

**UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN**  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



*Una Institución Adventista*

**Metodología de superficie de respuesta en la eficiencia de remoción de turbidez de agua empleando almidón de pituca (*colocassia esculenta*) como auxiliar de coagulación.**

Por:

Claudia Elizabeth Huamán Zárate  
Hillary Juliette Jaimes Gutierrez

Asesor:

Dr. Noé Benjamín Pampa Quispe

**Lima, octubre de 2019**

DECLARACION JURADA  
DE AUDITORÍA DEL INFORME DE TESIS

Noé Benjamín Pampa Quispe, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que el presente informe de investigación titulado: "METODOLOGÍA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA EN LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE TURBIDEZ DE AGUA EMPLEANDO ALMIDÓN DE PITUCA (*COLOCASSIA ESCULENTA*) COMO AUXILIAR DE COAGULACIÓN" constituye la memoria que presenta los Bachilleres: Claudia Elizabeth Huaman Zarate y Hillary Juliette Jaimes Gutiérrez para aspirar al título de Profesional de Ingeniero Ambiental, cuya tesis ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en Lima, a los tres días de Octubre del 2019



---

Dr. Noé Benjamín Pampa Quispe

Metodología de superficie de respuesta en la eficiencia de remoción de turbidez de agua empleando almidón de Pituca (*Colocassia esculenta*) como auxiliar de coagulación

# TESIS

Presentada para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental

## JURADO CALIFICADOR



Ph.D Leonor Segunda Bustinza Cabala

Presidente



Mg. Milda Amparo Cruz Huaranga

Secretario



Mg. Joel Hugo Fernández Rojas

Vocal



Mg. Jackson Edgardo Pérez Quispe

Vocal



Dr. Noé Benjamín Pampa Quispe

Asesor

Lima, 30 de septiembre de 2019

## **Dedicatoria**

Con regocijo, dedicamos este trabajo a nuestros padres y hermanas, porque siempre estuvieron a nuestro lado brindándonos apoyo y consejos para hacernos mejores personas y recorrer con ánimo el camino hacia la superación.

## **Agradecimientos**

A Dios, por darnos la vida y la fortaleza para seguir adelante a pesar de las dificultades.

A nuestros padres, por sus consejos y palabras de aliento que nos motivan cada día a crecer como personas y a perseverar para alcanzar nuestras metas.

A nuestras hermanas, por su apoyo, cariño y por acompañarnos en todo momento.

Al Dr. Noé Pampa por el tiempo, dedicación y paciencia en el asesoramiento de este trabajo.

Y a nuestra querida Universidad Peruana Unión, por ser una casa en la que además de conocimientos, aprendimos valores y forjamos buenas amistades.

## ÍNDICE

Dedicatoria .....	iv
Agradecimientos .....	v
Índice de Figuras .....	ix
Índice de Tablas .....	xi
Índice de Ecuaciones.....	xiii
Símbolos usados .....	xv
Resumen.....	xvi
Summary .....	xviii
CAPITULO I.....	20
EL PROBLEMA .....	20
1.1. Identificación y formulación del problema .....	20
1.2. Justificación .....	21
1.4. Objetivos .....	23
1.4.1. Objetivo general.....	23
1.4.2. Objetivos específicos.....	23
CAPITULO II.....	24
REVISIÓN DE LA LITERATURA .....	24
2.1. Antecedentes.....	24
2.2. Marco Teórico.....	26
2.2.1. Agua. ....	26
2.2.2. Calidad de agua.....	27
2.2.3. Procesos de tratamiento de agua.....	27
2.2.4. Turbiedad.....	28
2.2.5. Mecanismo del proceso de tratamiento de agua: coagulación-floculación. ....	28
2.2.5. Coagulación.....	29
2.2.6. Coagulantes.....	32
2.2.7. Coagulantes naturales. ....	33
2.2.8. Polímeros naturales. ....	34
2.2.9. Almidón nativo. ....	35
2.2.10. Almidón de Pituca. ....	37
2.2.11. Extracción del almidón. ....	39

2.2.12. Almidones como ayudantes en el proceso de coagulación. ....	40
2.2.13. Almidón de pituca en el proceso de coagulación y floculación. ....	41
2.2.14. Ventajas del uso de almidón y otros coagulantes naturales. ....	42
2.2.15. Factores que influyen en el proceso de coagulación. ....	43
2.2.16. Factores que influyen en el proceso de floculación. ....	49
2.2.17. Metodología de Superficie de respuesta. ....	52
2.2.18. Gráfica de contornos. ....	54
2.2.19. Región experimental. ....	54
CAPITULO III.....	55
MATERIAL Y MÉTODOS .....	55
3.1. Lugar de ejecución.....	55
3.2. Materiales e insumos .....	55
3.2.1. Materia prima.....	55
3.3. Métodos.....	57
3.3.1. Procedimiento de extracción del almidón de pituca ( <i>Colocassia Esculenta</i> ).....	57
3.3.2. Análisis de propiedades tecno funcionales y fisicoquímicos del almidón.....	63
3.3.3. Procedimiento de preparación de las muestras.....	65
3.3.4. Métodos de evaluación en la prueba de Jarras.....	66
3.3.5. Diseño experimental y análisis estadístico.....	67
3.3.5.2. Superficie de respuesta por diseño compuesto central rotacional.....	70
3.3.6. Análisis estadísticos.....	73
CAPITULO IV .....	75
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	75
4.1. Resultados de las propiedades tecnofuncionales y fisicoquímica del almidón .....	75
4.2. Resultados de cuantificación de turbiedad por factorial al azar .....	77
4.3 Análisis Costo – Beneficio .....	79
4.4. Resultados para la cuantificación de turbiedad .....	81
4.5. Superficie de respuesta para la cuantificación de la turbidez .....	86
4.6. Resultados para la remoción de la turbidez .....	91
4.7. Superficie de respuesta para la remoción de la turbidez .....	94
4.5.2. Predicciones para la remoción de turbidez.....	97
4.8 Resultados de pH post tratamiento .....	100
4.8. Superficie de respuesta para el potencial de hidrógeno .....	103

CAPITULO V .....	108
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	108
5.1 Conclusiones .....	108
5.2 Recomendaciones .....	110
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	111
ANEXOS.....	120
<i>Anexo 1</i> – Ensayo de prueba de jarras .....	120
<i>Anexo 2</i> – Fichas Técnicas de equipos.....	122
<i>Anexo 3</i> - Hoja de seguridad del sulfato de aluminio.....	128



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de tratamiento de aguas convencional.....	28
Figura 2. Fases de polímeros en el proceso de coagulación.....	30
Figura 3. Mecanismo de acción del coagulante. ....	31
Figura 4. Mecanismo de acción del ayudante de coagulación. ....	31
Figura 5. Mecanismo de acción del ayudante de floculación.....	32
Figura 6. Estructura química de la amilosa y amilopectina.....	36
Figura 7. Figura referencial de la Pituca.....	38
<i>Figura 8.</i> Proceso de extracción por vía húmeda. ....	39
Figura 9. Mecanismo de enlace del coagulante químico $AlSO_4$ .....	47
Figura 10. Funcionamiento reactivo de las partículas coloidales.....	47
Figura 11. Funcionamiento reactivo de las partículas coloidales.....	48
Figura 12. Fuerza de repulsión y atracción. ....	49
Figura 13. Equipo de prueba de jarras.....	52
Figura 14. Superficie de respuesta en dos dimensiones .....	53
Figura 15. Superficie de respuesta tridimensional.....	53
Figura 16. Gráfica de contornos.....	54
Figura 17. Materia prima de estudio: Pituca.....	55
Figura 18. Pituca después de lavar y limpiar la parte externa. ....	58
Figura 19. Descascarado de pituca.....	58
Figura 20. Pituca cortada en trozos pequeños.....	59
Figura 21. Lechada de almidón de pituca con espuma en la superficie.....	60
Figura 22. Vasos precipitados con lechada de almidón de pituca antes de sedimentar. .60	
Figura 23. Material acuoso de almidón de pituca luego de sedimentar. ....	60

Figura 24. Material acuoso de almidón de pituca en el equipo de centrifuga. ....	61
Figura 25. Material acuoso de almidón de pituca en la estufa. ....	61
Figura 26. Material acuoso de almidón de pituca en la estufa. ....	62
Figura 27. Tamizado del almidón de pituca para el pesado. ....	62
Figura 28. Preparación de la solución de almidón de pituca y de sulfato de aluminio. ....	65
Figura 29. Método WRA. ....	69
Figura 30. Medición de pH en agua patrón y Jar Test aplicando las variables independientes. ....	70
Figura 31. Determinación de dosis óptima del sulfato de aluminio. ....	79
Figura 32. Diagrama de Pareto para la cuantificación de turbidez (UNT) ....	85
Figura 33. Superficie de respuesta para la Cuantificación de la turbidez, a) dosis de almidón y velocidad, b) velocidad y pH, c) pH y dosis de almidón. ....	86
Figura 34. Superficie de respuesta para la Cuantificación de la turbidez, a) dosis de almidón y velocidad, b) velocidad y pH, c) pH y dosis de almidón. ....	95
Figura 35. Diagrama de Pareto para el potencial de hidrógeno post – tratamiento. ....	102
Figura 36. Superficie de respuesta para el pH post tratamiento, a) dosis de almidón y velocidad, b) velocidad y pH, c) pH y dosis de almidón. ....	104

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Metodologías de análisis físico-químico del almidón</i> .....	37
Tabla 2. <i>Comparación de parámetros obtenidos mediante extracción vía seca y húmeda</i> .....	40
Tabla 3. <i>Tiempo de sedimentación de partículas orgánicas e inorgánicas</i> .....	44
Tabla 4. <i>Condiciones de temperatura según la zona de estudio</i> .....	50
Tabla 5. <i>Materiales necesarios en la prueba experimental. Lugar: Laboratorio CITAL</i> .....	53
Tabla 6. <i>Materiales utilizados en la prueba experimental – Lugar: Laboratorio Ambiental</i> .....	54
Tabla 7. <i>Número e índice de floculación de Willcomb</i> .....	63
Tabla 8. <i>Valores de Concentración, Dosis y Volumen del coagulante a emplear en cada jarra para factorial al azar</i> .....	685
Tabla 9. <i>Metodología de trabajo en la Prueba de Jarras: Velocidad y tiempo en cada etapa</i> .....	685
Tabla 10. <i>Niveles y parámetros de DCCR del proceso de coagulación/floculación</i> .....	68
Tabla 11. <i>Variables codificadas, no codificadas y variables dependientes del diseño DCCR en el proceso de coagulación y floculación</i> .....	69
Tabla 12. <i>Propiedades tecnofuncionales y fisicoquímicas del almidón de pituca</i> .....	72
Tabla 13. <i>Resultados de ensayo de laboratorio de dosis óptima del coagulante químico Sulfato de Aluminio – Tipo A</i> .....	75
Tabla 14. <i>Variables codificadas, no codificadas y variables dependientes del DCCR en el proceso de coagulación y floculación</i> .....	78
Tabla 15. a) <i>Análisis de varianza (ANOVA) para la cuantificación de turbidez para DCCR b) Prueba de Fisher para la predicción del modelo en la reducción de la turbidez</i> .....	81
Tabla 16. <i>Coeficientes del modelo polinomial para la cuantificación de la turbidez</i> .....	85
Tabla 17. <i>Tabla de factores y valores optimizados para la predicción</i> .....	86

Tabla 18. Factores de coeficientes para la prediccion de cuantificación de turbidez.....	87
Tabla 19. Variables codificadas,no codificadas y variables dependientes de la remoción de turbidez.....	88
Tabla 20. a) Análisis de varianza (ANOVA) para la remoción de turbidez para DCCR b)Análisis de varianza (ANOVA) y prueba de Fisher para la predicción del modelo .....	89
Tabla 21. Coeficientes del modelo polinomial para la remoción de turbidez.....	923
Tabla 22. Tabla de factores y valores optimizados para la prediccion para la remoción de la turbidez.....	95
Tabla 23. Factores y coeficientes para la prediccion de remoción de la turbidez .....	985
Tabla 24. Resultados de pH post tratamiento para el diseño central compuesto Rotacional ...	97
Tabla 25. a) Análisis de varianza (ANOVA) para el potencial de hidrógeno post tratamiento b) Prueba de fisher para la predicción del mdelo para la remoción de turbidez.....	98
Tabla 26. Coeficiente de modelo polinomial para el pH post-tratamiento de la turbidez.....	103
Tabla 27. Factores y valores optimizados para el pH post-tratamiento.....	104
Tabla 28. Factores y coeficientes para la predicción de pH post-tratamiento.....	105

## INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Índice de solubilidad.....	63
Ecuación 2. Formula de poder de hinchamiento.....	63
Ecuación 3. Formula de obtención del índice de adsorción de agua. ....	64
Ecuación 4. Formula de obtención de Humedad .....	64
Ecuación 5. Determinación de dosis de sulfato de aluminio .....	67
Ecuación 6. Ecuación polinomial para la obtención del modelo matemático .....	71
Ecuación 7. Ecuación polinomial de los factores de variable de mezcla y dosis de almidón para la cuantificación de turbidez. ....	88
Ecuación 8. Ecuación polinomial de los factores de variable de mezcla y pH para la cuantificación de turbidez.....	89
Ecuación 9. Ecuación polinomial de los factores de variable de dosis de almidón y pH para la cuantificación de turbidez. ....	89
Ecuación 10. Ecuación polinomial global para la predicción de la reducción de la turbidez .....	91
Ecuación 11. Ecuación polinomial de los factores de las variables de velocidad de mezcla y dosis de almidón para la remoción de turbidez. ....	97
Ecuación 12. Ecuación polinomial de los factores de las variables de velocidad de mezcla y pH para la remoción de turbidez.....	97
Ecuación 13. Ecuación polinomial de los factores de las variables de dosis de almidón y pH para la remoción de turbidez.....	97
Ecuación 14. Ecuación polinomial global para la predicción de la remoción de la turbidez. ....	99

Ecuación 15. Ecuación polinomial de los factores de las variables de velocidad de mezcla y dosis de almidón para la cuantificación de pH post tratamiento.....	105
Ecuación 16. Ecuación polinomial de los factores de las variables de velocidad de mezcla y pH para la cuantificación de pH post tratamiento. ....	105
Ecuación 17. Ecuación polinomial de los factores de las variables de pH y dosis de almidón para la cuantificación de pH post tratamiento.....	106
Ecuación 18. Ecuación polinomial global para la predicción del pH postratamiento.....	107

## SÍMBOLOS USADOS

**UNT:** Unidad nefelométrica de turbidez

**L:** Litro

**mg:** Miligramos

**µm:** Micra

**Mg/L:** Miligramos por litro

**RPM:** Revoluciones por minuto

**CF:** Coagulación y floculación

**Vol.:** Volumen

**Vel:** Velocidad

**S<sup>-1</sup>:** Por segundo

**pH:** Potencial de hidrógeno

**PHA:** Poder de hinchamiento en Agua

**ISA:** Índice de solubilidad de agua

**IAA:** Índice de absorción de agua

**FAO:** Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

**CEPIS:** Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente

**OMS:** Organización Mundial de la Salud

**AOAC:** Asociación Oficial de Químicos Agrícolas

**DCCR:** Diseño compuesto central rotacional

**MSR:** Metodología de Superficie de Respuesta.

## RESUMEN

La búsqueda de nuevas alternativas para mejorar la calidad de agua que sean amigables con el ambiente y no presenten riesgos a la salud de los consumidores, ha promovido el empleo de polímeros naturales como los almidones. Esta investigación tiene como objetivo evaluar la eficiencia de remoción de turbidez de agua empleando el almidón de pituca (*Colocassia esculenta*) mediante la aplicación de la metodología de superficie de respuesta (MSR).

La obtención del almidón fue por el método de extracción húmeda propuesto por la FAO (2007), y se caracterizaron sus propiedades tecno funcionales y fisicoquímicas. Se determinó la dosis óptima del sulfato de aluminio por el *Jar Test* de acuerdo a metodología del CEPIS con el fin de determinar las proporciones de la mezcla de sulfato y almidón. Las variables de estudio fueron la velocidad de mezcla lenta, el pH y la dosis de almidón de pituca; se aplicó el diseño de experimentos DCCR, con un total de 17 experimentos y sus réplicas.

Los resultados de la caracterización mostraron que el contenido de amilosa fue de  $26.75 \pm 0.3\%$ , el PHA de  $11.64 \pm 0.79\%$ , el ISA fue de  $9.08 \pm 0.75$ , el IAA fue de  $3.12 \pm 0.42\text{g/gel almidón}$ , el contenido de humedad fue de  $11.10 \pm 1.12\%$ , el porcentaje de humedad fue de  $10.31\%$  y la actividad de agua fue de  $0.59$ , indicando que las propiedades tecnofuncionales y fisicoquímicas del almidón de pituca empleado se encuentran dentro de los valores normales y propicios para su actividad como auxiliar de coagulación.

Se demostró la eficiencia del polímero natural al obtener una remoción de turbidez entre  $88.30\%$  y  $99.33\%$ , la remoción máxima se logró en una relación inversamente proporcional con la acidez y directamente proporcional con la velocidad de mezcla lenta.



Además, se consiguió una cuantificación de turbidez mínima de 2.7UNT y máxima de 45UNT para una muestra inicial de  $400\pm 10$ UNT. El pH de la muestra no fue alterado significativamente por el proceso, dado que presentó valores casi similares de inicio a fin, sin embargo, fue el parámetro de mayor influencia en la remoción.

Los parámetros optimizados predichos por la MSR fueron: 46RPM para velocidad de mezcla lenta, 50% de dosis de almidón y una muestra de agua con pH de 8; que resultarían en una cuantificación de turbidez de 0.5UNT, una remoción de turbidez de 100% y pH post tratamiento de 7.2.

**Palabras Clave:** Almidón, pituca, coagulación, floculación, sulfato de aluminio, superficies de respuesta.

## SUMMARY

The search for new alternatives to improve the quality of water that are friendly to the environment and do not present risks to the health of consumers, has promoted the use of natural polymers such as starches. This research aims to evaluate the efficiency of water turbidity removal using pituca starch (*Colocassia esculenta*) by applying the response surface methodology (RSM).

The starch was obtained by the wet extraction method proposed by FAO (2007), and its techno-functional and physicochemical properties were characterized. The optimum dose of aluminum sulfate was determined by the Jar Test according to CEPIS methodology in order to determine the proportions of the sulfate and starch mixture. The study variables were the slow mixing speed, the pH and the dose of pituca starch; The design of DCCR experiments was applied, with a total of 17 experiments and their replicas.

The characterization results showed that the amylose content was  $26.75 \pm 0.3\%$ , the PHA was  $11.64 \pm 0.79\%$ , the ISA was  $9.08 \pm 0.75$ , the IAA was  $3.12 \pm 0.42\text{g} / \text{starch gel}$ , the moisture content It was  $11.10 \pm 1.12\%$ , the humidity percentage was  $10.31\%$  and the water activity was  $0.59$ , indicating that the technological and physicochemical properties of the pituca starch used are within normal values and conducive to its activity as auxiliary of coagulation.

The efficiency of the natural polymer was demonstrated by obtaining a turbidity removal between  $88.30\%$  and  $99.33\%$ , the maximum removal was achieved in an inversely proportional relationship with the acidity and directly proportional with the slow mixing speed. In addition, a minimum turbidity quantification of  $2.7\text{UNT}$  and a maximum of  $45\text{UNT}$  was achieved for an initial sample of  $400 \pm 10\text{UNT}$ . The pH of the sample was not

significantly altered by the process, since it presented almost similar values from start to finish, however, it was the parameter with the greatest influence on removal.

The optimized parameters predicted by the MSR were: 46RPM for slow mixing speed, 50% starch dose and a water sample with pH of 8; which would result in a turbidity quantification of 0.5UNT, a turbidity removal of 100% and post treatment pH of 7.2.

**Keywords:** starch, coagulation, flocculation, aluminum sulfate, response surfaces.

## **CAPITULO I**

### **EL PROBLEMA**

#### **1.1. Identificación y formulación del problema**

La salubridad y la calidad del agua son fundamentales para el desarrollo y el bienestar humano, de modo que, proveer acceso a agua salubre es uno de las medidas más eficaces para promover la salud y disminuir la pobreza (OMS, 2017).

Los procesos tecnológicos de coagulación y floculación (CF) son primordiales en una planta de tratamiento de agua potable, pues de ellos depende la claridad del agua, característica fundamental en términos de calidad del agua para el consumo humano.

La remoción de turbiedad se consigue por la aglomeración de partículas en suspensión, responsables de la turbiedad del agua y el color, a través de la acción de un agente coagulante que se encarga de neutralizar las cargas electrostáticas de las partículas para lograr la formación de flóculos, incrementando el peso específico de las partículas, y a su vez, aumenta la velocidad de sedimentación y permite la clarificación del agua (López, Laines, Hernández y Aparicio, 2014).

A pesar que no se han reportado efectos directos de la turbiedad del agua en la salud del consumidor, Castro (1987) menciona que la presencia de turbiedad reduce la eficiencia del proceso de desinfección, debido a que los sólidos suspendidos y partículas coloidales actúan como barrera protectora que impide el contacto directo entre los microorganismos y el desinfectante.

Las plantas de tratamiento de agua convencionales, por lo general, utilizan como coagulantes las sales de aluminio o el hierro, no obstante, el uso de coagulantes de origen sintético, tal como el sulfato de aluminio (Campos et al., 2003), es cuestionado debido a los efectos ambientales negativos que produce, principalmente por la generación de lodos no biodegradables y que no pueden ser empleados para la agricultura debido a su toxicidad (Christopher et al., 1995); el empeoramiento de enfermedades neurodegenerativas

(Becaria et al., 2006) y su posible relación con el cáncer (Medina et al., 2006).

González (1991) menciona que el aluminio remanente en las aguas tratadas pone en riesgo la salud pública debido a que en grandes concentraciones puede ser causante de la enfermedad del Alzheimer. Se tiene como referencia varios estudios médicos realizados en Inglaterra, donde se ha encontrado que el riesgo de contraer esta enfermedad es 1,5 veces mayor en aquellas ciudades donde las concentraciones de aluminio en el agua exceden los 0,110 mg/l.

Debido a lo expuesto, existe una demanda cada vez mayor por tecnologías amigables con el ambiente y que no presenten riesgos a la salud de los consumidores, ha despertado el interés científico sobre el estudio de polímeros naturales con el objetivo de sustituir o reducir el empleo de agentes sintéticos en los procesos de potabilización del agua (Bratskaya et al., 2004).

## **1.2. Justificación**

El Perú es un país que contiene una gran biodiversidad en su flora y fauna, y cuenta con una amplia variedad de compuestos orgánicos que pueden ser empleados para la potabilización de agua, sin embargo, no se han profundizado muchos estudios al respecto.

El almidón de pituca ha sido poco estudiado para fines de tratamiento de agua a nivel mundial, mientras que a nivel nacional son pocas las investigaciones realizadas sobre su aplicación en el tratamiento de aguas, y dadas sus características fisicoquímicas, este polímero presenta un alto potencial para su uso como ayudante de coagulación (Páez y Peña, 2015). Laines (2008), expone que el uso de mezclas de almidón natural y coagulante sintético es una buena opción para reducir el empleo de polímeros inorgánicos usados como auxiliares de coagulación y floculación.

Además, el uso de polímeros inorgánicos como el sulfato de aluminio implican elevados costos para países que están en vías de desarrollo, como los países de

Latinoamérica (Laines, 2008). Por tanto, el empleo de polímeros naturales en el tratamiento de agua representaría un beneficio económico para las plantas de tratamiento, porque reducirían el uso de los coagulantes sintéticos.

