1(f) > 0$, $\Delta_2(f) > 0$, $\Delta_3(f) > 0$ y $\Delta_4(f) > 0$, entonces f posee un mínimo local.

Si $\Delta_1(f) < 0$, $\Delta_2(f) > 0$, $\Delta_3(f) < 0$ y $\Delta_4(f) > 0$, entonces f posee un máximo local.

Si $\Delta_2(f) < 0$, entonces f posee un punto de silla.

$$\Delta(f) = \begin{vmatrix} 0,0010963 & 0,00211667 & -0,000244444 & 0,000820833 \\ 0,00211667 & 0,00976666 & -0,00186667 & 0,0061375 \\ -0,000244444 & -0,00186667 & -0,002937 & 0,00175 \\ 0,000820833 & 0,0061375 & 0,00175 & 0,00540416 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_1 (f) = |0,0010963| = 0,0010963 > 0$$

$$\Delta_2 (f) = \begin{vmatrix} 0,0010963 & 0,00211667 \\ 0,00211667 & 0,00976666 \end{vmatrix} = 6,229 \times 10^{-6} < 0$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 0,0010963 & 0,00211667 & -0,000244444 \\ 0,00211667 & 0,00976666 & -0,00186667 \\ -0,000244444 & -0,00186667 & -0,002937 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_3 = -2,07603 \times 10^{-8} > 0$$

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} 0,0010963 & 0,00211667 & -0,000244444 & 0,000820833 \\ 0,00211667 & 0,00976666 & -0,00186667 & 0,0061375 \\ -0,000244444 & -0,00186667 & -0,002937 & 0,00175 \\ 0,000820833 & 0,0061375 & 0,00175 & 0,00540416 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_4 = -8,16369 \times 10^{-11} > 0$$

ANEXO 15: Determinación de las mejores condiciones de operación en el proceso de remoción de turbidez, teniendo como turbidez inicial de 400 NTU

$$f(A, B, C, D) = 35,7194 - 0,295213A - 1,02325B - 0,4865C - 0,611979D + 0,00141574A^2 + 0,00293333AB + 0,0022AC + 0,00182083AD + 0,0180417B^2 + 0,000866667BC + 0,0067625BD + 0,00388519C^2 + 0,004075CD + 0,00338698D^2$$

$$\frac{df(A, B, C, D)}{A} = -0,295213 + 0,00283148A + 0,00293333B + 0,0022C + 0,00182083D$$

$$\frac{df(A, B, C, D)}{B} = -1,02325 + 0,00293333A + 0,0360834B + 0,000866667C + 0,0067625D$$

$$\frac{df(A, B, C, D)}{C} = -0,4865 + 0,0022A + 0,000866667B + 0,00777038C + 0,004075D$$

$$\frac{df(A, B, C, D)}{D} = -0,611979D + 0,00182083A + 0,0067625B + 0,004075C + 0,00677396D \dots \dots \dots (10)$$

$$\begin{bmatrix} 0,00283148 & 0,00293333 & 0,0022 & 0,00182083 \\ 0,00293333 & 0,00976666 & 0,000866667 & 0,0067625 \\ 0,0022 & 0,000866667 & 0,00777038 & 0,004075 \\ 0,00182083 & 0,0067625 & 0,004075 & 0,00677396 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,295213 \\ 1,0232 \\ 0,4865 \\ 0,611979 \end{bmatrix}$$

Del sistema de ecuaciones

$$A = 37,4185844$$

$$B = 15,2111985$$

$$C = 23,6353606$$

$$D = 50,8810644$$

Punto crítico (37,4185844; 15,2111985; 23,6353606; 50, 8810644)

Criterio de la segunda derivada

$$\Delta(f) = \begin{vmatrix} \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dA^2} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dAB} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dAC} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dAD} \\ \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dBA} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dB^2} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dAD} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dAC} \\ \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dCA} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dBA} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dC^2} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dDA} \\ \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dDA} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dAC} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dAB} & \frac{d^2 f(A, B, C, D)}{dD^2} \end{vmatrix}$$

Si $\Delta_1(f) > 0$, $\Delta_2(f) > 0$, $\Delta_3(f) > 0$ y $\Delta_4(f) > 0$, entonces f posee un mínimo local.

Si $\Delta_1(f) < 0$, $\Delta_2(f) > 0$, $\Delta_3(f) < 0$ y $\Delta_4(f) > 0$, entonces f posee un máximo local.

Si $\Delta_2(f) < 0$, entonces f posee un punto de silla.

$$\Delta(f) = \begin{vmatrix} 0,00283148 & 0,00293333 & 0,0022 & 0,00182083 \\ 0,00293333 & 0,00976666 & 0,000866667 & 0,0067625 \\ 0,0022 & 0,000866667 & 0,00777038 & 0,004075 \\ 0,00182083 & 0,0067625 & 0,004075 & 0,00677396 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_1(f) = |0,00283148| = 0,00283148 > 0$$

$$\Delta_2(f) = \begin{vmatrix} 0,00283148 & 0,0029333 \\ 0,00211667 & 0,00976666 \end{vmatrix} = 9,3565 \times 10^{-5} < 0$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 0,00283148 & 0,0029333 & 0,0022 \\ 0,00293333 & 0,00976666 & 0,000866667 \\ 0,0022 & 0,000866667 & 0,00777038 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_3 = 5,61451 \times 10^{-7} > 0$$

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} 0,00283148 & 0,00293333 & 0,0022 & 0,00182083 \\ 0,00293333 & 0,00976666 & 0,000866667 & 0,0067625 \\ 0,0022 & 0,000866667 & 0,00777038 & 0,004075 \\ 0,00182083 & 0,0067625 & 0,004075 & 0,00677396 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_4 = 1,97187 \times 10^{-09} > 0$$