Por otro lado, la necesidad creciente de optimizar procesos, mejorar la calidad del producto final (agua de calidad), minimizar costos y tiempo, y maximizar rendimiento, ha motivado a industrias e investigadores académicos a la búsqueda de técnicas de diseños de experimentos por Metodología de la Superficie de Respuesta (MSR), que es un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas utilizadas para modelar y analizar problemas en los que una variable de interés es influenciada por otras.

El propósito inicial de estas técnicas es diseñar un experimento que proporcione valores razonables de la variable respuesta y, determinar el modelo matemático que mejor se ajusta a los datos obtenidos. El objetivo final es establecer los valores de los factores que optimizan el valor de la variable respuesta. Esto se logra al determinar las condiciones óptimas de operación del sistema (Kuehl, 2001 y Rodrigues Lema, 2012).

Asimismo, los efectos negativos al ambiente y los riesgos a la salud asociados al consumo de agua tratada con sulfato de aluminio en las plantas de tratamiento de agua convencionales, han generado un interés cada vez mayor por investigar nuevos coagulantes alternativos que reemplacen o disminuyan el uso de los coagulantes actuales en el proceso de coagulación y floculación. Por estas razones, se justifica la importancia de realizar investigaciones como la presente.

### **1.3. Presuposición filosófica**

El hombre se encuentra inmerso en una sociedad que observa pasivamente la destrucción del planeta y de los seres que en él habitan, incluyéndose.

Desde su creación, el ser humano ha buscado satisfacer sus necesidades y a lo largo de esa búsqueda ha conseguido deteriorar los recursos que le fueron dados para su

deleite y racional aprovechamiento, creyendo que los recursos son inagotables y que muchas veces es mejor priorizar ganancias económicas a la responsabilidad ambiental.

Aunque parezca demasiado tarde para intentar revertir la inminente contaminación ambiental, lo peor que se puede hacer es no hacer nada.

#### **1.4. Objetivos**

##### **1.4.1. Objetivo general.**

Evaluar la eficiencia de remoción de turbidez de agua empleando el almidón de pituca (*Colocassia esculenta*) mediante la aplicación de la metodología de superficie de respuesta (MSR).

##### **1.4.2. Objetivos específicos.**

Caracterizar las propiedades tecno funcionales y fisicoquímicas del almidón de pituca (*Colocasia esculenta*) por tecnología de molienda húmeda.

Determinar la dosis óptima de sulfato de aluminio (tipo A) mediante el *Jar Test* y definir las proporciones de la mezcla almidón:sulfato por el diseño factorial al azar.

Evaluar los parámetros de cuantificación de turbidez, remoción de turbidez y pH mediante el *Jar Test* empleando diseño de experimentos de Diseño Central Compuesto Rotacional.

Predecir los parámetros optimizados en la eficiencia de remoción de turbidez de agua por superficie de respuesta.

## CAPITULO II

### REVISIÓN DE LA LITERATURA

#### 2.1. Antecedentes

Diversos estudios realizados a nivel latinoamericano han demostrado la eficiencia de la aplicación de diversos polímeros naturales en los tratamientos de agua para remoción de turbidez, garantizando y evaluando las condiciones óptimas para consumo humano.

Rodríguez, Lugo, Rojas y Malaver (2007) propusieron la utilización de almidón de yuca y maíz junto con el sulfato de aluminio tipo B y un polielectrolito comercial. Para ello tomaron como fuente al agua proveniente de las quebradas “Las Delicias en Bogotá”. Esta fuente se caracteriza por tener un promedio de turbiedad entre 175-5UNT, un color entre 70-5UTC y un pH entre 5.4 y 0.5. Se realizó una simulación mediante el *Jar Test* durante todo un mes con una solución patrón de sulfato de aluminio al 1% y de los almidones al 0.5%. Los resultados de las mezclas de sulfato-maíz, polielectrolito-maíz; sulfato-yuca, poli electrolito-yuca demostraron un rendimiento eficiente en la remoción de turbidez, sin embargo, la combinación polielectrolito-maíz logró una mayor eficiencia en la remoción (1UNT, 10UPC, 4 pH) en comparación con el sulfato – yuca (1UNT, 25UPC, 5.38 pH). Los autores concluyeron que el almidón de maíz usado en plantas potabilizadoras mejora la calidad del agua debido al incremento la velocidad de sedimentación producida en la coagulación que reduce el volumen de lodos generados en el proceso disminuyendo a su vez los costos.

Solís, Laines y Hernández (2012) probaron el potencial de coagulación-floculación mediante la mezcla de un polímero natural a base de almidón de yuca (*Manihot esculenta*) con sulfato de aluminio en una muestra de agua superficial de la provincia de Tabasco, México. Los parámetros físicos a evaluar fueron la turbidez (70UNT), temperatura (27°C), pH (6.9) y color (85UC). Se extrajo el almidón de yuca por medio del método de Aparicio y



se obtuvo una dosis óptima del sulfato de aluminio al 2%, es decir 30mg/L. Se realizó proporciones sulfato–almidón de yuca 2:28, 4:26, 6:24, 8:22, 10:20 y 12:12mg/L. Los resultados de mayor rendimiento se dieron en la proporción 2:28mg/L sulfato-yuca y 30mg/L sulfato puro obteniendo una eficiencia de remoción de turbiedad de 97.9% y 98.7%, el pH más óptimo se dio en la dosis de 30mg/L sulfato de aluminio de 6.9 a 6.3 y la remoción de color se dio de 81.7% en la dosis de sulfato de aluminio y de 91.6% en la dosis 2:28mg/L yuca-sulfato. Los autores concluyeron que el aporte del almidón de yuca es efectivo debido a que reduce el uso de sulfato de aluminio y por tanto disminuye la generación DQO y COT de los lodos residuales.

López, Laines, Hernández y Aparicio (2014), en su estudio “Evaluación de almidones de malanga (*Colocassia esculenta*) como agente coadyuvantes en la remoción de turbiedad en procesos de potabilización de agua” evaluaron la eficiencia de remoción de turbiedad y color a una muestra patrón de 400UNT mediante la aplicación de tres tipos de almidones de Malanga (*Colocassia esculenta*) fisicoquímicamente modificados a partir de almidón nativo (fosfatado, entrecruzado y pregelatinizado) concluyendo que no existe diferencia significativa entre el empleo de almidones modificados y nativos, logrando una eficiencia de remoción del 95% utilizando 15mg/L de almidón nativo y 35mg/L de  $Al_2(SO_4)_3$ . Asimismo, su remoción máxima de color fue de 99.2% dosificando a 25mg/L de almidón de fosfato con 25mg/L de sulfato.

Mozcoso (2015) determinó en su estudio sobre el empleo de almidón de yuca sustituyendo al sulfato de aluminio en el proceso tecnológico de coagulación y floculación, obteniendo que el almidón de yuca podría llegar a suplir al coagulante químico hasta en un 60% de su dosis óptima y lograr valores de turbidez menores a cinco unidades nefelométricas.

Trujillo, Duque, Arcila, Rincón, Pacheco y Herrera (2014) demostraron la efectividad del almidón de plátano como ayudante de floculación en el proceso de coagulación y

floculación en el tratamiento de agua procedente de una fuente natural, a un 50% de sulfato de aluminio y 50% de almidón de banana, en comparación con la mezcla compuesta por un 20% y 80% de sulfato- almidón, respectivamente, con lo cual se infiere que hay menor garantía de remoción de turbiedad a un porcentaje muy bajo de sulfato de aluminio. Asimismo, se obtuvo mayor eficiencia a un pH de 5 con lo que concluyó que la adsorción del almidón es mucho mejor a bajos niveles de pH, debido a que el almidón generalmente tiene carga negativa, mientras que el pH bajo involucra carga positiva de los sitios superficiales, favoreciendo así la adsorción del almidón. Mientras que, a pH elevados se degrada la adsorción del almidón, porque presenta carga negativa en los sitios superficiales, lo cual fue comprobado en el trabajo de Arol y Dogu (2004), donde se demostró que en el rango de 3 a 6, la adsorción del almidón es la más óptima y mejora aún más cuando se toman valores de pH menores pues en el estudio se obtuvo la mejor adsorción a un pH de 3.

## **2.2. Marco Teórico**

### **2.2.1. Agua.**

Según Pérez, Delgado y Torres (2012) indica que el agua es fuente vital para la vida, la conservación de ecosistemas y su biodiversidad; su empleo como recurso esencial para el consumo humano es orientado para la calidad de vida y protección de la salud.

El 97% de la envoltura terrestre está cubierta por agua y menos del 0.3% es apta para el consumo humano debido a que en gran medida se ubican en los casquetes polares (Convenio de diversidad biológica, 2010). Por tanto, el agua constituye un recurso natural limitante para el consumo (Matiz L, 2008) y debido a su proceso natural y manipulación indiscriminada genera alteraciones que provoca la inclusión de sustancias orgánicas y biodegradables o inorgánicas y biorresistentes, de manera disuelta o en suspensión (Feléz, 2004).

### **2.2.2. Calidad de agua.**

Calidad de agua se refiere a las características químicas, físicas, biológicas y radiológicas del agua que dan lugar a una condición de inocuidad, es decir, no implica riesgo o daño en la salud del ser vivo (Solsona, 1999). La utilización de tecnologías que, a través de metodologías de buenas prácticas operativas, de mantenimiento, de protección de la fuente, de tratamiento y su distribución, propician brindar una calidad de agua sin algún riesgo a transmitir enfermedades u agentes patógenos (Vargas, Rojas y Joseli, 2004).

La Organización Mundial de la Salud (1995) explica que estos agentes patógenos propalados por el agua crean un severo problema mundial que demanda un apremiante control por medio de medidas de protección y control ambiental con el fin de prevenir el aumento de enfermedades relacionadas con la calidad del agua.

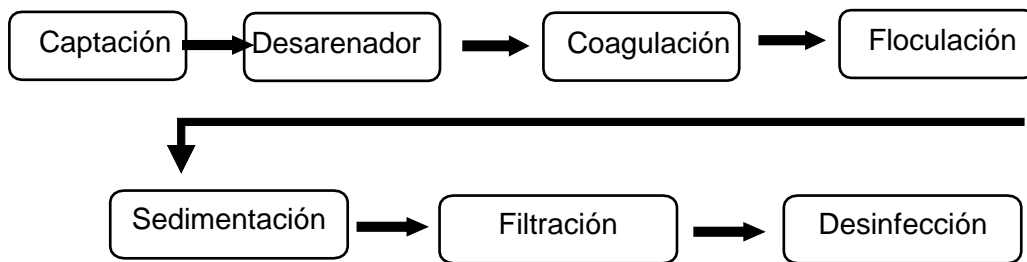
Dado el acontecimiento, se instauró normas de calidad del agua para consumo con el objetivo central de eliminar y/o reducir los parámetros principales que no atribuyen a lograr una calidad de agua apta (turbiedad, color, pH, parásitos presentes) y se encuentren por debajo de los niveles perjudiciales a la salud. Por ello, para lograr un agua con calidad de consumo, se necesita aplicar un proceso de potabilización que beneficie en la mejora del sistema de tratamiento y distribución de servicio de agua potable (Vargas, Rojas y Joseli, 2004). Cabe resaltar que los métodos de tratamiento varían según el desarrollo del país o región (CIPA, 2010).

### **2.2.3. Procesos de tratamiento de agua.**

Leal (2005) describe que existen tratamientos físicos, químicos, biológicos para promover un agua de calidad. Cada tratamiento posee limitaciones y ventajas lo que define sus campos de aplicación.

Las plantas de tratamiento convencional realizan tratamiento integrado el cual tiene finalidad principal de eliminar agentes patógenos, sustancias químicas u otro componente

nocivo. A continuación, en la *Figura 1* se presenta un esquema de tratamiento convencional (Castañeda, 2015).



*Figura 1.* Proceso de tratamiento de aguas convencional (Castañeda, 2015).

#### **2.2.4. Turbiedad**

Es una expresión de la propiedad o efecto óptico causado por la dispersión, interferencia o suspensión de los rayos luminosos que pasan a través de una muestra de agua la cual posee partículas en suspensión tales como arcilla, minerales (cloruros, sulfatos, nitratos de sodio, potasio, etc.) sedimentos, materia orgánica e inorgánica causantes de la turbiedad; estas pueden ser de forma coloidal o material insoluble (Barrenechea, 2009).

#### **2.2.5. Mecanismo del proceso de tratamiento de agua: coagulación-floculación.**

En el proceso de coagulación y floculación, las partículas se agrupan en pequeños conjuntos de masa, superior al del agua, llamadas flóculos. Depende de las características orgánicas e inorgánicas pueden ser removidas totalmente del agua dado que a mayor concentración de materia, mayor es la turbiedad que presenta el cuerpo de agua, por tanto, no puede sedimentar a una velocidad rápida; El proceso de coagulación-floculación remueve el color característico de los flóculos; elimina los virus, bacterias y organismos patógenos susceptibles, y elimina las sustancias que originan el sabor agrio y olor (Arboleda, 1992).

La coagulación es un proceso tecnológico esencial en todo tratamiento de agua destinado al consumo humano. Ayuda a generar el potencial repulsivo de la doble capa eléctrica propio del coloide hasta lograr su reducción total, de modo, que se pueden producir micro-partículas, las cuales tienen contacto constante y generan un aspecto más grande, llamados flóculos que seguidamente, en el proceso de floculación, logra sedimentarse a un tiempo determinado logrando clarificar el agua (Matilainen *et al.*, 2010).

La remoción de turbidez dado en plantas de tratamiento de agua potable implica la exclusión de impurezas, las cuales se caracterizan de poseer una carga negativa a niveles de pH natural y provocar la formación de una dispersión estabilizada. Estudios realizados por Miller *et al.* (2008) y Bolto y Gregory (2007) señalan que las partículas coloidales pueden situarse en una solución, a través de cuatro mecanismos básicos: 1) la compresión de la doble capa; 2) coagulación por barrido; 3) adsorción y neutralización de carga; 4) adsorción y unión entre partículas. Los autores señalan que los coagulantes de origen polimérico están asociados a los mecanismos (3) y (4), ya que presentan combinaciones de cadenas largas, incrementando de esta manera, el número de espacios de adsorción desocupados. De igual manera, los autores Campos y Di Bernando (1991) señalan que estos dos mecanismos de proceso aportan los principios elementales del funcionamiento central de los coagulantes vegetales.

### **2.2.5. Coagulación.**

La noción de coagulación surgió en el año de 1844, con fines de mejorar el aspecto visual del agua apta para consumo (Martins, 2014). A mediados del siglo XIX se dio mayor énfasis, pues se descubrió una correlación directa entre las partículas sedimentables y patógenos con la transmisión de enfermedades por contacto con aguas contaminadas (Libânio, 2010; citado por Martins, 2014).

La coagulación abarca el decrecimiento o neutralización de las cargas eléctricas de las partículas suspendidas mediante el potencial zeta. Esta neutralización causa repelamiento entre ellas (Ebeling, Welsh, Rishel, 2005).

Las fases de coagulación se encuentran definidas en varias etapas:

1. Fase de mezcla de los polímeros que se distribuyen en la suspensión de manera uniforme y rápida
2. Fase de Hidrólisis de los iones metálicos multivalentes y su consecuente polimerización hasta llegar a especies hidrolíticas multinucleadas.
3. Fase de Adición de polímeros en la cual se precipitan y polimerizan los compuestos químicos
4. Fase de Adsorción de las especies hidrolíticas en la interfaz de la solución sólida para lograr la desestabilización del coloide.
5. Aglomeración de las partículas desestabilizadas mediante un puente entre las partículas que involucra el transporte de estas y las interacciones químicas
6. Aglomeración de las partículas desestabilizadas mediante el transporte de las mismas y las fuerzas de Van der Walls.
7. Formación de los flóculos
8. Precipitación del hidróxido metálico.

Estas etapas ocurren secuencialmente, como parcialmente e incluso simultáneamente, en la figura 2 se logra apreciar el proceso de forma esquemática.

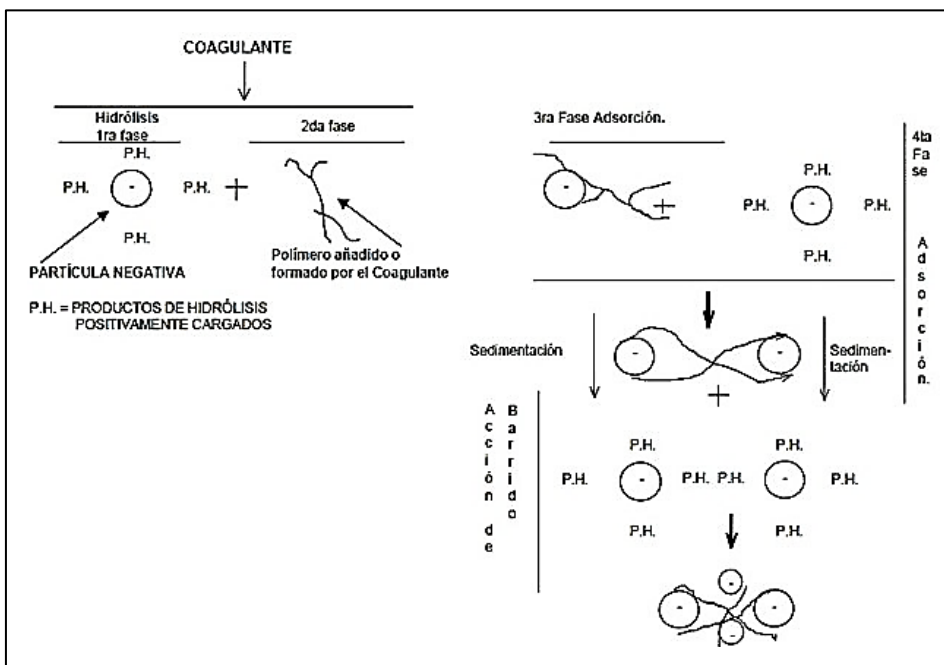
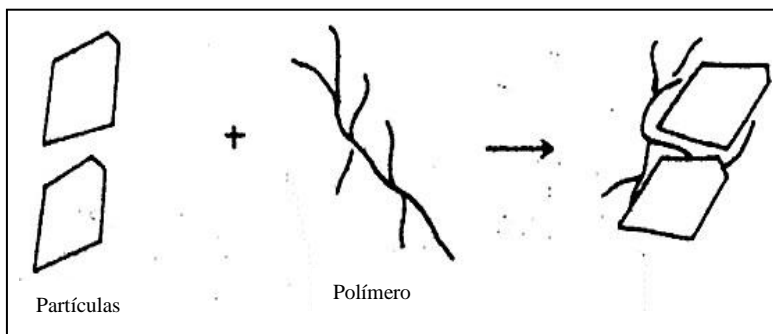
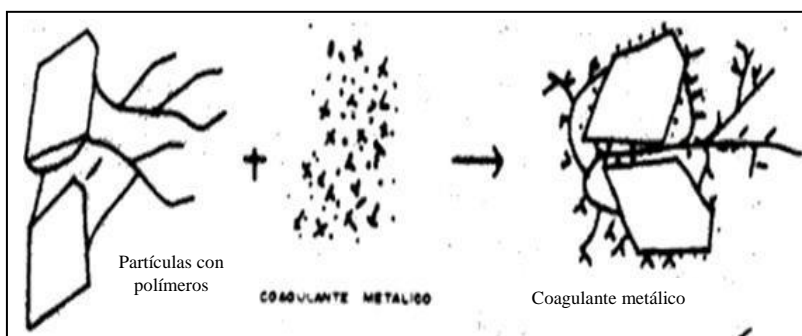


Figura 2. Fases de polímeros en el proceso de coagulación (Andía, 2000).

Los polímeros de fuente natural o sintética pueden ser complementos al agua de tres modalidades distintas: como coagulantes (*Figura 3*); como colaboradores en el proceso tecnológico de coagulación (*Figura 4*) y como auxiliares del proceso de floculación (*Figura 5*). El primer caso supone que sea agregado al agua como único coagulante en lugar del coagulante metálico. En el segundo caso, el polímero es añadido antes del coagulante metálico y en el tercero, después del mismo. Los tres casos suponen mecanismos de acción diferentes, aunque existe una tendencia generalizada a no hacer distinción entre ayudantes de coagulación y ayudantes de floculación, es probable que el mecanismo de coagulación/floculación sea diferente según se agregue el polímero antes o después del coagulante metálico (Arboleda, 1975).



*Figura 3.* Mecanismo de acción del coagulante (Arboleda *et al.*, 1975).



*Figura 4.* Mecanismo de acción del ayudante de coagulación (Arboleda *et al.*, 1975).

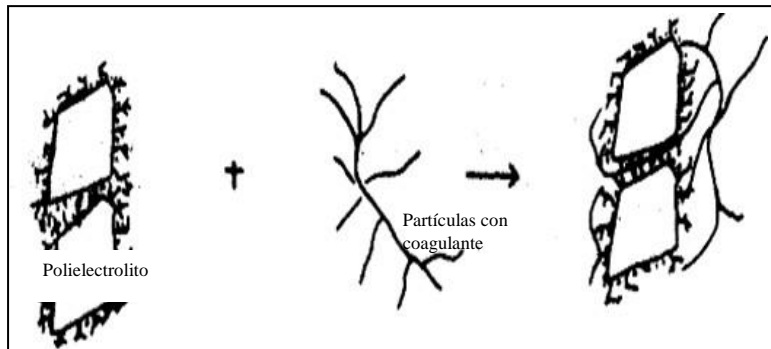


Figura 5. Mecanismo de acción del ayudante de floculación (Arboleda *et al.*, 1975).

### 2.2.6. Coagulantes.

Según CEPIS (1985) la correcta aplicación de los coagulantes puede conducir a apreciables beneficios incluyendo el incremento de capacidad y mejoramiento de la eficiencia de agua potable brindado por las plantas de tratamiento, algunas veces con significativas reducciones en el costo del tratamiento.

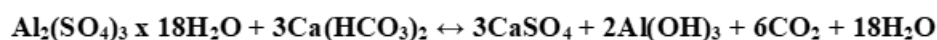
Los ayudantes de coagulación-floculación no son exactamente agentes con acción coagulante-floculante, su acción es causada dado a que sus moléculas son afines a las partículas coloidales en suspensión, lo que genera mayor densidad en los coágulos formados al aplicar el agente coagulante, permitiendo de esta manera la formación de flóculos más grandes, de mayor peso y densidad, capaces de captar más material en suspensión y sedimentar con más rapidez, permitiendo así un menor requerimiento de altura en los sedimentadores, menor tiempo de retención y menor parte del agente coagulante-floculante a utilizar (Campos y Di Bernando, 1991).

Según Trejo (2004) el empleo de sulfato de aluminio como coagulante principal en la ejecución del tratamiento de agua data desde el año de 1960 y en países desarrollados ha sido reemplazado por floculantes de segunda y tercera generación (policlorosulfatos de aluminio básico y ploclorosulfato de aluminio de alta basicidad).

Metcalf (1991) menciona que el coagulante inorgánico sulfato de aluminio es más utilizado en el proceso de coagulación, esto debido a su facilidad de manejar, almacenar,



mezclar y aplicar. A continuación, se muestra la reacción química que tiene el sulfato de aluminio en presencia de agua:



Sin embargo, el hidróxido de aluminio insoluble  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , es un producto de textura pegajosa y tiende a depositarse lentamente en las aguas residuales, provocando el barrido del material suspendido.

Un estudio realizado por Martyn (1989) registró en 88 distritos de Inglaterra y Gales una analogía entre las enfermedades de Alzheimer y otros tipos de demencia con los niveles promedio de aluminio en el agua de consumo. Por otro lado, Walton et al (1995) ejecutó un trabajo por medio de espectrometría y determinó la influencia de la ingesta del aluminio por medio del agua potable puede ingresar en el sistema nervioso central y causar ciertas alteraciones.

### **2.2.7. Coagulantes naturales.**

Los coagulantes de origen natural se caracterizan por ser biodegradables y se presume que son seguros para la calidad de vida humana (Šćiban, Klašnja, Antov y Škrbić, 2009). Estudios dados por Ebeling (2005) mencionan que el uso de polímeros naturales se da por las propiedades que tiene para formar cadenas de monómeros y su alto peso molecular, que varía de 104 a 106. De acuerdo al autor, algunas ventajas de su uso son:

- Menor requerimiento de polímeros inorgánicos en la dosificación.
- Reducción de la producción de lodos
- Almacenamiento y mezclado fácil
- El peso molecular como su densidad pueden ser útil al momento de optimizar.
- Beneficia a que partículas muy pequeñas se puedan unir entre ellas mediante puentes
- Resistencia a la fuerza de rompimiento del flóculo
- Mejora la velocidad de sedimentación del flóculo

Los polímeros pueden variar en peso molecular, estructura (sea lineal o ramificado), cantidad de carga, tipo de carga y composición (Wakeman y Tarleton, 1999) y también dependen del grado de ionización de los grupos funcionales y del grado de co-polimerización (Metcalf y Eddy, 1991).

Existe una gran diversidad de coagulantes naturales de origen vegetal (almidones de papa, cactus, maíz, trigo y yuca) manipulados en la clarificación del agua (Campos y Di Bernardo 1991); debido a sus propiedades coagulantes, pueden ser aplicados como ayudantes en los procesos de coagulación y floculación.

#### **2.2.8. Polímeros naturales.**

Moscozo (2015) menciona que algunos polímeros naturales presentan propiedades coagulantes y/o floculantes y han sido utilizados de forma empírica por comunidades nativas para remover la turbidez del agua, obteniéndose óptimos resultados, como en la sierra de Perú y en México, donde se empleó el mucílago de la penca de tuna. Además, señala que los biopolímeros de origen natural en la mayoría de casos, no presenta una composición química específica, debido a que están compuestos por diversos tipos de polisacáridos (principalmente almidón, glucósidos, celulosa, etc.) y proteínas (olieratina, caseína, gelatina, etc.).

Una de las principales ventajas del uso de biopolímeros naturales es que su toxicidad es mínima o casi nula, pues son comúnmente utilizados como comestibles o aditivos en diversos productos alimenticios (Moscozo, 2015).

En relación a su mecanismo de acción en el proceso de coagulación, los polímeros facilitan la creación de puentes entre ellos debido al incremento de tamaño de las partículas coloidales, forman cadenas largas de polímeros. Al aumentar su tamaño se forman partículas coloidales fuertes y pesadas, los que posteriormente son eliminados como lodos residuales (Bolto y Gregory, 2007).

Además, neutraliza cargas mediante la desestabilización de la partícula coloidal, que generalmente tiene carga negativa, por otro lado, mediante la adición de un polímero cuya carga es positiva se genera una interacción de cargas electrostáticas entre el coagulante y las partículas coloidales suspensas (Barrenechea, 2004).

### **2.2.9. Almidón nativo.**

Los almidones nativos son aquellos extraídos por medio natural, que poseen propiedades únicas y específicas influenciadas por el peso molecular promedio de la amilosa y amilopectina así como su organización molecular, estos almidones carecen de versatilidad a los cambios de temperatura y pH (Thomas y Atwell, 1999).

Según Culebro (2015), el almidón tiene fuertes propiedades coagulantes, pues constituye la mayor reserva de carbohidratos de las plantas. No consume altas cantidades de alcalinidad del medio y no sufre hidrólisis en la solución. De esta manera, al ser empleado como auxiliar de coagulación para la remoción de turbiedad, no habría riesgo de que pueda alterar significativamente los niveles de pH en el sistema.

#### **2.2.9.1. Características fisicoquímicas: amilosa y amilopectina.**

Una de las principales características que tienen los almidones orgánicos provenientes de vegetales, son sus propiedades fisicoquímicas, las cuales están influenciadas de acuerdo a su estructura granular y molecular (Wang y White, 1994).

La composición que conforma los gránulos de almidón posee dos tipos de homopolisacáridos de glucosas denominadas amilosa y amilopectina. Ambas familias de macromoléculas varían en estructura molecular, propiedades físicas y biológicas. La amilosa se caracteriza por presentar una estructura generalmente lineal con enlaces glucosídicos  $\alpha$ -1,4 y la amilopectina presenta una estructura ramificada por la presencia de enlaces  $\alpha$ -1,6 y enlaces  $\alpha$ -1,4 (Romero *et al.*, 2005). Ambas guardan una estructura molecular en cadena en los gránulos cuya alteración depende de su pureza (Aparicio, 2003)

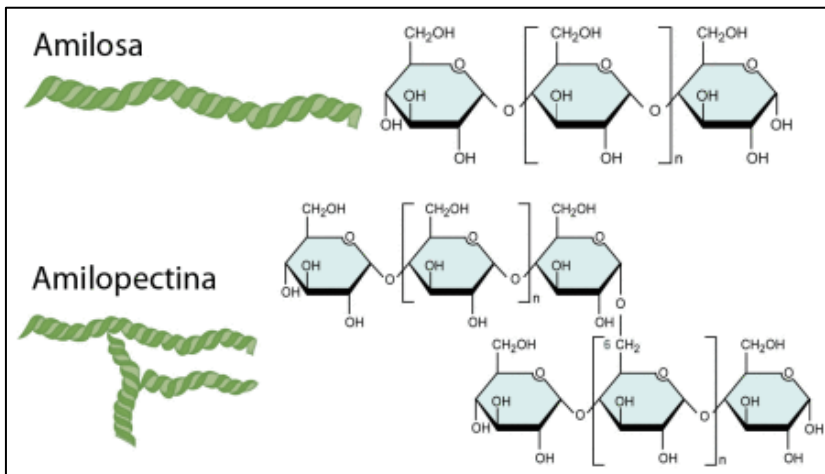


Figura 6. Estructura química de la amilosa y amilopectina (Hernández M. et al, 2008).

### 2.2.9.2. Solubilidad.

Cuando los almidones son empleados en agua caliente se separan en sus dos fragmentos principales y sus granos se hinchan formando una masa gelatinosa denominada: engrudo. La temperatura de formación de este producto es variante, generalmente está entre 55 a 80°C. Es obtenido por hidrólisis parcial de los almidones a temperatura entre 200 y 250°C para hidrolizarse en dextrinas. Las dextrinas son polisacáridos de peso molecular menor que los almidones. La hidrólisis posterior del almidón produce la maltosa y la glucosa, la reacción se muestra a continuación:

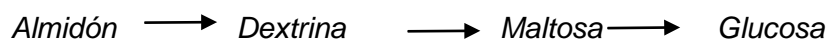


Figura 7. Cadena de reacción generada en el proceso de solubilidad. (Fuente propia)

Sin embargo, los almidones tienden a tener un mayor inconveniente al usarse en plantas de tratamiento debido a la insolubilidad en aguas con temperaturas menores a los 17°C, pues al ser combinado, se forma un producto denominado lechada de almidón que sedimenta rápidamente (CEPIS,1975).

### 2.2.9.3. Metodologías de análisis físico químicas del almidón.

En la Tabla 1 se detalla las principales metodologías a emplear en un análisis físico químico, llamado también análisis proximal.

Tabla 1.

*Metodologías de análisis físico-químico del almidón.*

<b>Análisis</b>	<b>Método</b>
Metodología de extracción	Vía húmeda. FAO ,2007
Humedad	Método 925.09. AOAC ,1995
Porcentaje de Materia seca	Método el ICONTEC (2002)
Determinación de ceniza	Método gravimétrico 923.03 AOAC
Determinación del índice de adsorción y solubilidad en agua	Método propuesto por Anderson, Conway y Peplinski (1969)
Obtención de Amilosa	Metodología ISO 6647 (ISO.2007)

Fuente: Cobana, Antezana (2007).

### 2.2.10. Almidón de Pituca.

La pituca (*Colocasia esculenta*) es uno de los primeros tubérculos adoptados por el hombre, su historia se remonta a las culturas neolíticas más antiguas del sureste de Asia, entre India e Indonesia. Este fruto es nativo de las zonas selváticas del centro-sur de Asia, posiblemente proveniente de la India, desde donde habría sido trasladada a África; actualmente es el más importante cultivo en África Occidental (Fernández, 1970).

Montaldo (1977) indica que tanto la pituca como el *Artocarpus altilis* (árbol del pan) fueron trasladados a través de Polinesia, a los pueblos que conforman la gran variedad de islas que se encuentran desde Hawai hasta Nueva Zelanda y la Isla de Pascua. En el Perú, este tubérculo es conocido como pituca, pero su nombre varía en unos departamentos, por ejemplo: aratrima en Huánuco, taro en Moyobamba, michutsi en la selva alta y witina en el bajo Amazonas (Núñez, 1989).

Morales (2012) menciona que la *Colocasia esculenta* es oriunda de áreas poco conocidas de Asia, aunque actualmente es cultivada en los trópicos de ambos hemisferios y por lo general subsiste en áreas abandonadas, tal como se observó en Tingo María (Perú), donde al limpiar sus áreas de sembrío la suponen como maleza porque usualmente está sembrada y se alimenta con favor de las lluvias del trópico húmedo.

La pituca es una planta perennemente herbácea que mide aproximadamente de 1 a 2,5m. de altura, tiene tallos cormosos y ocasionalmente rizomatosos sub-globulares, en algunas variedades presentan tallos oblongoides entre 15 a 18cm de diámetro, además de cicatrices laminares aproximadas entre sí y con cormitos secundarios sub-globulares en la sección inferior de los tallos, sus hojas son peltadas con peciolo de hasta 2.0 metros aproximados de largo glaucos, envainadores hasta la tercera parte, vaina decurrente hasta el ápice, la parte libre sub-terete, obtusamente aplanada abacialmente y ligeramente surcada medialmente y estriada abacialmente; láminas peltadas, ovado-cordadas, ovado-sagitadas (Morales, 2012).

Según Onwalata et al (2002) y Njintang (2003) el almidón se encuentra distribuido en el corno de la *Colocasia esculenta*, parte susceptible a la putrefacción post-cosecha, generando grandes pérdidas, por lo cual, su aprovechamiento en la extracción del almidón en esta fase puede ser efectivo para el aprovechamiento del 83% de amilopectina generada, la cual favorece en la viscosidad del almidón.



Figura 7. Figura referencial de la Pituca (*Colocasia esculenta*) (FAO,2007).

Morales (2012) en su estudio fitogeográfico del almidón de pituca, señala la siguiente clasificación taxonómica:

- Reino: Plantae
- División: Magnoliophyta
- Clase: Liliopsida
- Orden: Alismatales
- Familia: Araceae
- Subfamilia: Aroideae
- Género: Colocasia
- Especie: Colocasia esculenta
- Nombre binomial: Colocasia esculenta (L.) Schott

#### 2.2.11. Extracción del almidón.

FAO (2007) indica que los principios de extracción del almidón se aplican en todas las tecnologías, aunque varía dependiendo de los equipos utilizados. Se encuentran procesos por vía artesanal, vía húmeda, otros por medio del proceso de manufactura y otras por tecnologías modernas que mecanizan las etapas del proceso de manera eficiente. Mediante la Figura 8 se observa el proceso realizado mediante la vía de extracción húmeda propuesto por la FAO (2007).

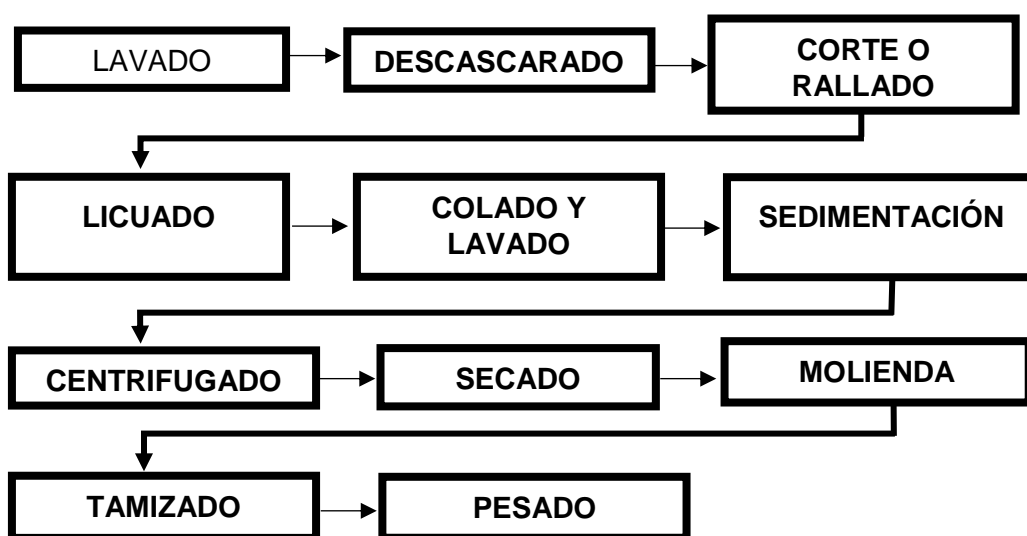


Figura 8. Proceso de extracción por vía húmeda (FAO, 2007).

Cobana y Antezana (2007) realizaron la comparación entre el proceso por vía seca y vía húmeda, siendo el de mejor resalto la extracción de almidón por vía húmeda porque la etapa de pre molienda influyó de manera significativa. En la Tabla 2 se muestran las propiedades fisicoquímicas del tipo de extracción de almidón en estudio.

Tabla 2.

*Comparación de parámetros obtenidos mediante extracción vía seca y húmeda.*

<b>Parámetro</b>	<b>Extracción del almidón vía seca</b>	<b>Extracción del almidón vía húmeda</b>
Amilosa (%)	16.9	15.45
Amilopectina (%)	71.67	83.57
Solubilidad (%)	37.89	39.66
Ácido	No presenta	No presenta
Cianhídrico (mg)		
Fibra (%)	0.95	0.98

Fuente: Cobana, Antezana (2007)

### **2.2.12. Almidones como ayudantes en el proceso de coagulación.**

El Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS, 1975) realizó las primeras pruebas con almidón de yuca y maíz empleándolos como auxiliar de coagulación y determinando también que los almidones pueden ser obtenidos de gama de variedad de productos vegetales (papa, maíz, yuca y trigo).

Se comparó una mezcla de almidón y 8% de NaOH, con la acción de remoción del coagulante sólo los resultados demostraron que la mezcla de Almidón:NaOH en proporción 50:50, actúa con mediana eficiencia como coadyuvante de coagulación, con una dosis de 0,6mg/l; por otro lado, se logró obtener una ligera mejora en la velocidad de sedimentación, al lograr remover el 90% de turbiedad a los 8 minutos de sedimentación, en comparación del coagulante sólo (sulfato de aluminio) que tardó 11 minutos.



Morán (1987) en su estudio sobre el empleo de la fécula de maíz como una alternativa de ayuda en el proceso tecnológico de coagulación del agua, que al emplearse el sulfato de aluminio, concluye que es factible el uso de fécula (almidón) de maíz como poli electrolito natural para sustituir hasta un 25% el sulfato de aluminio en el proceso tecnológico de remoción de turbiedad, como también convierte al maíz en un polímero económicamente factible para su uso en el tratamiento de agua en pequeñas plantas.

Por otro lado, Laines *et al.* (2008) señalan que el uso de almidones orgánicos está condicionado esencialmente por su tendencia a presentar sinéresis y a retrogradar, y también por su viscosidad inestable durante el proceso; aun así, han sido empleados en el tratamiento de lixiviados que provienen de rellenos sanitarios, alcanzando niveles menores a 5 unidades nefelométricas de turbiedad con el uso de mezclas de almidón de plátano y sulfato de aluminio.

### **2.2.13. Almidón de pituca en el proceso de coagulación y floculación.**

El almidón de pituca ha sido poco estudiado para tratamiento de agua en todo el mundo, mientras que, en el Perú el panorama no es distinto. A nivel nacional existen muy pocas investigaciones o ensayos relacionados, y debido a sus características físicoquímicas, el almidón presenta un alto potencial para su uso como ayudante de coagulación que debería ser aprovechado (Páez y Peña, 2015).

En Colombia y México se han realizado estudios sobre el almidón de pituca aplicado en el proceso de coagulación y floculación, en dichos países se conoce a la pituca con el nombre de “malanga”. Los autores Páez y Peña (2015) realizaron una investigación con el objetivo de determinar las propiedades del almidón de Malanga como ayudante de floculación en la potabilización del agua, los resultados que obtuvieron al utilizar almidón de malanga junto con el coagulante sulfato de aluminio, dieron como resultado una mejor calidad del agua tratada al reducir los parámetros de turbiedad, hierro y color, alcanzándose remociones mayores al 95% utilizando solución 50/50 en peso de sulfato-almidón.

Asimismo, en México, López, Laines, Hernández y Aparicio (2014) realizaron un estudio con el objetivo de evaluar el almidón de malanga (*Colocasia Esculenta*) como coadyuvante en la remoción de turbiedad. Los resultados obtenidos indican que la remoción máxima de turbiedad fue de 95% con el empleo de 15 mg/L de almidón de malanga junto a 35mg/L de sulfato de aluminio. Este estudio propone que el uso de polímeros naturales provenientes de almidón de malanga podría reducir significativamente las dosis de sulfato de aluminio comúnmente empleadas en el proceso de coagulación floculación en plantas de tratamiento de agua.

#### **2.2.14. Ventajas del uso de almidón y otros coagulantes naturales.**

Los coagulantes naturales son biodegradables y no presentan riesgos para la salud humana, además producen menos volumen de lodos residuales (20-30%), inferior a las generadas con el uso de agentes polímeros químicos como el sulfato de aluminio, y no dejan residuales tóxicos en el agua tratada (Sciban *et al.*, 2009).

Del mismo modo, Ghimici y Nichifor (2010) señalan las ventajas de los biopolímeros naturales en el tratamiento tecnológico del agua, las principales son: requiere una baja dosis del coagulante químico, se genera menos cantidad de lodo y hay un menor aumento en la carga iónica del agua tratada y un menor nivel de aluminio residual.

El desarrollo de nuevas alternativas para el empleo de polímeros de origen natural en el proceso coagulación-floculación podrá ayudar a disminuir la cantidad utilizada de productos químicos, con la ventaja de que los polímeros de origen natural presentan por lo general una mínima o nula toxicidad, porque comúnmente son utilizados como comestibles (Mozcoso, 2015).

## **2.2.15. Factores que influyen en el proceso de coagulación.**

### **2.2.15.1. Partículas coloidales.**

Se denomina partículas coloidales a los sólidos en suspensiones con tamaño de  $10^{-5}$  y  $10^{-9}$  mm con una velocidad de sedimentación lenta y responsables de turbidez, color (Vargas y Romero, 2006) debido a que coexisten partículas en la fuente de agua. Poseen un tiempo de sedimentación prolongado tales como la arcilla, material orgánico e hidróxidos de metal (Ramírez y Jaramillo, 2015; Manognya *et al.*, 2014). Para alcanzar la estabilidad o repulsión de los coloides, se necesita determinar la carga de las partículas. La mayor parte de estas poseen superficies cargadas eléctricamente negativas (Vargas, Rojas y Joseli, 2004).

Según Díaz (2014) para la estabilización de las partículas coloidales deben ser hidrofílicas, es decir, poseen afinidad por el agua y se dispersan naturalmente con las moléculas de agua de tal modo que no existe contacto entre coloides. Por otro lado, coexisten partículas hidrófobas, en su mayoría inorgánicas. Rechazan el agua y por tanto, su dispersión no es espontánea.

Para lograr la desestabilización de los coloides, existen tres tipos de mecanismos; la gravedad (influencia baja), movimiento browniano (influencia en el choque de partículas) y la fuerza de Van der Waals (influencia en la interacción de partículas) (Díaz, 2014).

Según Lavenda (2005), la dimensión de las partículas interviene en el proceso del movimiento browniano. A menor tamaño, mejor desarrollo del movimiento. Otro factor influyente es la temperatura del fluido, pues aumenta la agitación de dicho movimiento y demostrado por la teoría cinética, este proceso es dado por el choque desigual y casual de las partículas en suspensión por las moléculas del agua (Barrenechea, 2004).

El beneficio reside en la estabilidad del coloide, debido a la continuidad del estado coloidal en una disolución, dado que el coloide presenta una fuerza de repulsión con otras

partículas y tiene cierta resistencia a precipitar por la fuerza de la gravedad (Vargas y Macarulla, 1971). Su estabilización depende de la carga eléctrica y la hidratación de las partículas con carácter hidrófilo, el cual se va perdiendo al flocular.

Andía (2000) establece el tiempo de sedimentación de materiales orgánicos e inorgánicos. En la Tabla 3 se presentan los tiempos de sedimentación de diferentes tipos partículas con diferente diámetro y tiempo de sedimentación en relación a su diámetro.

Tabla 3

*Tiempo de sedimentación de partículas orgánicas e inorgánicas*

Tipo de partícula	Diámetro (mm)	Tiempo de caída	
		Densidad 2.65	Densidad 1.1
Grava	10	0.013 seg.	0.2 seg.
Arena gruesa	1.0	1.266 seg.	20.9 seg.
Arena fina	0.1	126.66 seg.	34.83 min.
Lodo fino	0.01	3.52 hrs.	58 hrs.
Bacterias	0.001	14.65 días	249.1 días
Coloides	0.0001	4.12 años	66.59 días

Fuente: Andía (2000).

De acuerdo a Andía (2000) los coloides son el tipo de partícula que tiene mayor tiempo de suspensión (4.12 y 66.59 años) por lo que se los considera partículas estables y es casi imposible su sedimentación de forma natural; además, son los principales autores de la turbiedad, cambio de pH y color.

### **2.2.15.2. Potencial de hidrógeno (pH).**

El pH es un parámetro importante en el análisis y determinación de calidad de agua para el consumo humano y se mide a través de la actividad del ion hidrógeno en una solución, conforme se muestra en la siguiente la expresión:

$$\text{pH} = -\log\{\text{H}^+\}$$

Dado que el pH es una variable importante e influyente en el proceso de coagulación, cada tipo de agua presenta un rango de pH óptimo el cual puede beneficiar o desmejorar el proceso de coagulación dependiendo de la naturaleza de los iones y la alcalinidad presente en el agua. Por lo general, el rango óptimo de pH cuando se emplean sales de aluminio y sales de hierro es de 6.5 a 8.0 y de 5.5 a 8.5, respectivamente (Andía, 2000).

#### ***2.2.15.3. Temperatura del agua.***

La diferencia mínima de 1°C en la temperatura del agua tiene un efecto en el tratamiento de agua, esto debido a que varía la densidad del agua al alterar la energía cinética de las partículas en suspenso (Andía, 2000). Las temperaturas muy elevadas desfavorecen el proceso de coagulación y dificultades en la sedimentación del floc, asimismo, temperaturas muy bajas dificultan la formación de flóculos pues aumentan la viscosidad del agua y que requieren más tiempo de floculación y el empleo de dosis más altas de coagulante.

#### ***2.2.15.4. Dosis del coagulante.***

La dosis del coagulante afecta directamente en la eficacia del proceso de coagulación, pues al aplicar una baja dosis de coagulante no se realiza una neutralización óptima de la carga de las partículas, por tanto, la formación de microflóculos es muy poca y se obtiene una baja remoción de turbiedad. Por otro lado, al emplear una alta dosis, se genera una inversión de la carga de las partículas, lo que fomenta la formación de numerosos microflóculos muy pequeños cuya velocidad de sedimentación es bastante lenta produciendo también una baja remoción de turbiedad. Por lo general, para determinar la dosis óptima del coagulante se realiza la prueba de jarras, un método estandarizado a nivel mundial para ese análisis a escala de laboratorio.

#### **2.2.15.5. Mezcla.**

La fuerza de agitación de la masa en el periodo de adición del coagulante determinará que el proceso de coagulación sea completo porque beneficiará en la ejecución de la reacción química de neutralización de cargas.

Si se genera turbulencias desiguales desfavorecerá a ciertas porciones de agua que incluyan en menor cantidad de mezcla del coagulante. Cabe resaltar la importancia de agitación homogénea e intensa en toda la masa del agua.

Para ello, se recomienda que la primera etapa (mezcla rápida) sea de mayor fuerza enérgica y de corta duración, en un tiempo entre 5-60 segundos debido a que beneficia en la dispersión total del coagulante en la masa de agua. Seguidamente, la segunda etapa consta de la mezcla lenta, que se caracteriza por ser lenta, y se desarrolle propiamente los microfloculos.

#### **2.2.15.6. Proceso de floculación.**

El suministro de agua potable y alcantarillado de Lima (2007) indica que el proceso de floculación se caracteriza por ejercer una agitación lenta que promueve la aglomeración de las partículas coloidales y el agente coagulante, fomentando el crecimiento de los floculos y por tanto su precipitación rápida.

El floculante mayor aplicado en el proceso tecnológico de tratamiento de agua es sulfato de aluminio ( $AlSO_4$ ), el cual tiende a formar una superficie de puentes para aglomerar los coloides, aumentar el tamaño de los flocs y posteriormente incitar una sedimentación adecuada (Andia, 2000).

A continuación, en la *Figura 7* se observa el mecanismo que aplica el coagulante químico a las partículas coloidales.

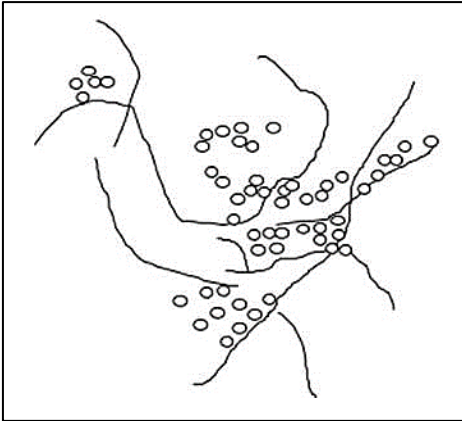


Figura 9. Mecanismo de enlace del coagulante químico AlSO4 (Andia, 2000).

Para que el proceso de floculación sea favorecido y permita agrupar poco a poco los flóculos, se debe de adoptar un tiempo estimado entre 10 a 30 minutos. Se podrá observar el incremento del tamaño de las partículas y el incremento de peso de los flóculos (Tejeros, Suárez, Jácome y 2002).

En la Figura 8 muestra el mecanismo del coagulante químico (AlSO4) frente a las cargas positivas de la capa en los colides y en la Figura 9 se evidencia como una vez ya disminuido la afinidad de la capa eléctrica de los coloides, se logra aglomerar y formar flóculos de mayor tamaño.

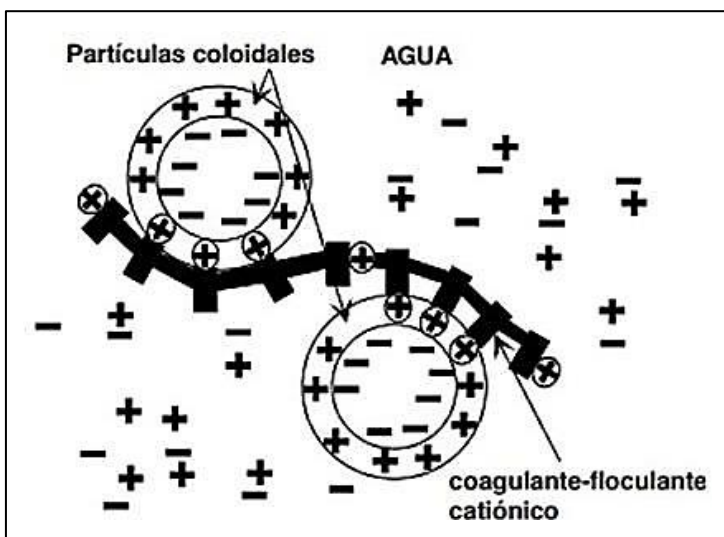


Figura 10. Funcionamiento reactivo de las partículas coloidales (Tejeros, Suárez y Jácome, 2002).

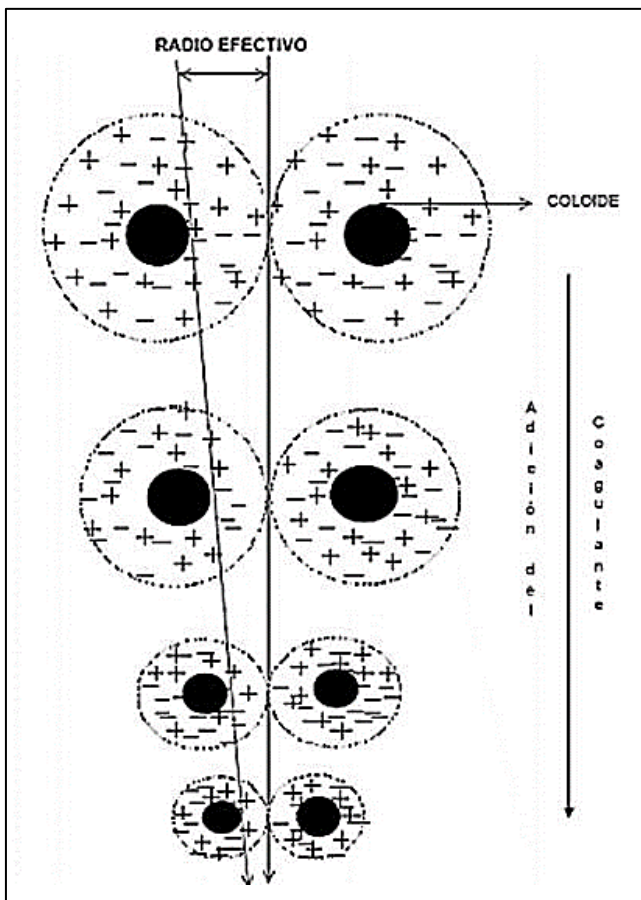


Figura 11. Funcionamiento reactivo de las partículas coloidales (Tejeros, Suárez y Jácome, 2002).

Cuando se genera una fuerza de repulsión, se activa la activación de partículas con semejante carga. Esta fuerza se encuentra con respecto a la distancia que los aleja y desciende ágilmente con el aumento de iones de carga opuesta al de las partículas.

Esta fuerza denominada fuerza de Van de Walls expone que la distancia separada entre partículas es superior a la distancia “L” el cual evita la atracción y “E” es la energía que las mantiene separadas (Cárdenas, 2000). En la *Figura 10* muestra la fuerza de repulsión y atracción producido por la fuerza de Van der Walls.



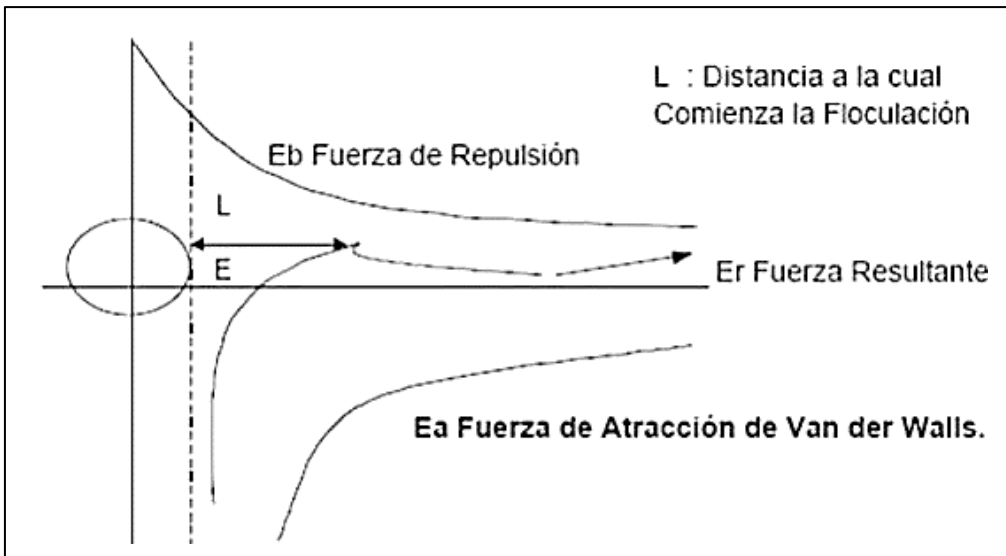


Figura 12. Fuerza de repulsión y atracción (Cárdenas, 2000).

## 2.2.16. Factores que influyen en el proceso de floculación.

### 2.2.16.1. Tiempo de retención.

Este factor se encuentra relacionado a la velocidad que se aglomeran las partículas. Por ello, es importante la experimentación a base de pruebas de jarras y con ello, determinar la eficiencia que debe tener la unidad para aglomerar las partículas en un tiempo menor. De esta manera se determina el número de cámaras de un floculador (Restrepo, 2009).

Según Barrenechea (2004), el tiempo de retención puede variar de 10 a 30 minutos dependiendo del tipo de unidad del proceso y temperatura en la cual se encuentra la fuente de agua. A continuación, en la Tabla 4, se muestra la condición de temperatura según el tipo de zona (tropical o fría).

Tabla 4

*Condiciones de temperatura según la zona de estudio.*

<b>Zona de estudios</b>	<b>Tiempo de retención</b>
Zona Tropical (20°C)	15 – 20 min
Zona fría (10-15°C)	Mayor a 20 min

Fuente: Barrenechea (2004).

### **2.2.16.2. Gradiente de velocidad.**

El siguiente factor es importante debido a que debe ser proporcional a la velocidad de aglomeración de las partículas porque existe un límite máximo de gradiente que no puede sobrepasar y evitar el rompimiento del flóculo (Restrepo, 2009).

Para optimizar del proceso, los gradientes de velocidad se deben encontrar en un rango de 70-20 s<sup>-1</sup>, siendo el primer tramo el que posea mayor gradiente y varíe en forma uniformemente decreciente, desde el ingreso de la masa de agua al floculador (AWWA 1971; citado por Barrenechea 2004). La gradiente de velocidad se encuentra en función de la pérdida de carga que se da a lo largo de los canales y curvas del floculador, por tanto, influye en el tiempo que se quedará dentro del proceso. Por ello, en sistemas que posea similar magnitud de tiempo de residencia, obtendrá una mayor eficacia que en aquellos en que se ha incrementado el número de compartimentos del floculador.

### **2.2.16.3. Jar test.**

Es una técnica estandarizada usada para obtener la dosificación y condiciones requeridas para lograr resultados óptimos en el tratamiento de agua residual o de consumo humano (ASTM, 1995). La prueba de jarras precisa determinar la dosis óptima, duración e intensidad de mezcla y floculación. En esta prueba se simula el periodo de mezcla rápida, mezcla lenta y sedimentación. La prueba de Jarras es un método de laboratorio que permite determinar las condiciones óptimas del tratamiento de aguas, este método permite realizar

variaciones en la dosis de coagulante o polímero, alternado velocidades de mezclado a pequeña escala, con el fin de predecir el funcionamiento de una operación a mayor escala (Morejón, 2017).

Por otro lado, la 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 (Abranovich y otros, 2004), además, permite determinar las condiciones de operaciones óptimas para el tratamiento de aguas, ya que permite hacer ajuste en el pH, variar dosis de coagulantes-floculantes y alternar velocidades de coagulación (Bravo M, Gutiérrez J, 2015).

La mezcla rápida favorece la formación de turbulencia y agiliza el contacto entre las partículas coloidales y el polímero químico. Ocurre a primera estancia, puede ser desde décimas de segundo hasta cerca de 100 seg., sin embargo, rige de acuerdo a las condiciones de pH, temperatura y cantidad de partículas en el agua (Lorenzo, 2006; Barnechea, 2004).

La mezcla lenta simula el tratamiento de un floculador mediante la agitación relativamente lenta a fin que las partículas choquen entre sí, aglomerándose y formando partículas de mayor tamaño (flóculos). Esta agitación varía entre 20-40 RPM y no debe exceder de los 3-15 min., debido a que puede crear un desmejoramiento en la sedimentación (Lorenzo, 2006; Barnechea, 2004). Finalmente, se realiza el proceso de sedimentación, el cual mediante un determinado tiempo que difiere entre 10-40 min los flóculos precipitan (Barnechea, 2004).

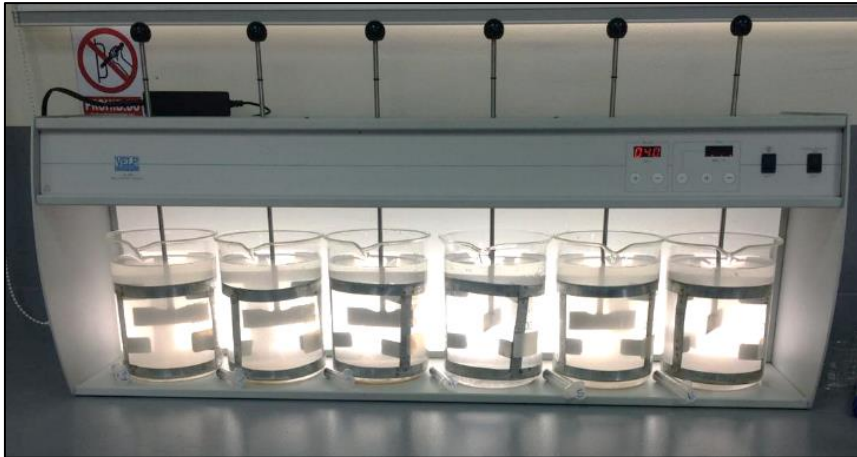


Figura 13. Equipo de prueba de jarras.

### 2.2.17. Metodología de Superficie de respuesta.

La metodología de superficie de respuesta (MRS) tiene como propósito de optimizar procesos, mejorar la calidad del producto final (agua de calidad), minimizar costos y tiempo, y maximizar rendimiento, es por ello ha motivado a industrias e investigadores académicos a la búsqueda de técnicas de diseños de experimentos por Metodología de la Superficie de Respuesta (RSM), que es un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas utilizadas para modelar y analizar problemas en los que una variable de interés es influenciada por otras.

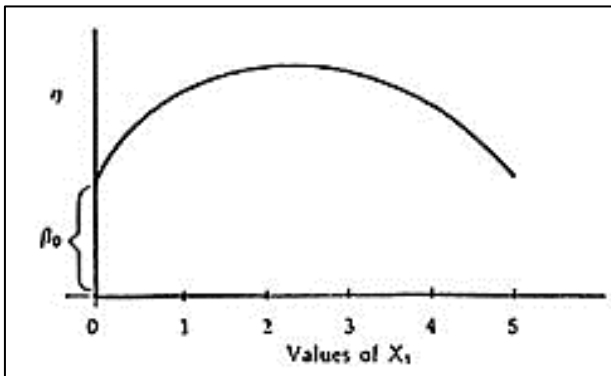
El propósito inicial de estas técnicas es diseñar un experimento que proporcione valores razonables de la variable respuesta y, a continuación, determinar el modelo matemático que mejor se ajusta a los datos obtenidos. El objetivo final es establecer los valores de los factores que optimizan el valor de la variable respuesta. Esto se logra al determinar las condiciones óptimas de operación del sistema (Kuehl, 2001 y Rodrigues Lema, 2012).

Montgomery (2004) también corrobora que está basada en un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas, mediante las cuales se busca optimizar un factor de interés, denominado “respuesta”, a partir de la influencia de diversas variables. Para lograrlo se

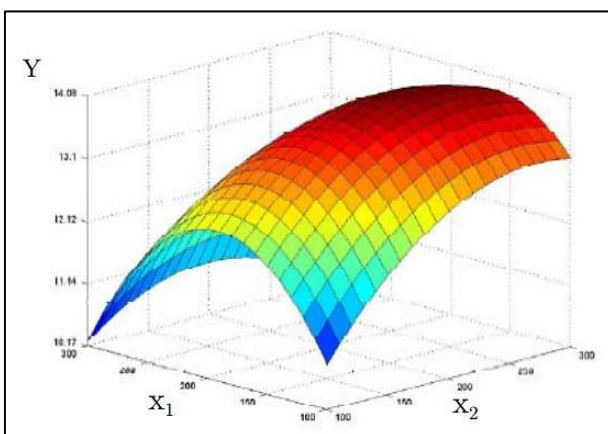
debe determinar las condiciones óptimas de la operación del sistema.

Las variables o factores que influyen en la variable respuesta, son condiciones del proceso que pueden ser cualitativos o cuantitativos, mientras que la variable respuesta siempre debe ser un valor o cantidad medible.

La relación  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k)$  entre  $Y$  y los niveles de los  $k$  factores,  $X_1, X_2, \dots, X_k$ , representa una superficie. La expresión  $k$  factores, se refiere a que la superficie está en  $k + 1$  dimensiones. Por ejemplo,  $Y = f(X_1)$ , quiere decir que la superficie está dos dimensiones como se muestra en la *Figura 12*, mientras  $Y = f(X_1, X_2)$ , significa que la superficie está en tres dimensiones, como se puede observar en la *Figura 13*.



*Figura 14.* Superficie de respuesta en dos dimensiones (Cornell, 1990).

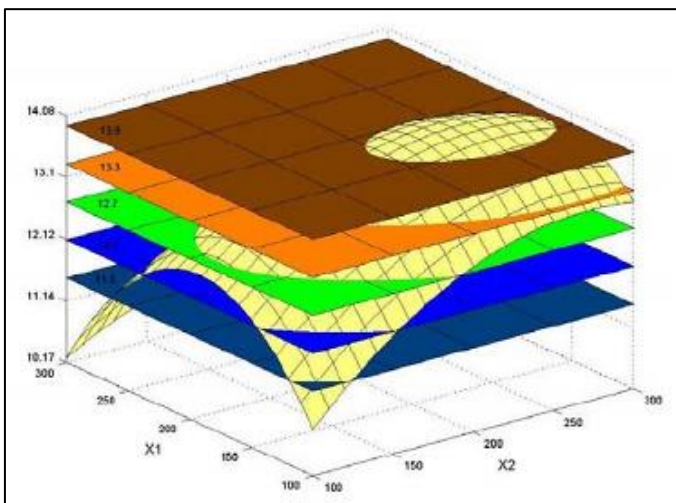


*Figura 15.* Superficie de respuesta tridimensional (Cornell, 1990).

### 2.2.18. Gráfica de contornos.

La gráfica de contornos permite observar la forma de una superficie de respuesta en tres dimensiones y así notar los niveles de los factores en los que ocurre un cambio en la altura o forma de la superficie de respuesta. Los valores constantes de la respuesta sobre el plano  $X_1$   $X_2$ , se grafican con curvas, denominadas líneas de contorno, en un plano donde los ejes coordenados representan los niveles de los factores. Cada curva representa un valor específico de la altura de la superficie, es decir un valor específico de  $Y$  (Montgomery, 2004).

Esta gráfica no está limitada a sólo tres dimensiones, sin embargo, al trabajar con más de tres factores de influencia, no se podría lograr una representación geométrica. En la *Figura 13* se muestra una gráfica de contornos tridimensional.



*Figura 16.* Gráfica de contornos (Cornell (1990)).

### 2.2.19. Región experimental.

Es la región de los valores de los factores, se puede graficar utilizando los niveles actuales de operación para cada variable o factor, y si se quiere explorar una región más extensa, se incrementa y decrementa el valor del nivel en una cantidad determinada (Montgomery, 2004).

## CAPITULO III

### MATERIAL Y MÉTODOS

#### 3.1. Lugar de ejecución

El estudio de la presente investigación, se ejecutó en los laboratorios de Ingeniería Ambiental e Ingeniería de Alimentos de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión ubicada a la altura 19.5 de la Carretera Central, distrito de Lurigancho Chosica, provincia de Lima, departamento de Lima, Perú.

#### 3.2. Materiales e insumos

##### 3.2.1. Materia prima.

La materia prima (*Colocasia esculenta*) fue adquirida en el mercado mayorista de verduras ubicado en Av. La Cultura 15011 distrito de Santa Anita, provincia de Lima, departamento de Lima, Perú.



*Figura 17.* Materia prima de estudio: Pituca (*Colocasia esculenta*).

A continuación, se mencionan en las Tablas 5 y 6 los materiales utilizados en la extracción del almidón de la pituca (*Colocassia Esculenta*) y también en la ejecución de las pruebas experimentales (Jar Test).

Tabla 5.

*Materiales necesarios en la prueba experimental. Lugar: Laboratorio CITAL*

<b>Equipo</b>	<b>Marca</b>	<b>Cantidad</b>
Balanza analítica	HZT-A00	1
Centrífuga	Beckman J2-21	1
Estufa	LABOR MUVEX (30-110°C)	1
Licadora Industrial 3500 RPM		1
Mufla con temperatura de operación de 580°C		1
Termómetro		
Desecador	Giardino 1354-240	1

<b>Insumos</b>	<b>Peso/Volume n</b>	<b>Cantidad</b>
Pituca	kilogramos	10

<b>Materiales de porcelana</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>
Crisoles	-	3

<b>Material de Vidrio</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>
Tubos centrífuga	50 ml	3
Vaso precipitado	50 ml	5
Pipeta volumétrica	10 ml	2
Pipeteador	30 ml	2

<b>Material de acero inoxidable</b>	<b>Malla</b>	<b>Cantidad</b>
Tamizador	175um	1



Tabla 6

*Materiales utilizados en la prueba experimental – Lugar: Laboratorio Ambiental.*

<b>Equipos</b>	<b>Marca</b>	<b>Cantidad</b>
Ph-metro	HANNA-HI9025C	1
Turbidímetro de mesa	HANNA HI-88703	1
Prueba de Jarras	Lovibond ET750	2
Balanza analítica		1
Cilindro (50 litros)	-	1
<b>Insumos</b>	<b>Peso/Volumen</b>	<b>Unid</b>
Sulfato de Aluminio	500	Gramos
Agua destilada	10	Litros
<b>Material de Vidrio</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>
Vaso precipitado	2 litros	12
Vaso precipitado	200 ml	8
Vaso precipitado	50 ml	12
Fiola	1 litro	1
Fiola	200 ml	2
Pipeta	30 ml	2
Pipeta	10 ml	2
Probeta milimetrada	2 litros	4
Embudo	-	2
Varilla	-	2
<b>Material desechable</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>
Arcilla- Caolinita	2 kg	1
Inyectable	5 ml	20
Ligas	-	20
<b>Material de Madera</b>	<b>Unid/ Vol</b>	<b>Cantidad</b>
Cuchilla		1

### 3.3. Métodos

#### 3.3.1. Procedimiento de extracción del almidón de pituca (*Colocassia Esculenta*).

La obtención del almidón de pituca (*Colocassia esculenta*) se realizó de acuerdo a la metodología de extracción húmeda y artesanal propuesto por la FAO (2007) el cual se detalla a continuación.

Se lavó la parte externa de la pituca para eliminar todo resto de impurezas adheridas a las raíces por la exposición de tierra (*Figura 16*).



*Figura 18.* Pituca después de lavar y limpiar la parte externa.

Una vez lavado, se extrajo toda la superficie de cascarilla mediante el uso de cuchillos evitando la pérdida excesiva de almidón, porque la cascarilla también contiene almidón. Se estima la pérdida de 2-3 % del peso total de las raíces (*Figura 17*).



*Figura 19.* Descascarado de pituca.

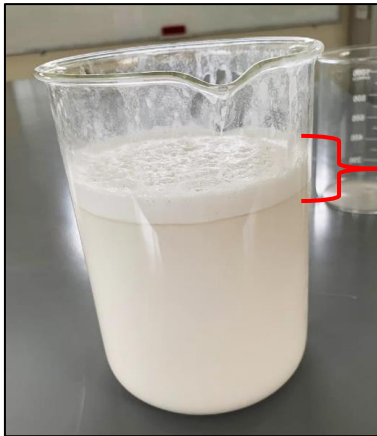
Seguidamente se cortó en pequeños trozos todos los tubérculos con la finalidad de liberar los gránulos de almidón. Luego se los colocó en la licuadora en una proporción de: pituca a un  $\frac{1}{4}$  del volumen del vaso por 1 litro de agua. Se impulsó a 3500 RPM durante 30 segundos aproximadamente.

CIAT (1995) recomienda tener cuidado con el corte o rallado, pues de hacerlo muy fino se tendrían gránulos muy pequeños y el almidón podría sufrir daños físicos en el deterioro enzimático haciendo que el siguiente proceso sea más lento por la pérdida de densidad (*Figura 18*).



*Figura 20.* Pituca cortada en trozos pequeños.

El siguiente paso fue el colado, en el que se empleó tela popelina para lograr la separación de pulpa y material fibroso de la lechada de almidón. Este paso se realizó tres veces para obtener un resultado más limpio, eliminando todo resto de pulpa y disminuyendo el mucílago vegetal. También se quitó la espuma espesa que estaba en la superficie como una capa de nata (*Figura 19*). La lechada de almidón obtenida se dejó reposar en vasos precipitados (*Figura 20*) por un tiempo de 24 horas y luego se extrajo el líquido dejando al material acuoso de almidón asentado en la base del recipiente (*Figura 21*).



Espuma en la superficie de la lechada de almidón, con 1.5cm de espesor.

Figura 21. Lechada de almidón de pituca con espuma en la superficie.



Figura 22. Vasos precipitados con lechada de almidón de pituca antes de sedimentar.



Figura 23. Material acuoso de almidón de pituca luego de sedimentar.

Posteriormente, se empleó el equipo de centrifuga suministrado por el laboratorio CITAL para realizar un segundo proceso de sedimentación a partir del material acuoso de

almidón obtenido. Se colocaron en la centrifuga a 4 000 rpm durante 20 minutos la muestra en 8 tubos de ensayo a un peso de 52.00gr cada uno (*Figura 22*). Luego se extrae la muestra sedimentada, se recomienda extraer primero la capa superficial que podría contener algún resto impuro o mucílago.



*Figura 24. Material acuoso de almidón de pituca en el equipo de centrifuga.*

Luego, se realizó el proceso de secado mediante la colocación de capas delgadas de la muestra en las placas Petri, las que se introdujeron en la estufa del Laboratorio de Química, también de la Universidad Peruana Unión, a una temperatura de 55°C por 24 horas, con el fin de remover la humedad del almidón hasta un 12-13% (*Figura 23*).



*Figura 25. Material acuoso de almidón de pituca en la estufa.*

Posteriormente se retiraron las muestras de la estufa y se colocaron en un mortero para molerlo hasta alcanzar pequeños gránulos de pituca y finalmente, con ayuda del tamizador, se separaron los gránulos finos de los gránulos grandes (*Figura 24*). El proceso de molienda y tamizado se repitió con la finalidad de seguir reduciendo el tamaño de los gránulos (*Figura 25*).



*Figura 26.* Material acuoso de almidón de pituca en la estufa.



*Figura 27.* Tamizado del almidón de pituca para el pesado.

### **3.3.2. Análisis de propiedades tecno funcionales y fisicoquímicos del almidón.**

#### **3.3.2.1. Índice de solubilidad.**

Se empleó la metodología de Ríos (2014). Se preparó 40 mL de suspensión de almidón al 1.0 % (p/v) a base seca; los tubos fueron incubados en baño maría, por 30 minutos durante 60 °C. Luego fueron centrifugadas a 2500 rpm durante 15 minutos. El sobrenadante se decantó y se pesó los gránulos hinchados. Luego del sobrenadante se tomó 10 mL de muestra que fueron secados en una estufa a 120 °C por 4 horas. Se dejó enfriar en un desecador (Ríos, 2014). Se aplicó la siguiente *Ecuación 1*:

$$\text{Índice de Solubilidad (\%)} = \frac{\text{Peso del almidón soluble} \times 400}{\text{Peso de la muestra (b. s)}}$$

*Ecuación 1.* Índice de solubilidad

#### **3.3.2.2. Poder de hinchamiento.**

Para determinar el índice de solubilidad de agua, se aplicó la metodología de Ríos (2014), se aplicó la siguiente *Ecuación 2*:

$$\text{Poder de hinchamiento} \left( \frac{\text{g agua}}{\text{g almidón}} \right) = \frac{\text{Peso de sedimentado} \times 100}{\text{Peso de la muestra (b.s)} - (100 - \text{solubilidad (\%)})}$$

*Ecuación 2.* Formula de poder de hinchamiento

#### **3.3.2.3. Índice de absorción de agua.**

La capacidad de absorción de agua se determinó empleando la metodología de Rodríguez-Sandoval, Lascano, y Sandoval (2012). Se prepararon 40 mL de suspensión de almidón al 1.0 % en base seca, en agua destilada a 30 °C. Se calentaron a una velocidad de 1,5 °C/min hasta alcanzar 60 °C durante 30 minutos con agitación. Se dejaron enfriar a

temperatura ambiente y se centrifugó a 2500 rpm, durante 15 minutos, en una centrífuga. El gel resultante se pesó. Se aplicó la siguiente *Ecuación 3*:

$$\text{Índice de Adsorción de Agua} = (\text{Peso de gel (g)})/(\text{Peso muestra (g)}(\text{b. s}))$$

*Ecuación 3.* Formula de obtención del índice de adsorción de agua.

#### **3.3.2.4. Amilosa.**

La determinación de amilosa y amilopectina se realizó con el método de Anchundia *et al.*, (2016). El contenido de amilopectina se calculó por diferencia al 100% del contenido de amilosa.

#### **3.3.2.5 Humedad.**

La determinación de humedad fue por el método de la AOAC. 925.10, basado en la pérdida de peso que sufre la muestra por calentamiento hasta obtener peso constante.

*Ecuación 4.* Formula de obtención de Humedad

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{(M - m)100}{M}$$

Donde:

M = Peso inicial en gramos de la muestra.

m = Peso en gramos del producto seco

#### **3.3.2.6 Actividad de agua.**

Se midió la actividad de agua (*aw*) de las muestras siguiendo la metodología de los sensores de punto de rocío de Aqualab. Donde la muestra se equilibra dentro de una cámara sellada que contiene un espejo que permite detectar la condensación en él. En el punto de equilibrio la humedad relativa del aire en la cámara es el mismo que la actividad de agua de la muestra. Una célula fotoeléctrica y un termistor detectan el punto exacto en el que se produce la condensación y la temperatura, respectivamente.



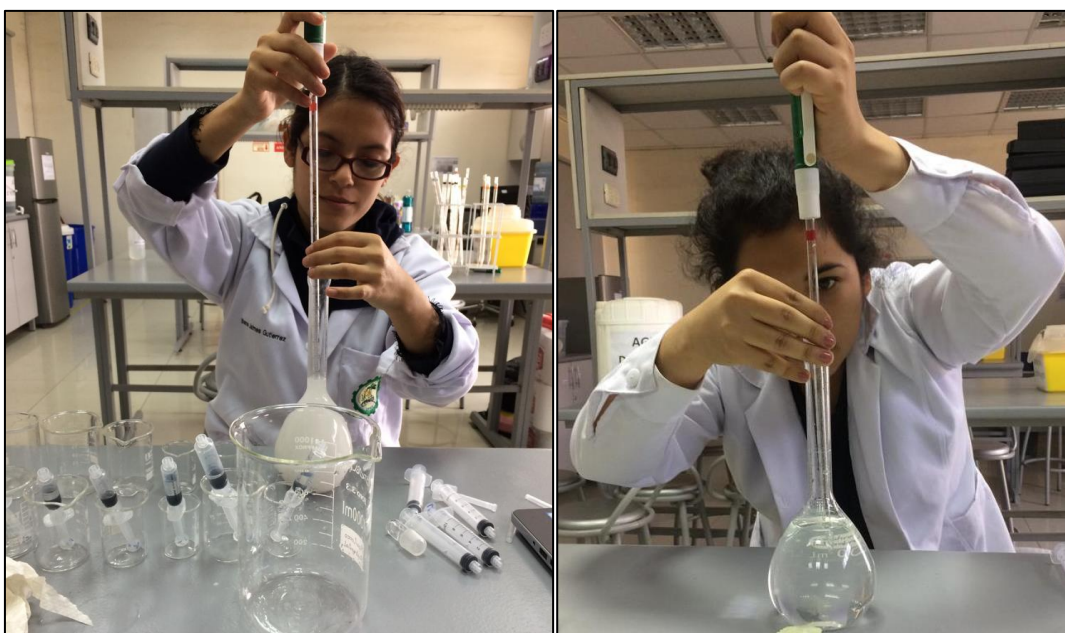
### 3.3.3. Procedimiento de preparación de las muestras.

#### 3.3.3.1. Preparación de la muestra patrón de agua.

La muestra de agua se preparó en laboratorio a una turbiedad de  $400 \pm 10$  UNT, para ello se mezcló agua cruda y arcilla hasta llegar al valor deseado mediante el control constante de los valores de turbiedad a través de un turbidímetro calibrado.

#### 3.3.3.2. Preparación del sulfato de aluminio líquido y solución de almidón de pituca.

Para la preparación de la solución del sulfato de aluminio líquido se pesó 5gr de sulfato de aluminio tipo A y se lo disolvió en 500ml de agua destilada, de la misma manera, la solución de almidón se preparó mezclando 5gr de almidón en 500ml de agua destilada, con el fin de obtener la concentración al 1% en ambas soluciones (*Figura 25*).



(a)

(b)

*Figura 28.* Preparación de la solución de almidón de pituca (a) y de sulfato de aluminio.

Fuente: Propia

### 3.3.3.3. Preparación de la solución de ácido clorhídrico al 10%.

Para la obtención de la solución de ácido clorhídrico al 10%, se diluyó 25 ml de este compuesto en 250ml de agua destilada.

### 3.3.3.4. Preparación de solución hidróxido de sodio al 5%.

Para la obtención de la solución de hipoclorito de sodio al 5%, se emplearon 10 gr de hipoclorito de sodio sólido que se diluyeron en 250 ml de agua destilada.

### 3.3.4. Métodos de evaluación en la prueba de Jarras.

Se utilizó el método de índice de floculación de Willcomb (Vargas L, 2004) para evaluar el crecimiento continuo de los flocs al momento de iniciar la velocidad lenta. En la Tabla 7 se observa los índices de evaluación, los cuales tienen un rango de 0-10, donde el nivel 0 describe no presentar signo de aglutinación y el nivel 10 que el flóculo se deposita totalmente.

Tabla 7.

*Número e índice de floculación de Willcomb.*

<b>Número del índice</b>	<b>Descripción</b>
0	<i>Flóculo coloidal.</i> No presenta signo de aglutinación.
2	Visible. Flóculo formado y uniformemente distribuido. (Sedimentación muy lenta o no sedimenta.)
4	<i>Disperso.</i> Flóculo de tamaño grande relativamente, precipita Lentamente
6	<i>Claro.</i> Flóculo de tamaño considerablemente grande, pero precipita con lentitud.
8	<i>Bueno.</i> Flóculo se deposita rápidamente, más no completamente.
10	<i>Excelente.</i> Flóculo se deposita completamente, con agua cristalina.

Fuente: Vargas L (2004).

Una vez finalizado el tiempo de reposo, se descartó aproximadamente 10 ml de

agua con ayuda de un sifón, y después se tomó un poco más de 30ml de muestra para determinar la turbiedad.

### **3.3.5. Diseño experimental y análisis estadístico.**

#### **3.3.5.1. Diseño factorial al azar.**

Para verificar el tratamiento óptimo de sulfato de aluminio se utilizó el diseño estadístico factorial al azar de un parámetro mediante la prueba de Jarras, proceso de coagulación y floculación

El equipo de prueba de jarras consta de seis remos que remueven el contenido de seis envases o vasos, mismo que deben ser de dos litros (L). Este envase actúa como un control mientras que su funcionamiento puede variar a medida que se con *Figura* las revoluciones por minuto (RPM) para realizar un control uniforme de la velocidad de mezclado en todos los contenedores (Samame V, 2016).

El procedimiento de la prueba de jarras consistió en colocar 2 litros de la muestra de agua a  $400 \pm 10$  UNT en cada uno de los 6 recipientes, beakers de 2000ml, pero en cada jarra se colocó una dosis distinta del coagulante, las dosis fueron de 5, 10, 15, 20, 30 y 40mg/l de sulfato de aluminio que fueron adicionadas a través de jeringas que contenían los volúmenes referentes a cada dosis, determinados a través de la fórmula básica de dilución química expresada en la *Ecuación 4*.

*Ecuación 5.* Determinación de dosis de sulfato de aluminio

$$C1 \times V1 = C2 \times V2$$

Dónde:

*C1: Concentración inicial (mg/L)*

*V1: Volumen inicial (mL)*

*C2: Concentración final (mg/L)*

*V2: Volumen final (mL)*

Al aplicarse la fórmula en todas las dosis, se obtuvieron los valores que se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8

*Valores de Concentración, Dosis y Volumen del coagulante a emplear en cada jarra para factorial al azar*

<b>Parámetros</b>	<b>N° de Tratamientos</b>					
	<i>T1</i>	<i>T2</i>	<i>T3</i>	<i>T4</i>	<i>T5</i>	<i>T6</i>
<i>Concentración (%)</i>	1	1	1	1	1	1
<i>Dosis (mg/L)</i>	5	10	15	20	30	40
<i>Volumen (mL)</i>	1	2	3	4	6	8
<i>UNT</i>	-	-	-	-	-	-

Una vez determinado el volumen a colocar en cada jarra, se procede a verter el contenido de cada jeringa precisamente en el momento en que inicia la mezcla rápida. En la etapa de mezclado rápido se empleó una velocidad de 100rpm durante un minuto. Transcurrido este tiempo la velocidad disminuyó a 40rpm por un tiempo de veinte minutos, para dar lugar a la etapa de mezcla lenta, en la que se realiza el proceso de floculación. Y finalmente se dejó reposar las muestras a una velocidad de 0rpm por un tiempo de diez minutos para la etapa de sedimentación (CEPIS, 1993), tal como se detalla en la Tabla 9.

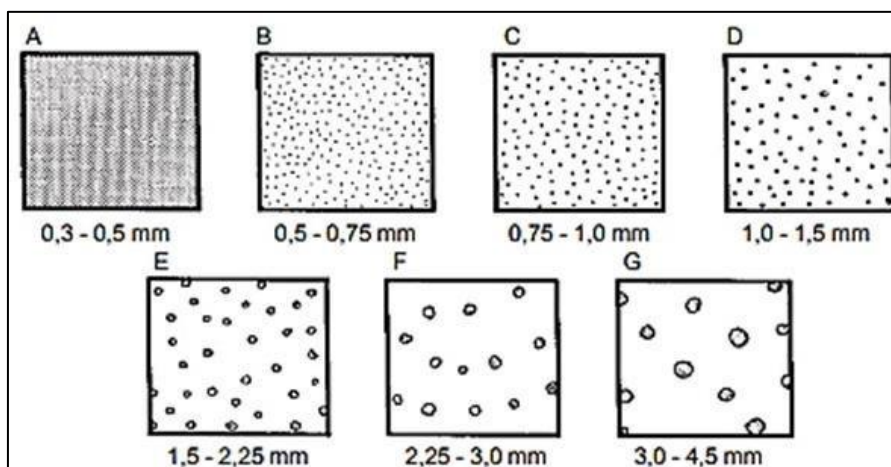
Tabla 9

*Metodología de trabajo en la Prueba de Jarras: Velocidad y tiempo en cada etapa.*

<b>Metodología de Prueba de Jarras</b>			
<b>Parámetros</b>	<b>Etapas</b>		
	<i>Coagulación</i>	<i>Floculación</i>	<i>Sedimentación</i>
<i>Velocidad (rpm)</i>	100	40	0
<i>Tiempo (min)</i>	1	20	10

Nota: Los parámetros señalados fueron propuestos por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.

Desde que inicia la prueba, es necesario observar el comportamiento de cada jarra, para conocer el tiempo de formación de flocs, el tamaño, entre otros factores, que pueden ser evaluados cualitativamente de acuerdo a sus características. El tamaño de los flóculos puede expresarse en milímetros (mm) según lo establece el Water Research Institute de Inglaterra (*Figura 25*) o también el Índice de Willcomb (*Tabla 7*).



*Figura 29.* Método WRA (Vargas, 2004).

Los ensayos se realizaron con los factores determinantes, el primer factor es el tipo de coagulante diferenciado por su naturaleza (Sulfato de aluminio – Tipo A) y polímero natural (*Colocassia esculenta*) y el segundo factor es la turbiedad inicial ( $400 \pm 10$ UNT) el cual actúa sobre la variable dependiente a evaluar. En la tabla 17 se expone los resultados obtenidos del ensayo de laboratorio de dosis óptima del coagulante químico siendo la dosis óptima los valores dados en la jarra N° 4 (4ml).

Luego de las pruebas realizadas, se escoge como dosis óptima en esta primera etapa, aquella concentración de sulfato dará como resultado el nivel más bajo de turbidez respecto a la turbidez inicial, teniendo así la concentración de coagulante como punto medio para realizar y determinar la dosis del almidón de pituca ejecutado al 1%. a través de la figura 28 se muestran las mediciones de pH de la muestra patrón y *Jar Test* aplicado para obtener la solución dosis de sulfato.



Figura 30. Medición de pH en agua patrón (a) y Test de jarras aplicando las variables independientes (b).

### 3.3.5.2. Superficie de respuesta por diseño compuesto central rotacional.

Se empleó el diseño compuesto central rotacional (DCCR) que consisten en un diseño factorial  $2^3$  con 8 puntos factoriales, 6 puntos axiales y tres puntos centrales, totalizando 17 experimentos, con el fin de evaluar la eficiencia de remoción de la mezcla. Los rangos y niveles de las variables independientes usados en la forma codificada y no codificada en este estudio son mostrados en la Tabla 10 y 11. Las variables dependientes: Turbiedad residual del agua medida en unidades nefelométricas. Las variables Independientes: Dosis de coagulante (mg/L); velocidad de mezcla lenta (RPM) y pH.

Los experimentos fueron ejecutados en orden aleatorio y los datos fueron analizados por regresiones múltiples usando un método de mínimos cuadrados (Rodríguez & Iemma, 2014). La viable respuesta o dependiente (Y) fue generada en componentes lineal, cuadrático e interactivo y los datos experimentales fueron ajustados al modelo polinomial de segundo orden como es mostrado en la siguiente ecuación 6.

Ecuación 6. Ecuación polinomial para la obtención del modelo matemático

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^2 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^2 \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i \neq j=1}^2 \beta_{ij} X_i X_j$$

Donde:

$Y$ : Respuesta predicha medida (Turbiedad, Remoción)

$\beta_0$ : Intercepto

$\beta_i$ ,  $\beta_{ii}$  y  $\beta_{ij}$ : Coeficientes del modelo (lineal, cuadrático e interacción, respectivamente)

$X_i$  y  $X_j$ : Valores codificados de las variables independientes (pH, Dosis de almidón y Velocidad lenta (RPM)).

En la Tabla 10 y 11 se muestran las variables y parámetros propuestos para aplicarlo en base a la metodología de superficie de respuestas.

Tabla 10

*Niveles y parámetros de DCCR del proceso de coagulación/floculación.*

<b>Variable/Niveles</b>	<b>-1.68</b>	<b>-1</b>	<b>0</b>	<b>+1</b>	<b>+1.68</b>
X <sub>1</sub> : pH	5.3	6	7	8	8.7
X <sub>2</sub> : Dosis de almidón (%)*	24.8	35	50	65	75.2
X <sub>3</sub> : Velocidad lenta (RPM)	31.6	35	40	45	48.4

Tabla 11

*Variables codificadas, no codificadas y variables dependientes del diseño DCCR en el proceso de coagulación y floculación.*

Variables						
Ensayos	Codificados			No codificados		
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	pH	Dosis de almidón (%)	Velocidad (RPM)
1	-1.0	-1.0	- 1.0	6	35	35
2	+1.0	-1.0	- 1.0	8	35	35
3	-1.0	+1.0	- 1.0	6	65	35
4	+1.0	+1.0	- 1.0	8	65	35
5	-1.0	-1.0	+1 .0	6	35	45
6	+1.0	-1.0	+1 .0	8	35	45
7	-1.0	+1.0	+1 .0	6	65	45
8	+1.0	+1.0	+1 .0	8	65	45
9	-1.68	0.0	0.0	5.3	50	40
10	+1.68	0.0	0.0	8.7	50	40
11	0.0	-1.68	0.0	7	24.8	40
12	0.0	+1.68	0.0	7	75.2	40
13	0.0	0.0	- 1.68	7	50	31.6
14	0.0	0.0	+1 .68	7	50	48.4
15	0.0	0.0	0.0	7	50	40
16	0.0	0.0	0.0	7	50	40
17	0.0	0.0	0.0	7	50	40



### 3.3.6. Análisis estadísticos.

Para realizar el análisis estadístico de diseño factorial al azar de un parámetro fue evaluado el mejor tratamiento a un nivel de significancia de 5% ( $p \leq 0.05$ ) y para el diseño de superficie de respuesta, fueron generados por el modelo lineal y cuadrático los cuales se usaron para mostrar la relación entre la respuesta y los niveles de cada variable independiente y deducir los parámetros y niveles maximizados. Además, se analizaron a un nivel de significancia de 5 % ( $p \leq 0.05$ ).

Para optimizar los parámetros y niveles, los valores óptimos de las variables independientes seleccionadas fueron obtenidos por el gráfico de superficie de respuesta y contorno. Además, el modelo de regresión polinomial fue evaluado por el análisis de varianza (ANOVA).

Para el diseño de metodología de superficie de respuesta para generar un modelo cuadrático, se analizó por ANOVA el coeficiente de determinación del modelo ( $R^2$  y  $R^2$  adj). Conforme Barros Neto, Scarmino y Bruns (2001) y Khru y Cornell (1996), el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) mide la proporción de variación total de la respuesta que es explicada por el modelo, de modo cuanto mayor  $R^2$ , esto es cuando más cercano a 1, menor será el error y mejor será el ajuste del modelo a las respuesta observadas (Barros et al., 2003). Posteriormente fue analizado el ajuste del modelo si es representativo y predictivo en la regresión a través de la prueba F y en el residuo a través de la falta de ajuste y error puro ( $SS_{Residual} = SS_{Error\ puro} + SS_{Falta\ de\ ajuste}$ )

Para que el modelo matemático sea considerado predictivo en la regresión, el  $F_{calculado}$  debe ser mayor que el  $F_{tabulado}$  (Garcia, 2012). Según Bruns et al. (2003) y Araujo (2008) indican que un modelo representativo es cuando el  $F_{calculado}$  de la regresión en relación a los residuos sea al menos 3 veces mayor que el  $F_{tabulado}$ , indicando que la

variación es explicada por la regresión del modelo y no por los residuos. Corroborando con Barros Neto, Scarminio y Bruns (2001), reportan que el valor  $F_{\text{calculado}}$  debe ser en lo mínimo de 4 a 5 ( $F^*$ ) veces el valor de  $F_{\text{tabulado}}$  para asegurar que la regresión sea significativa estadísticamente y el modelo útil para fines predictivos. Por otro lado, Khuri y Cornell (1996) afirma para que la regresión de modelo sea significativo y predictivo, la fracción  $F_{\text{calculado}}/F_{\text{tabulado}}$  debe ser mayor que 10.

Todos los análisis estadísticos se realizaron a un nivel de significancia de 5% ( $p \leq 0.05$ ), usando el software STATISTICA versión 13.1 (Arruda, Pereira, & Pastore, 2016)..

**CAPITULO IV**  
**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

**4.1. Resultados de las propiedades tecnofuncionales y fisicoquímica del almidón**

Las propiedades de los almidones son potenciales coagulantes para remover partículas suspendidas comparadas con los coagulantes inorgánicos, además, requieren menores dosis; como también se han caracterizado por sus propiedades estructurales y su potencial como alternativa a los coagulantes metálicos en el tratamiento de agua (Guzmán *et al.*, 2018). En la tabla 12 se muestran los datos obtenidos de la caracterización del almidón de Pituca (*Colocassia esculenta*).

Tabla 12.

*Propiedades tecnofuncionales y fisicoquímicas del almidón de pituca*

Propiedades	Valores de réplicas y medias			
	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	M	DS
Pode de hinchamiento en agua (%)	10.52	11.64	11.08	0.791
Índice de solubilidad de agua (g/gel)	8.54	9.61	9.08	0.756
Índice de absorción de agua (g/gel)	3.41	2.82	3.12	0.417
Humedad (%)	10.31	11.89	11.10	1.117
Actividad de agua (Aw)	0.57	0.61	0.59	0.09
Amilosa (%)	26.4	27.1	26.8	1.20
Amilopectina (%)	73.6	72.9	73.2	1.20

*Fuente: propia*

Las propiedades tecnofuncionales dependen de la relación de amilosa/amilopectina como también los factores genéticos y por factores como tiempo y época de cosecha la edad de tubérculo, época de cosecha, fertilidad de suelo entre otras (Jiménez y Martínez,

2016). Rapelo *et al.* (2013) indican que el contenido de amilosa para Pituca variedad blanca fue de 20,50 a  $\pm 0,2$  (%).

El poder de hinchamiento en agua (PHA) de este trabajo presentó un PHA de 11,64  $\pm 0,79$  %, lo que puede atribuirse a la ruptura de los gránulos de almidón a temperatura ambiente y la consecuente liberación de toda la amilosa de la red de amilopectina; trabajos realizados por Charles *et al.* (2007) y Nuwamanya *et al.* (2009) reportaron valores de poder de hinchamiento de almidón de mandioca entre 7,87 - 10,77%.

El Índice de solubilidad de agua (ISA) fue de 9,08  $\pm 0,75$  valores relativamente menor reportados por Rapelo *et al.* (2013) donde encontraron en almidón de malanga (*Colocasia esculenta*), valores para las variedades blanca y morada 12,8  $\pm 0,3$  y 23,07  $\pm 0,21$ , respectivamente. Sin embargo, según otras fuentes, en el almidón de yuca el índice de solubilidad en agua varía entre 0,27-12,32 % (Aristizábal, Sánchez y Mejía, 2007); según Araujo de Vizcarrondo (2004), los valores deben variar entre 0,27–12,32%, a su vez, García, Pinzón, Sánchez (2012) encontraron valores de 2 a 3,3% de ISA mostrando una baja solubilidad en agua en comparación a los datos encontrados en el presente trabajo.

El índice de absorción de agua (IAA) fue de 3.12  $\pm 0.42$ g/gel almidón, cumpliendo el rango dado por Aristizábal y Sánchez (2007) de 0,82–15,52 g gel/g de almidón, valores relativamente mayores a los trabajos reportados por Rapelo *et al.* (2013) que encontraron valores para el IAA de los almidones de malanga (*Colocasia esculenta*) variedad blanca y morada de 1,79  $\pm 0.1$  y 1,88  $\pm 0.02$ , respectivamente. García, pinzón y Sánchez, (2012) reportaron valores entre 10,7–11,1 g gel / g almidón de mandioca indicando que el almidón posee un alto índice de absorción de agua, ya que al suministrar calor la suspensión acuosa del mismo, los gránulos se hinchan aumentando su tamaño. Estas diferencias en el IAA de almidones nativos de malanga, papa y mandioca están relacionadas con la fuente biológica, con el tamaño y la forma del gránulo (Lindeboom, Chang y Tyler, 2004).

El contenido de humedad fue de  $11.10 \pm 1.12$  % relativamente menor con trabajos reportados por Rapelo *et al.* (2013) para almidones de malanga (*Colocasia esculenta*) variedad blanca y morada obtuvieron valores de  $14,49 \pm 0.04$  % y  $14,29 \pm 0.05$  %, respectivamente. Palomino, Molina y Pérez (2010) determinaron valores para almidón de malanga entre 9,47 % – 10,82 %) y 8,2 % a 9,6 % reportados por Aboubakar, Njintang, Scher y Mbofung (2008) y menores de 6 % (Ferreira, Ortiz y Pardo, 1990).

Además, el porcentaje de humedad del almidón de pituca blanca fue de 10.31 %, cifra optima a comparación de resultados obtenidos por Torres, Montero, Duran (2013), quienes en su investigación determinaron que el porcentaje de humedad de la malanga blanca 14.29%. Otros autores como Palomino, Lomina y Pérez (2010) Obtuvieron resultados de 10.82%. Estas diferencias se atribuyen a la técnica empleada. Ferreira y Ortiz (1990) aplicaron el método Ksarl Fisher el cual se obtuvo resultados mayores dados por el grado de temperatura y tiempo aplicado en la estufa (150°C).

La actividad de agua para el almidón de pituca fue de 0.59, indicando que se encuentra dentro de los valores para evitar el crecimiento microbiano. Con respecto a la cuantificación de la amilosa y amilopectina, los resultados fueron de 26.8 y 73.2% respectivamente. Estudios realizados por Orccottoma (2012) para determinar la amilosa y amilopectina tuvieron resultados para amilosa y amilopectina de 25 y 75% respectivamente, relativamente similar del presente trabajo.

#### **4.2. Resultados de cuantificación de turbiedad por factorial al azar**

OMS (1988) indica que la determinación del coagulante químico es importante para determinar la eficiencia de eliminación de partículas en las operaciones de coagulación, floculación y clarificación. Además, afecta directamente en la eficiencia de eliminación de partículas de las unidades de filtración, así como en la eficiencia de la desinfección.

Los resultados expuestos son de ensayos realizados en el laboratorio mediante el *Jar Test*, que determinó los parámetros de dosis y concentración óptima de coagulante de sulfato de aluminio a prueba con el agua patrón. En la Tabla 13 se exponen los resultados obtenidos tras la ejecución de la obtención de la dosis óptima del coagulante químico.

Tabla 13

*Resultados de ensayo de laboratorio de dosis óptima del coagulante químico Sulfato de Aluminio – Tipo A*

<b>Sulfato de Aluminio - Tipo A</b>						
Turbiedad	400 UNT		pH		6,9	
			Temperatura		25 °C	
<b>Dosis</b>	5	10	15	20	30	35
<b>Cantidad (mL)</b>	1	2	3	4	6	8
<b>Tratamientos</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>T6</b>
<b>Replica 1 (UNT)</b>	5.40	1.53	1.28	1.18	2.23	2.3
<b>Replica 2 (UNT)</b>	5.30	1.40	1.30	0.58	1.6	1.7
<b>Replica 3 (UNT)</b>	5.47	1.8	1.31	0.90	2.4	1.64
<b>Media</b>	4.59	1.576	1.296	0.886	2.076	1.88
<b>SD</b>	1.37	0.204	0.015	0.300	0.42	0.3675

Las medias obtenidas en la Tabla 13 muestran que los tratamientos tres y cuatro presentan valores más aceptables, siendo mejor el cuarto tratamiento con un resultado de  $0.886 \pm 0.3$  UNT siendo verificado a través de la Figura 29.

A partir de la Tabla 13, se obtuvo los resultados de 17 ensayos aplicando el coagulante químico y coagulante natural mediante réplicas por el método del *Jar Test* para determinar el alcance de la variable de concentración de dosis de almidón detalladas en las Tablas 14 y 15.

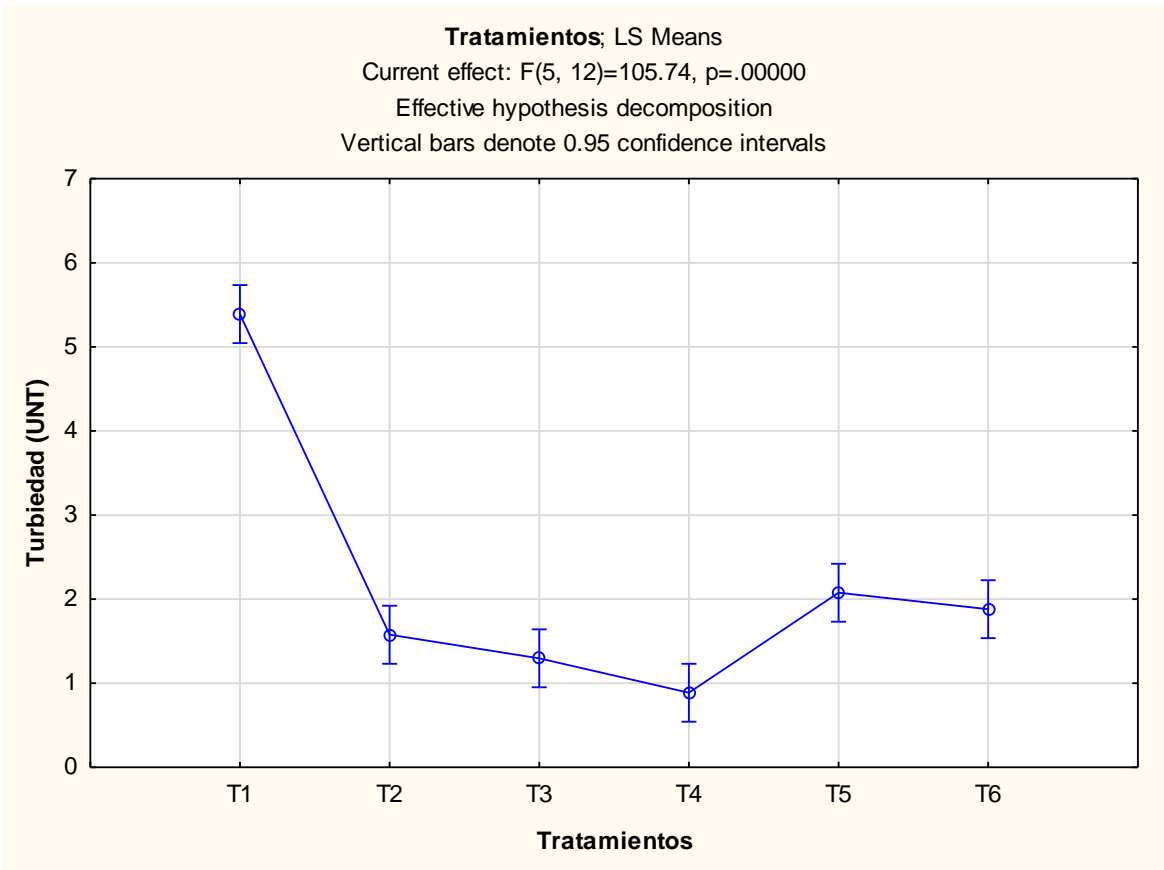


Figura 31. Determinación de dosis óptima del sulfato de aluminio.

En la *Figura 29* verifica la diferencia significativa entre los tratamientos ( $p < 0.05$ ) debido al comportamiento entre la turbidez final y la dosis de sulfato de aluminio conforme aumenta su dosificación. De acuerdo a los resultados en los ensayos triplicados, se determinó que a una turbidez inicial de 400 UNT, la dosis óptima resultante fue de 20 mg/L de coagulante químico, con la que se alcanzó los niveles más bajos de turbidez en T<sub>4</sub>.

**4.3 Análisis Costo – Beneficio**

Hoy en día los coagulantes usados para la clarificación del agua son de tipo inorgánico lo cual acarrea desventajas tanto ambientales como económicas debido a que genera lodos constituidos por sustancias inorgánicas que alteran los procesos naturales

presentes en las fuentes de agua a las cuales con vertidos estos lodos que se generan en las etapas de floculación-coagulación y sedimentación (Torres J, 2019).

La OMS (1988) menciona que la coagulación y la floculación requieren una inversión económica relativamente importante en la instalación, los depósitos, los productos químicos y el mantenimiento. Inevitablemente, pues, el costo del agua así tratada resulta alto.

Desde el punto de vista económico, los coagulantes inorgánicos son más costosos al tratarse de químicos que en su producción, pues se trata de un compuesto químico que contienen electrolitos los cuales van a desestabilizar las cargas eléctricas de las partículas que traiga el agua al ser tratada; en su proceso de fabricación se consume energía y materia, lo que se traduce en costos de producción, además se generan residuos que causan contaminación al medio ambiente.

Por otra parte, los coagulantes naturales son de bajo costo, permiten la implementación de métodos naturales para el tratamiento de los lodos generados. Pues son componentes naturales que va a actuar en el agua sin alterar sus propiedades químicas originales. Sin embargo, estos coagulantes no son utilizados a escalas mayores o en tratamientos para plantas potabilizadoras que sean para poblaciones grandes, sino que son aplicados para acueductos regionales o como investigación de universidades. (García B., Rivera F., Arnal J.M., et al, 2014)

La técnica puede ser interesante para algunas comunidades pequeñas, como los asentamientos en las zonas periurbanas, a las que puede llegar fácilmente el mantenimiento del agua. La coagulación también puede ser útil para contribuir a eliminar algunos contaminantes químicos tales como el fluoruro. En general, sin embargo, la técnica es demasiado difícil de aplicar y de controlar satisfactoriamente en las comunidades rurales más aisladas (OMS, 1988).



Investigaciones como Olgúin B (2013) pudo comprobar que el coagulante natural aplicado (mucílago de la tuna) resultó ser igual de efectivo que el sulfato de aluminio y demostró que los costos en su aplicación serían bajos y 100% aprovechable, con sólo 1.2 gramos de mucílago logró purificar un litro de agua.

#### 4.4. Resultados para la cuantificación de turbiedad

Tabla 14.

*Variables codificadas, no codificadas y variables dependientes del DCCR en el proceso de coagulación y floculación.*

Ensayos	Variables independientes						Variable dependiente	
	Codificados			No codificados			Cuantificación de turbidez (UNT)	
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	pH	Dosis (%)	Velocidad (RPM)	$R_1$	$R_2$
1	-1	-1	-1	6	35	35	10	10
2	1	-1	-1	8	35	35	3.3	2.7
3	-1	1	-1	6	65	35	8.1	8.9
4	1	1	-1	8	65	35	6.8	6.4
5	-1	-1	1	6	35	45	10	15
6	1	-1	1	8	35	45	3.4	2.7
7	-1	1	1	6	65	45	50	45
8	1	1	1	8	65	45	3.6	3.7
9	-1.68	0	0	5.3	50	40	31	30
10	1.68	0	0	8.7	50	40	4	4.5
11	0	- 1.68	0	7	24.8	40	6.4	9.2
12	0	1.68	0	7	75.2	40	6.1	11
13	0	0	-1.68	7	50	31.6	5.6	5.8
14	0	0	1.68	7	50	48.4	5.4	5
15	0	0	0	7	50	40	9.2	10
16	0	0	0	7	50	40	9.8	13
17	0	0	0	7	50	40	9.6	11.3

García E, Crehuet F., (1999) mencionan que la turbidez tiene una gran importancia sanitaria, debido a que refleja una aproximación del contenido de materiales coloidales, minerales u orgánicos e indicio de contaminación, además, influye en la aceptabilidad del

agua para los consumidores como en la selección y la eficiencia de los procesos de tratamiento (OMS,1998). Marcó L, Azario R, Metzler C y García (2004) indican que todo riesgo se acentúa cuando la turbidez es superior a 5 UNT debido a la propagación de bacterias, algas que pueden manifestarse y promover enfermedades crónicas en el ser humano. Por esta razón, los resultados obtenidos con mayor eficiencia en cuantificación de turbidez en la Tabla 15 son los valores menores a 5 UNT. Siendo los ensayos 2, 3, 6 y 8 logrando 2.7, 3.4, 2.7, 3.6 UNT debido a la influencia de los parámetros propuestos.

El pH óptimo variará en función a la composición y naturaleza de los materiales empleados en el sistema de tratamiento de aguas, tiende a oscilar entre los 6.5 y 8, por lo cual, se considera un parámetro operativo e importante en la calidad de agua (OMS, 1988). Los resultados obtenidos para el parámetro de cuantificación de turbidez en la Tabla 15 demuestran que el pH a un valor de 8 fue significativo e influyente en los ensayos 4, 6 (6,4 y 3,7), mientras que en una muestra con valor propuesto de pH a 8.7, logró una reducción de turbidez de 4.5 y 4.7 UNT. Este último caso, puede darse como modelo de las causas ambientales que alteran el pH de fuentes hídricas, siendo las causas principales los vertidos accidentales, averías en las instalaciones de tratamientos y de fallas en el revestimiento de tuberías (OMS,1988). En los ensayos generados a un pH 6 se observan una variación de resultados mayores a 5 UNT, siendo de mayor resultado el ensayo 7 y el mínimo a una turbidez de 8.1 UNT en el ensayo 3.

Por otro lado, el rango de pH varía en función al tipo de coagulante, auxiliar de coagulación y la naturaleza del agua. Para las sales de aluminio, el rango óptimo de pH es de 6.5 a 8.0 (Andía, 2000) por ello, si se trabaja fuera de ese rango se requiere dosis más altas de coagulante dado que la cantidad de dosis empleado influye directamente en la eficiencia de coagulación (Andía, 2000). En los ensayos 7 y 8 presentan dosificación y variación de mezcla semejante (50% dosis-45 RPM) siendo empleado a pH diferente de 6 y 8 UNT, obtienen resultados distintos (50 UNT – 3,6 UNT) comprobando la influencia de pH logra mejor remoción de turbidez mientras que, a dosis bajas no logra neutralizar

completamente la carga de las partículas coloidales, lo que ocasiona una débil, escasa formación de micro flóculos pequeños y con baja capacidad de sedimentación, por tanto, se obtiene lodos residuales elevados y dificultad de solubilidad del coagulante químico (Romero J, 2002) impidiendo la degradación de los lodos, reactivando los compuestos del polímero químico y por tanto, la contaminación de fuentes hídricas. Gabriela & Jaramillo (2015) estudiaron referente a los lodos residuales donde determinaron que existe un beneficio ambiental en la reducción de su toxicidad, así como en la reducción de costos de manejo y disposición final del lodo, al no tener sustancias tóxicas que tratar.

Por otro lado, se observa que la velocidad de mezcla influye en crecimiento y aglomeración de los flóculos debido a que permite el contacto entre los flocs promoviendo mayor tamaño y peso necesario para sedimentar con facilidad. Sin embargo, a una velocidad mayor, los flóculos corren el riesgo de romperse y raramente vuelven a retomar su tamaño y fuerza (Andía Y, 2000) como se observa en el ensayo 6 en cual se dosificó a 65% obteniendo resultados máximos de 50 y 45 UNT.

A través del método de Willcomb y WRA se observó en las pruebas de *Jar test* de los ensayos 1 y 4, aplicados a 35 RPM de mezcla lenta, tuvieron mayor notoriedad de crecimiento de los flóculos, sin embargo, el ensayo 4, empleado a mayor dosis de coagulante natural (65%), logró mayor remoción de turbiedad, a pesar de no lograr valores menores a 5 UNT, se obtuvo un valor de 6.4 UNT a comparación del ensayo 1 el cual logró un resultado de 10 UNT. Por otro lado, en los ensayos propuestos a valores de 35 y 45 RPM se mostró la influencia del parámetro de pH y dosis de almidón porque condiciona el comportamiento de los flocs.

**Tabla 15.***Análisis de Varianza (ANOVA) para la cuantificación de turbidez para DCCR*

<b>Factor</b>	<b>SS</b>	<b>dF</b>	<b>MS</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
(1)Velocidad (RMP)(L)	208.991	1	208.991	75.4790	0.000000*
Velocidad (RMP)(Q)	45.928	1	45.928	16.5873	0.000649*
(2)Dosis de almidón %(L)	222.485	1	222.485	80.3526	0.000000*
Dosis de almidón %(Q)	4.866	1	4.866	1.7574	0.200665
(3)pH(L)	1656.253	1	1656.253	598.1714	0.000000*
pH(Q)	172.763	1	172.763	62.3949	0.000000*
1L by 2L	280.562	1	280.562	101.3278	0.000000*
*1L by 3L	492.840	1	492.840	177.9939	0.000000*
2L by 3L	214.623	1	214.623	77.5130	0.000000*
Lack of Fit	703.331	5	140.666	50.8029	0.004000*
Pure Error	52.608	19	2.769		
Total SS	4146.266	33			
R <sup>2</sup>			82.0 %		
R <sup>2</sup> adj			75.0 %		

b) *Prueba de Fisher para la predicción del modelo en la reducción de la turbidez*

<b>Factores</b>	<b>SS</b>	<b>dF</b>	<b>SS/dF</b>	<b>F<sub>calculado</sub></b>	<b>F<sub>tabulado</sub></b>	<b>F*</b>
<b>Regresión (L) y (Q)</b>	3299.311	9	366.59	11.63	2.3	5.1
<b>Error residual</b>	755.939	24	31.49			
<b>Total SS</b>	4136.266	33				

La Tabla 15 (a) muestra el ajuste de la regresión Lineal (L) y Cuadrática (Q) para la cuantificación de la turbidez (UNT) indicando un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 82 % y coeficiente de determinación ajustado ( $R$ -adj) = 75.0 % al 95% de nivel de confianza siendo los factores de velocidad de agitación (L) (Q) y pH (L) (Q) más significativas en la cuantificación de turbidez dado que el p – valor de los factores mencionados tienen alcance de mayor nivel de significancia.

En la Tabla 15 (b) muestra la prueba de F para verificar la predicción del modelo siendo el valor  $F^*$  de 5.1 indicando que el modelo de la regresión (L) y (Q) es estadísticamente predictiva (Barros Neto, Scarminio y Bruns, 2001).

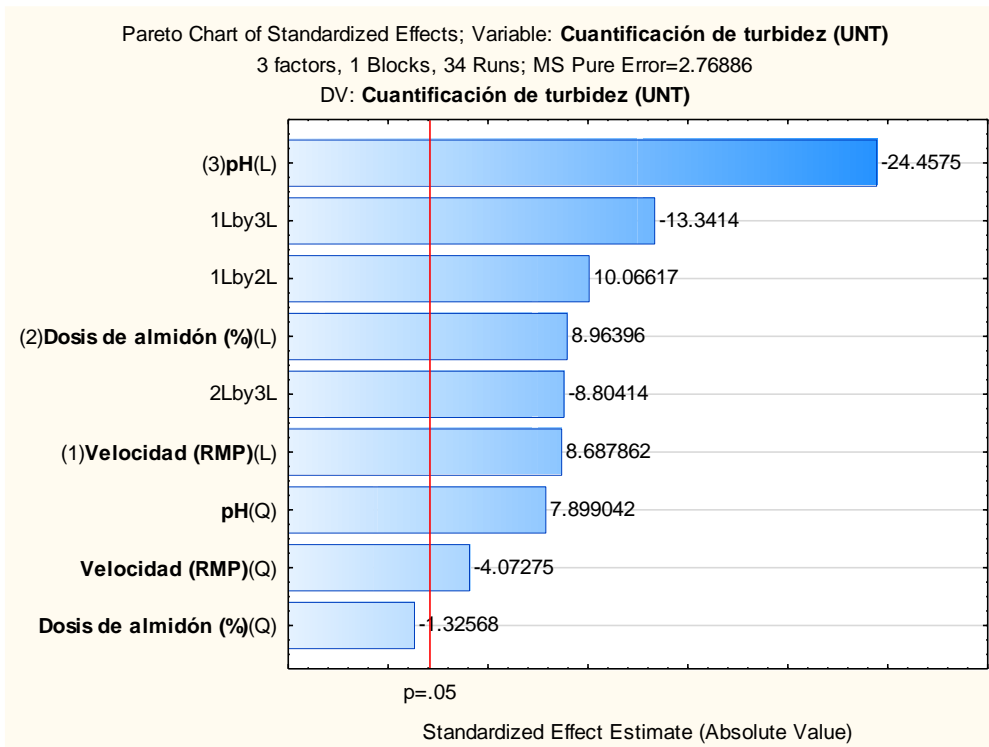


Figura 32. Diagrama de Pareto para la cuantificación de turbidez (UNT)

En la Figura 29 se presenta el diagrama de Pareto en base a la cuantificación de turbidez mostrando el valor de pH un grado de influencia mayor en comparación con las interacciones de los factores conjugados dado que su efecto modifica de significativamente el comportamiento de otros elementos en el agua.

Los resultados obtenidos en la conjugación de valores para la remoción de la turbidez muestran que las variables velocidad de mezcla / pH tuvieron mayor grado de influencia ya que modifican la frecuencia de los cambios de dirección del proceso de mezcla e influyen en el comportamiento del coagulante natural a comparación de las combinaciones de velocidad de mezcla / dosis de almidón de pituca (%) por que la dosis de almidón a una velocidad de mezcla lenta menor no logra la desestabilización de los coloides y por tanto no beneficia su aglomeración (Acosta, 2006) ,por tanto, el resultado con menor valor significativo es la variables de dosis de almidón de pituca (%). Sin embargo, el comportamiento de los factores y sus combinaciones evidencia que el modelo lineal es compatible con la muestra.

#### 4.5. Superficie de respuesta para la cuantificación de la turbidez

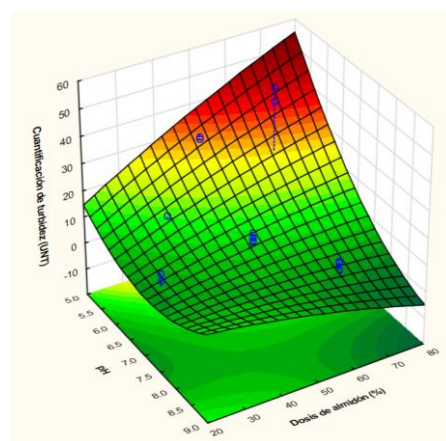
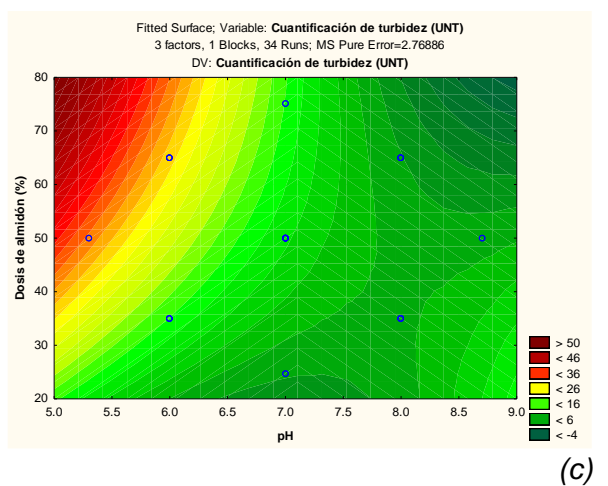
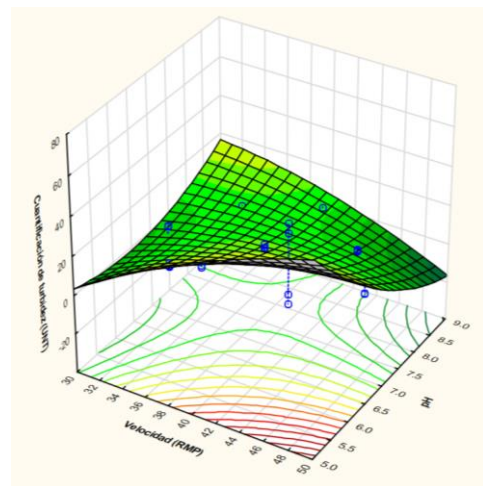
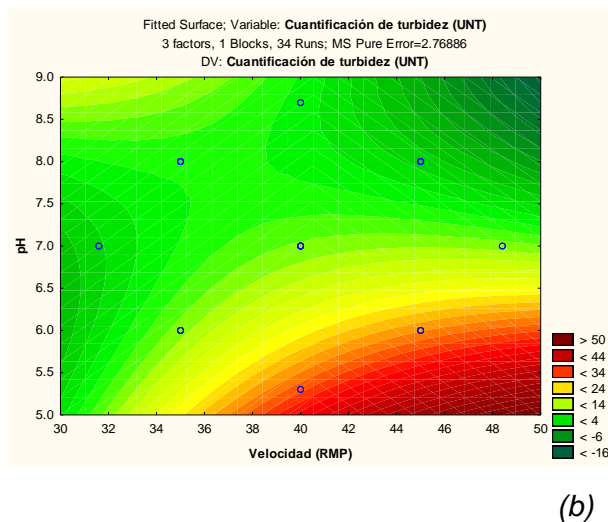
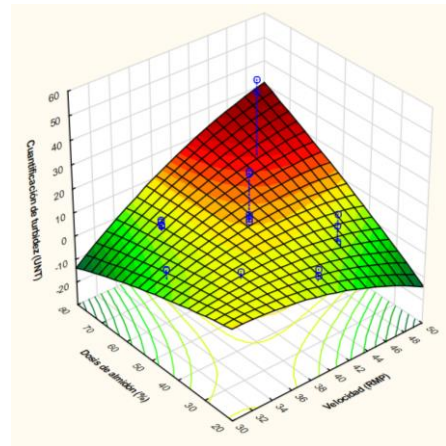
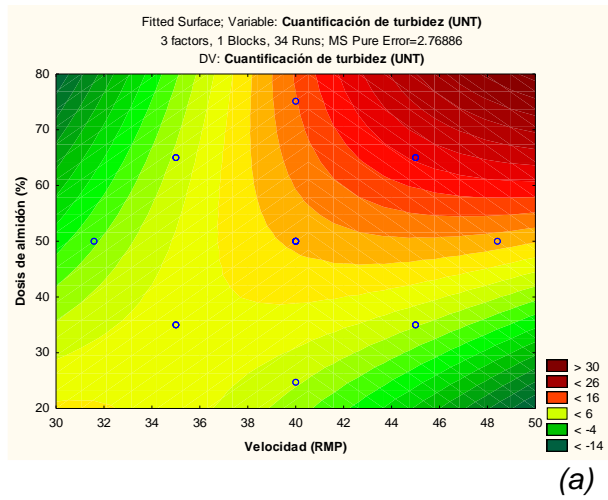


Figura 33. Superficie de respuesta para la Cuantificación de la turbidez, a) dosis de almidón y velocidad, b) velocidad y pH, c) pH y dosis de almidón.

En la *Figura 30 (a)* se muestran las interacciones de dos variables independientes con respecto a la remoción de turbidez siendo de mayor porcentaje de almidón 65% y a una velocidad de agitación mayor a 40 RPM, mayor probabilidad de efectividad en la obtención de una remoción de turbiedad. Sin embargo, se observa que a partir de una dosificación mayor a 70% u 80% no sería eficiente la aplicación del coagulante al igual que a medida aumenta la velocidad de mezcla, por tanto, no tiende a ser eficiente. Trujillo, Duque, Arcilla, Rincón, Pacheco y Herrera (2012) trabajaron con almidón de plátano como coadyuvante de remoción de turbidez aplicado a las variables el pH y velocidad de mezcla lenta siendo este último factor importante al interactuar con las dosis de coagulante logrando la reducción a 3.5 UNT.

En la *Figura 30(b)* se observa el nivel de influencia de las variables independientes de velocidad de mezcla aplicado a 44 RPM y a un pH superior a los 8.0 obteniéndose una cuantificación de turbidez menor a 5 UNT. La influencia de la variable pH en la remoción de turbiedad fue debido al contacto del agua con los iones del elemento metálico  $(Al SO_4)_3$ , que promueve la formación de cadenas de enlaces iónicos e influye en la naturalidad de formación adecuada de flóculos. Autores como Guerra (2008), citado por Santa Cruz (2016), han obtenido resultados óptimos en relación al pH y la remoción de turbidez, pues el emplear valores de pH 7.5 - 8.0 - 9.0 y 10.0 se obtuvo porcentajes de remoción de 98.76%, 98.09% y 97.85%.

En la *Figura 30(c)* se observa el nivel de influencia de las variables independientes de pH y dosis de almidón en la cual muestran que a un pH entre 7-8 y una dosis superior al 60% de almidón se obtiene una remoción de turbiedad eficiente. Según Bolto y Gregory (2007), los polímeros naturales demuestran cierta ventaja en la disminución en la dosificación del agente coagulante, generando menor producción de lodos debido al incremento de la carga iónica del polímero y niveles bajos del ión metálico en el agua. Además, Katayon (2006) coincide en los beneficios de los polímeros naturales debido a que no son tóxicos para los ecosistemas, son biodegradables e inoocuos para la salud.

A continuación, en la tabla 16 se muestran los coeficientes del modelo matemáticos polinómicos globales.

Tabla 16.

*Coeficientes del modelo polinomial para la cuantificación de la turbidez*

<b>Factor</b>	<b>Coeficientes</b>	<b>ST Pure error</b>	<b>T (19)</b>
Mean/Interc.	-215.047	43.11526	-4.9877
(1)Velocidad (RMP)(L)	10.112	1.29810	7.7901
Velocidad (RMP)(Q)	-0.057	0.01406	-4.0727
(2)Dosis de almidón (%) (L)	-0.127	0.33431	-0.3791
Dosis de almidón (%) (Q)	-0.002	0.00156	-1.3257
(3)pH(L)	10.761	6.02972	1.7847
pH(Q)	2.721	0.34448	7.8990
1L by 2L	0.056	0.00555	10.0662
1L by 3L	-1.110	0.08320	-13.3414
2L by 3L	-0.244	0.02773	-8.8041

En la tabla 16 indica un análisis de varianza de los factores lineales y cuadráticos para la cuantificación de turbidez (UNT) donde se obtuvo los factores de dosis de almidón de pituca (L) (Q) y velocidad de agitación (L) (Q) significativas tras la obtención del valor de determinación ajustado el cual, a partir de las interacciones, se logra generar las siguientes ecuaciones 7,8 y 9.

*Ecuación 7. Ecuación polinomial de los factores de variable de mezcla y dosis de almidón para la cuantificación de turbidez.*

$$Z = -215.047 + 10.112 (x) - 0.057(x^2) - 0.002 (y) - 0.002(y^2) + 0.056 (x)(y)$$



Donde:

Z = Turbidez (UNT)

x = Velocidad de mezcla (RPM)

y = Dosis de almidón (%)

*Ecuación 8. Ecuación polinomial de los factores de variable de mezcla y pH para la cuantificación de turbidez.*

$$Z = -215.047 + 10.112(x) - 0.057(x^2) - 10.76(y) + 2.72(y^2) - 1.11(x)(y)$$

Donde:

Z = Turbidez (UNT)

x = Velocidad de mezcla (RPM)

y = pH

*Ecuación 9. Ecuación polinomial de los factores de variable de dosis de almidón y pH para la cuantificación de turbidez.*

$$Z = -215.047 - 0.127(x) - 0.002(x^2) + 10.76(y) + 2.72(y^2) - 0.244(x)(y)$$

Donde

Z = Turbidez (UNT)

x = Dosis de almidón (%)

y = pH

#### 4.5. Predicciones para la cuantificación de la turbidez

Tabla 17.

*Tabla de factores y valores optimizados para la predicción*

<b>Factor</b>	<b>Niveles optimizados</b>	<b>Predicción de reducción (UNT)</b>	<b>Reducción (UNT) experimental</b>
Velocidad (RPM)	46	0.57	2.99
Dosis de almidón (%)	50		
pH	8		

En la tabla 17 se detalla los factores y valores optimizados para el modelamiento predictivo de la cuantificación de turbidez. Se puede recalcar que los valores obtenidos se encuentran dentro del rango estandarizado de los parámetros de coagulación y floculación.

En la Tabla 18 se muestra el cálculo predictivo de optimización, logrando una eficiente reducción de turbidez de 0.567 UNT y logrando que el modelo cuadrático (*Ecuación 10*) sea predictivo. Además, el análisis desarrollado, indica que el cálculo predictivo generado a partir de la regresión, predice un resultado de cuantificación de turbidez teórico, el cual sostiene el resultado obtenido a partir de la prueba de jarras presentando una diferencia  $\pm 2.99$  UNT.

Tabla 18.

*Factores de coeficientes para la predicción de cuantificación de turbidez.*

<b>Factor</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>Valor</b>	<b>Valor de Coeficiente</b>
Constant	-215.047		
(1)Velocidad (RMP)(L)	10.112	45.500	460.111
Velocidad (RMP)(Q)	-0.057	2070.250	-118.536
(2)Dosis de almidón %(L)	-0.127	50.000	-6.337
Dosis de almidón %(Q)	-0.002	2500.000	-5.177
(3)pH(L)	10.761	8.000	86.089
pH(Q)	2.721	64.000	174.149
1L by 2L	0.056	2275.000	127.021
1L by 3L	-1.110	364.000	-404.040
2L by 3L	-0.244	400.000	-97.667
Predicted			<b>0.567</b>
-95.0 % Conf.			-1.040
+95.0 % Conf.			2.173
-95.0 % Pred.			-3.269
+95.0 % Pred.			4.402

Ecuación 10. Ecuación polinomial global para la predicción de la reducción de la turbidez

$$\text{Reducción de la turbidez (UNT)} = -215.05 + 10.11X - 0.06X^2 - 0.13Y - 0.002Y^2 + 10.76Z + 2.72Z^2 + 0.06XY - 1.11XZ - 0.244YZ$$

Donde:

X: Velocidad (RPM)

Y: Dosis de almidón (%)

Z: Ph

#### 4.6. Resultados para la remoción de la turbidez

Tabla 19.

*Variables codificadas, no codificadas y variables dependientes de la remoción de turbidez.*

nsayos	Variables independientes						Variable dependiente	
	Codificados			No codificados			Remoción de turbidez (%)	
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	pH	Dosis (%)	Velocidad (RPM)	$R_1$	$R_2$
1	-1	-1	-1	6	35	35	97.500	97.500
2	1	-1	-1	8	35	35	99.175	99.325
3	-1	1	-1	6	65	35	97.975	97.775
4	1	1	-1	8	65	35	98.300	98.400
5	-1	-1	1	6	35	45	97.500	96.250
6	1	-1	1	8	35	45	99.150	99.325
7	-1	1	1	6	65	45	98.750	98.875
8	1	1	1	8	65	45	99.100	99.075
9	-1.68	0	0	5.3	50	40	98.600	98.550
10	1.68	0	0	8.7	50	40	98.650	98.750
11	0	-	0	7	24.8	40	98.400	97.700
12	0	1.68	0	7	75.2	40	98.475	97.250
13	0	0	-1.68	7	50	31.6	99.225	99.250
14	0	0	1.68	7	50	48.4	99.000	98.875
15	0	0	0	7	50	40	97.700	97.500
16	0	0	0	7	50	40	97.550	96.750
17	0	0	0	7	50	40	97.600	97.175

En la Tabla 19 se expone los resultados obtenidos en la remoción de turbidez en una prueba de 17 ensayos con dos réplicas obteniendo los valores máximos de remoción en un porcentaje del 99.0 % - 99.3 % en los ensayos 2, 6, 8, 13, 14 así como un porcentaje de remoción mínima es de 96.2% en el ensayo 5. Asimismo, se observó un valor promedio de remoción de turbidez de 98.0% a un pH constante de 7, verificando la influencia de los valores de dosis de almidón y velocidad de mezcla como los valores máximos de remoción (99.3%, 99.0, 98.4%) se obtuvieron en una muestra de agua donde se caracteriza el valor de pH 8 a una concentración de dosis de almidón mínima (35%) y máximas (68%) con una velocidad de mezcla lenta estandarizada en los 45 RPM.

Tabla 20.

a) *Análisis de Varianza (ANOVA) para la remoción de turbidez para DCCR*

<b>Factor</b>	<b>SS</b>	<b>dF</b>	<b>MS</b>	<b>F</b>	<b>p</b>
(1)Velocidad (RMP)(L)	13.0619	1	13.0619	76.9017	0.000000
Velocidad (RMP)(Q)	2.8249	1	2.8249	16.6317	0.000641
(2)Dosis de almidón (%) (L)	13.9053	1	13.9053	81.8672	0.000000
Dosis de almidón (%) (Q)	0.2894	1	0.2894	1.7040	0.207357
(3)pH(L)	103.5158	1	103.5158	609.4471	0.000000
pH(Q)	10.8863	1	10.8863	64.0929	0.000000
1L by 2L	17.5352	1	17.5352	103.2379	0.000000
1L by 3L	30.8025	1	30.8025	181.3491	0.000000
2L by 3L	13.4139	1	13.4139	78.9741	0.000000
Lack of Fit	43.9559	5	8.7912	51.7579	0.000000
Pure Error	3.2272	19	0.1699		
Total SS	259.0959	33			
R <sup>2</sup>			82.0 %		
R <sup>2</sup> adj			75.0 %		

b) Análisis de varianza (ANOVA) y Prueba de Fisher para la predicción del modelo

<b>Factores</b>	<b>SS</b>	<b>dF</b>	<b>SS/dF</b>	<b>F<sub>calculado</sub></b>	<b>F<sub>tabulado</sub></b>	<b>F*</b>
Regresión (L) y (Q)	206.23	9	22.9150	11.65	2.3	5.06
Error residual	47.1831	24	1.9659			
Total SS	259.09	33				

En la Tabla 20 (a) se muestra el análisis de varianza de los datos obtenidos en base a la remoción de turbidez obteniendo un coeficiente de determinación del ( $R^2 = 82\%$ ) y coeficiente de determinación ajustado ( $R\text{-adj} = 75\%$ ) a un nivel de confianza del 95% siendo las variables velocidad de agitación, pH y dosis de almidón de pituca significativas para la remoción de turbidez.

En la Tabla 20(b) muestra la prueba de F para verificar la predicción del modelo, el valor F\* fue de 5.1 indicando que la regresión del modelo (L) y (Q) es estadísticamente predictiva.

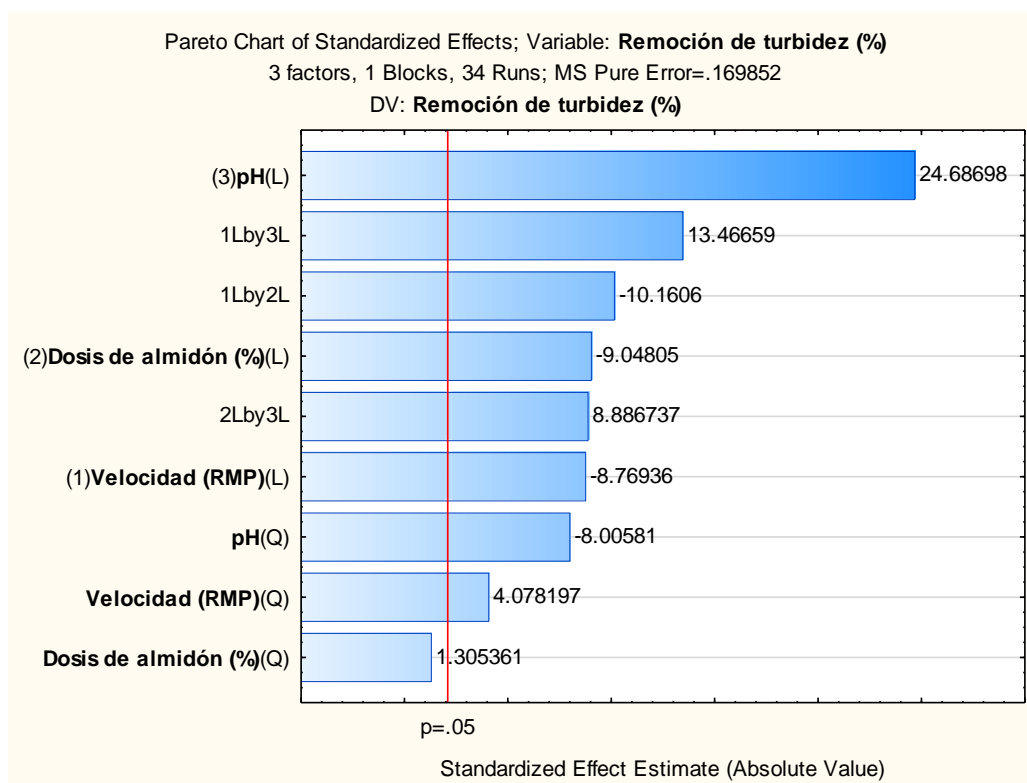
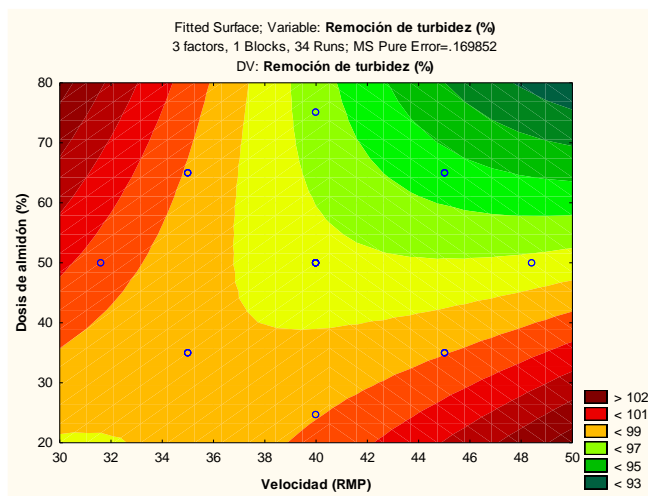


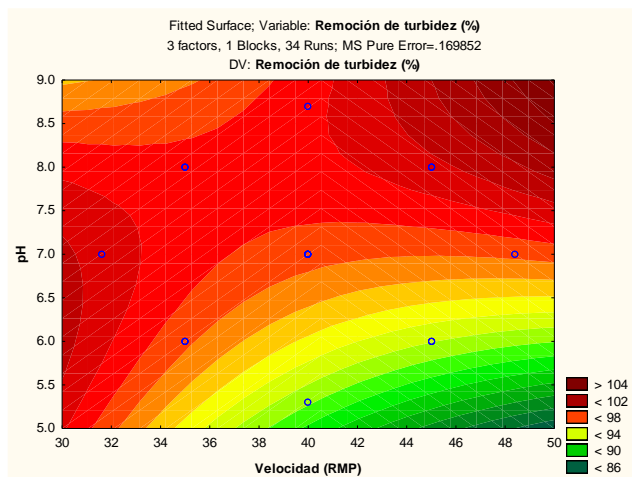
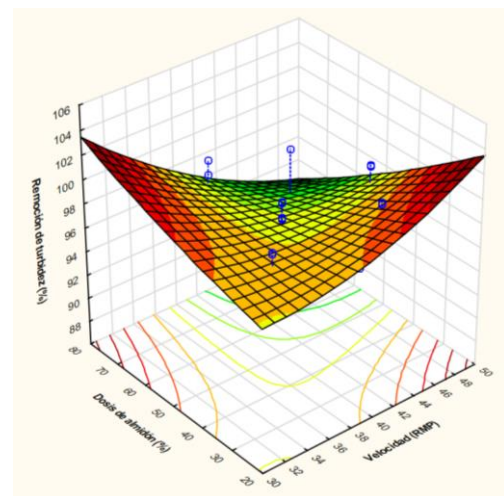
Figura 31. Diagrama de Pareto para la remoción de turbidez.

En la *Figura 31* se presenta el diagrama de Pareto de remoción de turbidez en el cual se muestra que el valor de pH tiene un grado de influencia mayor en comparación con las interacciones de los parámetros dado que su efecto modifica de significativamente el comportamiento de otros elementos en el agua, así como beneficia en la aglomeración rápida.

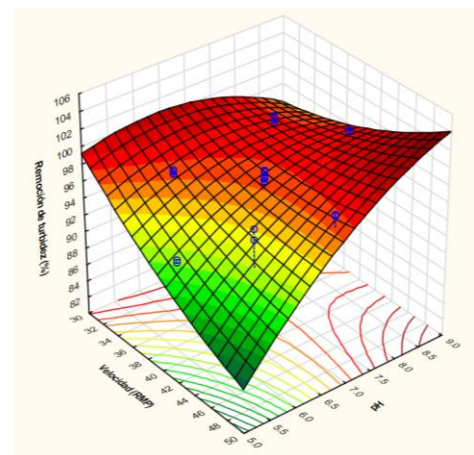
#### 4.7. Superficie de respuesta para la remoción de la turbidez



(a)



(b)



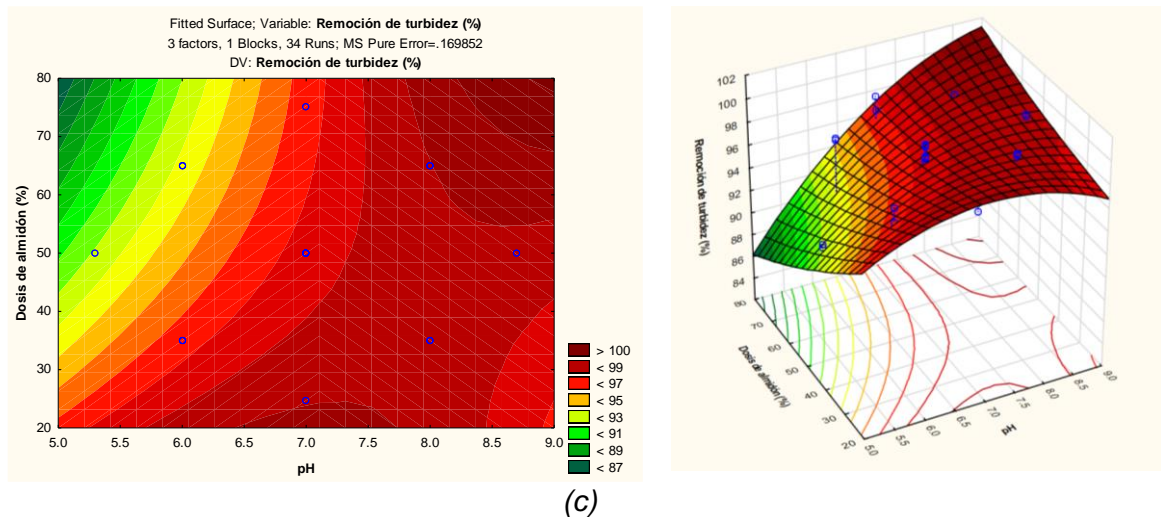


Figura 34. Superficie de respuesta para la Cuantificación de la turbidez, a) dosis de almidón y velocidad, b) velocidad y pH, c) pH y dosis de almidón.

En la *Figura 32(a)* se muestra las interacciones de dos variables independientes con respecto a la remoción de turbidez en el cual se observa a mayor porcentaje de almidón (70-80%) y a una velocidad de agitación mayor a 45 RPM hay mayor probabilidad de efectividad en la obtención de una remoción de turbiedad obteniendo una eficiencia de remoción mayor a un 80%.

En la *Figura 32(b)* se observa el nivel de influencia de las variables independientes de velocidad de agitación (RPM) entre los 48 -50RPM y a una dosis de pH 5 se obtiene una remoción de turbiedad de 86-88% de remoción de turbiedad.

En la *Figura 32(c)* se observa el nivel de influencia de las variables independientes de pH y dosis de almidón de pituca en la cual indican que a una dosis de pH 5 y una dosis entre 75 – 80% de almidón se obtiene efectivamente una remoción del 90% de turbiedad. Trujillo, Duque, Arcilla, Rincón, Pacheco y Herrera (2012) trabajaron con almidón de plátano como coadyuvante de remoción de turbidez aplicado a las variables el pH y velocidad de mezcla lenta siendo este último factor importante al interactuar con las dosis de coagulante logrando la reducción a 3.5UNT

A continuación, en la tabla 21 se observa un análisis de varianza de los factores

lineales y cuadráticos para la cuantificación de turbidez (UNT) donde se obtuvo los factores de dosis de almidón de pituca (L) (Q) y velocidad de agitación (L) (Q) son significativas.

Tabla 21.

*Coefficientes del modelo polinomial para la remoción de la turbidez*

<b>Factor</b>	<b>Coefficientes</b>	<b>ST Pure error</b>	<b>T (19)</b>
Mean/Interc.	153.4194	10.67864	14.3669
(1)Velocidad (RMP)(L)	-2.5190	0.32151	-7.8348
Velocidad (RMP)(Q)	0.0142	0.00348	4.0782
(2)Dosis de almidón %(L)	0.0330	0.08280	0.3980
Dosis de almidón %(Q)	0.0005	0.00039	1.3054
(3)pH(L)	-2.6513	1.49342	-1.7753
pH(Q)	-0.6831	0.08532	-8.0058
1L by 2L	-0.0140	0.00137	-10.1606
1L by 3L	0.2775	0.02061	13.4666
2L by 3L	0.0610	0.00687	8.8867

En la tabla 21 se observa los coeficientes del modelo polinomial lineales (L) y cuadráticos (Q) para la remoción de turbidez (UNT) donde se obtuvo los factores de dosis de almidón de pituca (Q) y velocidad de agitación (Q) son significativas. A partir de las interacciones se logra generar las siguientes ecuaciones 11,12 y 13.



*Ecuación 11.* Ecuación polinomial de los factores de las variables de velocidad de mezcla y dosis de almidón para la remoción de turbidez.

$$Z = 153.42 - 2.52(x) - 0.014(x^2) - 0.033(y) - 0.0005(y^2) - 0.01(x)(y)$$

Donde

Z = Turbidez (UNT)

x = Velocidad de mezcla (RPM)

y = Dosis de almidón (%)

*Ecuación 12.* Ecuación polinomial de los factores de las variables de velocidad de mezcla y pH para la remoción de turbidez.

$$Z = 153.42 - 2.52(x) - 0.014(x^2) - 2.85(y) - 0.68(y^2) - 0.277(x)(y)$$

Donde

Z = Turbidez (UNT)

x = Velocidad de mezcla (RPM)

y = pH

*Ecuación 13.* Ecuación polinomial de los factores de las variables de dosis de almidón y pH para la remoción de turbidez.

$$Z = 153.42 + 0.033(x) - 0.0005(x^2) - 2.85(y) - 0.68(y^2) + 0.06(x)(y)$$

Donde

Z = Turbidez (UNT)

x = Dosis de almidón (%)

y = pH

#### **4.5.2. Predicciones para la remoción de turbidez.**

Tabla 22.

*Tabla de factores y valores optimizados para la predicción para la remoción de la turbidez*

<b>Factor</b>	<b>Niveles</b>	<b>Predicción de remoción (%)</b>	<b>Remoción (%) experimental</b>
Velocidad (RPM)	46	99.9	99.23
Dosis de almidón (%)	50		
pH	8		

En la tabla 22 se detalla los factores y valores optimizados para el modelamiento predictivo del porcentaje de remoción de turbidez. Se puede recalcar que los valores obtenidos se encuentran dentro del rango estandarizado de los parámetros de coagulación y floculación. En la tabla 23 se muestra los resultados predictivos de las variables conjugadas a un nivel de significancia del 95% logrando una predicción teórica del 99.9%

Tabla 23.

*Factores y coeficientes par la predicción de remoción de la turbidez*

<b>Factor</b>	<b>Coeficiente</b>	<b>Valor</b>	<b>Valor de Coeficiente</b>
Constant	153.4194		
(1)Velocidad (RMP)(L)	-2.5190	46.000	-115.872
Velocidad (RMP)(Q)	0.0142	2116.000	30.047
(2)Dosis de almidón %(L)	0.0330	50.000	1.648
Dosis de almidón %(Q)	0.0005	2500.000	1.263
(3)pH(L)	-2.6513	8.000	-21.210
pH(Q)	-0.6831	64.000	-43.716
1L by 2L	-0.0140	2300.000	-32.104
1L by 3L	0.2775	368.000	102.120
2L by 3L	0.0610	400.000	24.417
Predicted			<b>99.9</b>
-95. % Conf.			99.587
+95. % Conf.			100.436
-95. % Pred.			99.050
+95. % Pred.			100.973

En la tabla 23 se muestra el cálculo predictivo de optimización, logrando una eficiencia de remoción de 99.9%. Se puede recalcar que los valores obtenidos se encuentran dentro del rango estandarizado de los parámetros de coagulación y floculación. Asimismo, en la ecuación 14 se muestra la ecuación polinomial global para lograr una remoción de turbidez mayor-

*Ecuación 14.* Ecuación polinomial global para la predicción de la remoción de la turbidez.

$$\text{Remoción de la turbidez (\%)} = 153.42 - 2.52X - 0.014X^2 + 0.033Y + 0.0005Y^2 - 2.65Z - 0.683Z^2 - 0.014XY + 0.278XZ + 0.06YZ$$

Donde:

X: Velocidad (RPM)

Y: Dosis de almidón (%)

Z: pH

#### 4.8 Resultados de pH post tratamiento

Tabla 24

Resultados de pH post tratamiento para el diseño Central Compuesto Rotacional.

Ensayos	Variables independientes						Variable dependiente	
	Codificados			No codificados			pH post tratamiento	
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	pH	Dosis de almidón (%)	Velocidad (RPM)	$R_1$	$R_2$
1	-1	-1	-1	6	35	35	6.6	6.3
2	1	-1	-1	8	35	35	7.2	7.5
3	-1	1	-1	6	65	35	6.3	6.2
4	1	1	-1	8	65	35	7.5	7.6
5	-1	-1	1	6	35	45	6.5	6.5
6	1	-1	1	8	35	45	7.4	7.3
7	-1	1	1	6	65	45	6.4	6.5
8	1	1	1	8	65	45	7.3	7.5
9	-1.68	0	0	5.3	50	40	5.7	5.5
10	1.68	0	0	8.7	50	40	7.9	8.1
11	0	- 1.68	0	7	24.8	40	7.2	7.3
12	0	1.68	0	7	75.2	40	7.6	7.4
13	0	0	-1.68	7	50	31.6	7.4	7.3
14	0	0	1.68	7	50	48.4	7.2	7.4
15	0	0	0	7	50	40	7.3	7.1
16	0	0	0	7	50	40	7.4	7.2
17	0	0	0	7	50	40	7.2	7.3

La Tabla 24 muestra los resultados de pH post tratamiento, indicando que los ensayos 2, 7 y 15 fueron los más óptimos en la neutralización del pH con valores cercanos a 7, este valor es reflejado cuando se trabaja a un pH inicial de 6 a 8, a una dosis de almidón de 35 a 65 % y velocidad de 35 a 45 RPM. Para describir mejor el comportamiento y deducir los parámetros y niveles óptimos serán evaluados y discutidos por ANOVA y superficie de respuesta.

El pH tiene un grado de influencia mayor a la conjugación de parámetros, dado que su efecto modifica el comportamiento de otros elementos en el agua y también favorece la aglomeración rápida. Asimismo, puede beneficiar o desmejorar el proceso de coagulación dependiendo de la naturaleza de los iones y la alcalinidad presente en el agua. Siendo los resultados coherentes con la literatura, pues el rango óptimo de pH se emplea de 6.5 a 8.0 y en ese rango se obtuvo una mayor remoción de turbiedad de 95.35 %.

La estimación dada por la combinación del pH y la velocidad de mezcla lenta se debe a que los iones del elemento metálico al encontrarse a cierto cuerpo de agua con pH bajo se moviliza a una velocidad menor, generando mayor impacto en la formación de cadenas de enlaces iónicos, así como influye en la naturalidad de formación de flóculos.

Tabla 25.

a) *Análisis de Varianza (ANOVA) para el potencial de hidrogeno pos tratamiento*

<b>Factor</b>	<b>SS</b>	<b>dF</b>	<b>MS</b>	<b>F</b>	<b>p</b>
<b>(1)Velocidad (RMP)(L)</b>	0.00004	1	0.000038	0.0026	0.959923
<b>Velocidad (RMP)(Q)</b>	0.01962	1	0.019625	1.3559	0.258663
<b>(2)Dosis de almidón (%) (L)</b>	0.02586	1	0.025856	1.7864	0.197150
<b>Dosis de almidón (%) (Q)</b>	0.00316	1	0.003160	0.2183	0.645622
<b>(3)pH(L)</b>	9.47553	1	9.475530	654.6730	0.000000
<b>pH(Q)</b>	1.02306	1	1.023058	70.6840	0.000000
<b>1L by 2L</b>	0.00000	1	0.000000	0.0000	1.000000
<b>1L by 3L</b>	0.04000	1	0.040000	2.7636	0.112838
<b>2L by 3L</b>	0.06250	1	0.062500	4.3182	0.051504
<b>Lack of Fit</b>	0.75856	5	0.151712	10.4819	0.000060
<b>Pure Error</b>	0.27500	19	0.014474		
<b>Total SS</b>	11.74029	33			
<b>R<sup>2</sup></b>			91.0 %		
<b>R<sup>2</sup> adj</b>			88.0 %		

b) Prueba de Fisher para la predicción del modelo para la remoción de turbidez

Factores	SS	dF	SS/dF	F <sub>calculado</sub>	F <sub>tabulado</sub>	F*
Regresión (L) y (Q)	10.64	9	1.183307	27.47	2.3	11.9
Error residual	1.033	24	0.043065			
Total SS	11.740	33				

En la Tabla 25(a) se muestra el análisis de varianza de los datos obtenidos en base a la remoción de turbidez obteniendo un coeficiente de determinación del ( $R^2 = 91\%$ ) y coeficiente de determinación ajustado ( $R\text{-adj} = 88\%$ ) a un nivel de confianza del 95% siendo las variables pH significativas para el potencial de hidrógeno.

En la Tabla 25 (b) muestra la prueba de F para verificar la predicción del modelo, el valor F\* fue de 11.9 indicando que el modelo de la regresión (L) y (Q) es estadísticamente representativa y predictiva (Barros Neto, Scarminio y Bruns, 2001).

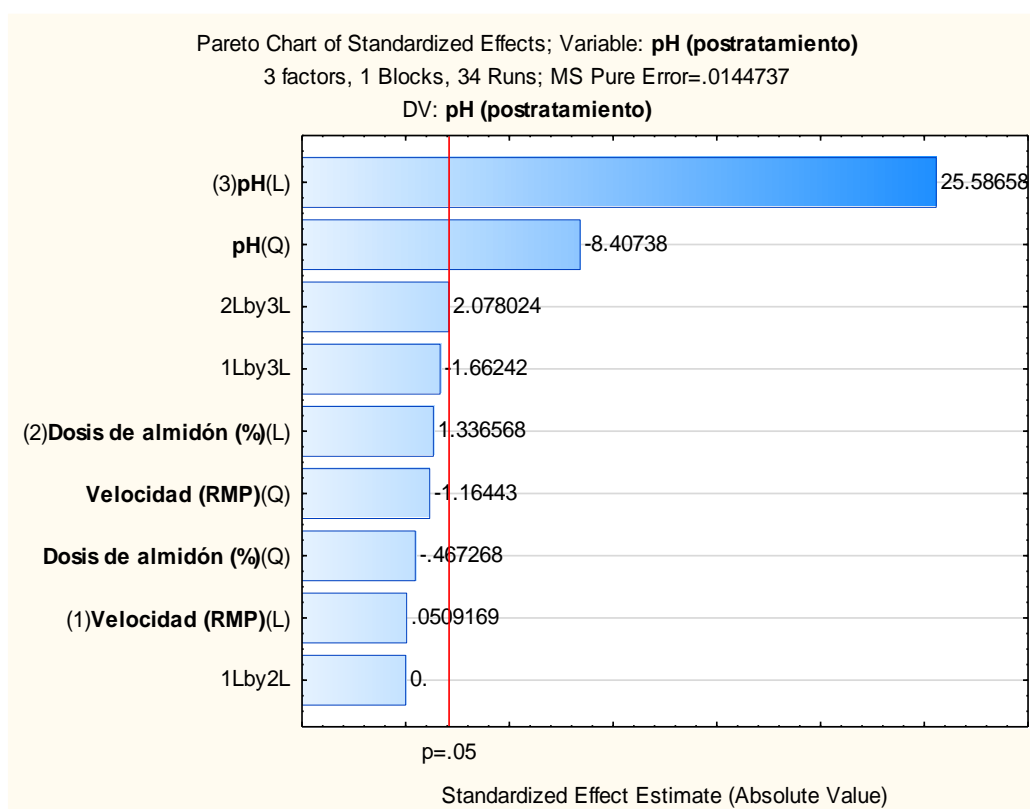
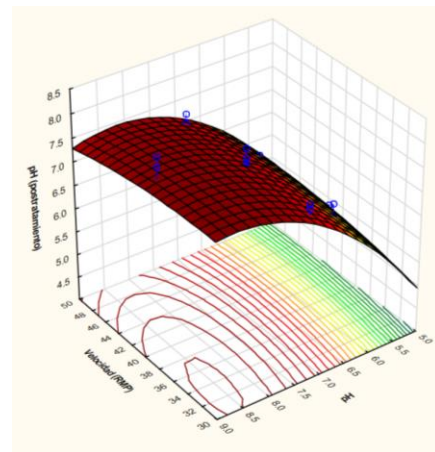
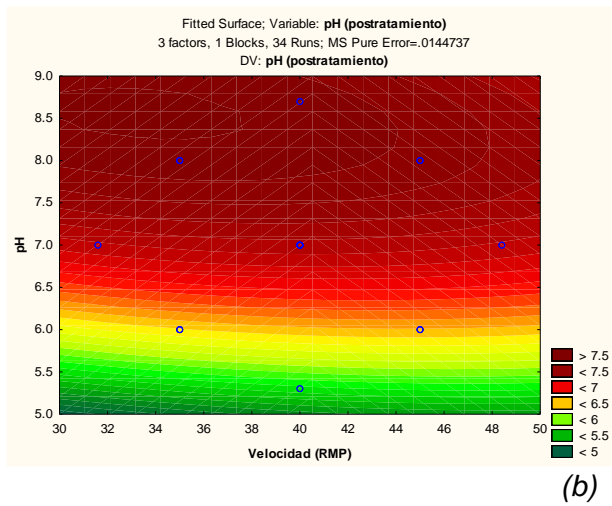
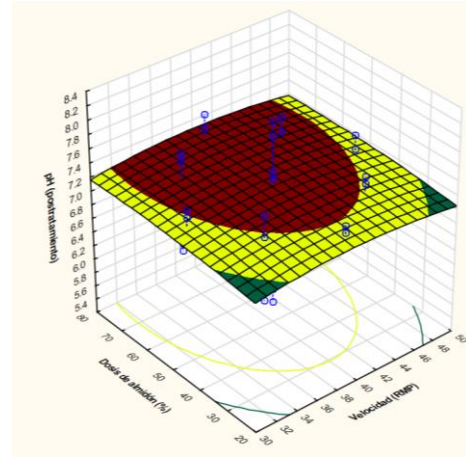
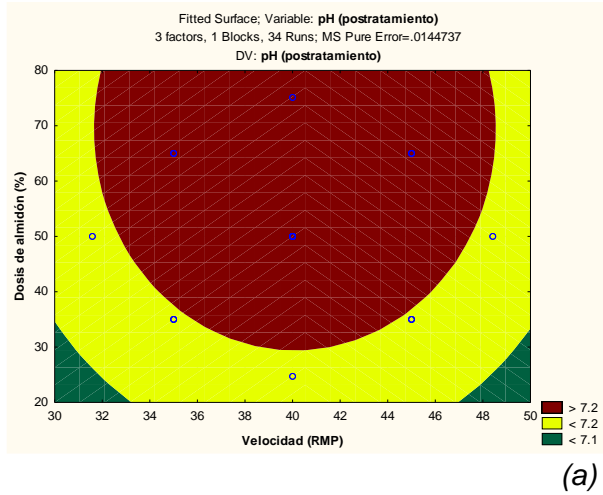


Figura 35. Diagrama de Pareto para el potencial de hidrógeno post – tratamiento.

En la *Figura 35* se presenta el diagrama de pareto a base del efecto potencial de hidrógeno en el post tratamiento de remoción de turbidez en el cual se muestra que tuvo mayor influencia significativa.

#### 4.8. Superficie de respuesta para el potencial de hidrógeno



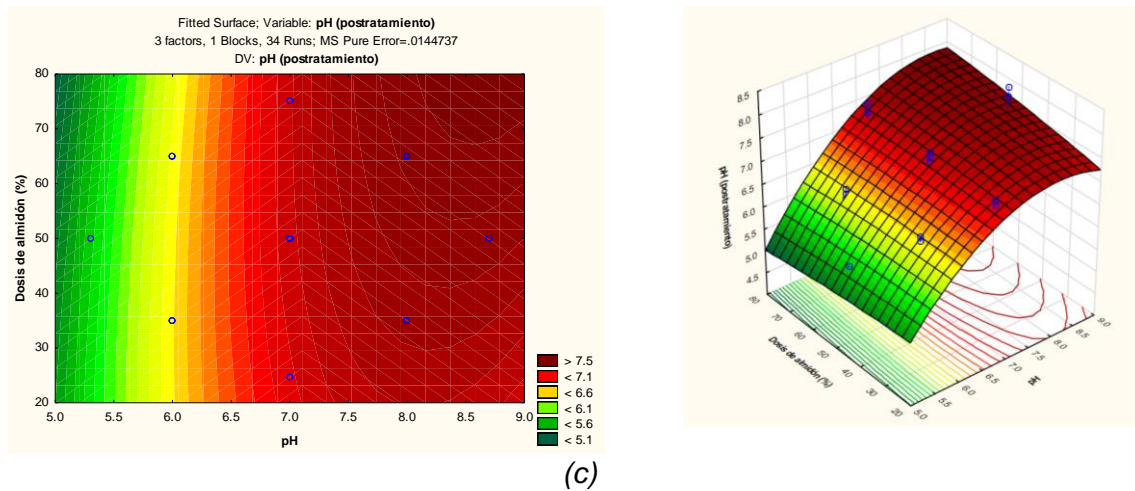


Figura 36. Superficie de respuesta para el pH post tratamiento, a) dosis de almidón y velocidad, b) velocidad y pH, c) pH y dosis de almidón.

En la Figura 36 (a) se observa la influencia de superficie de respuesta del pH en base a las interacciones de dosis de almidón y velocidad de mezcla, siendo verificado en la gráfica, los valores muestran que los valores óptimos de 50% de dosis de almidón y a una velocidad de mezcla de 40 RPM genera resultados de pH 7.2, valor por el cual se encuentra en el promedio normal de pH.

En la Figura 36(b) se observa que la superficie de respuesta de pH en base a las interacciones de velocidad de mezcla y pH inicial, logrando una efectividad de resultados de pH 7. Además, se observa en la gráfica que a medida que aumenta el pH, se logra mayor efectividad a una velocidad de mezcla de 40 RPM.

En la Figura 36(c) se observa las interacciones de dosis de almidón y pH inicial muestran que a mayor concentración de dosis de almidón se requiere incremento de pH para lograr resultados de pH promedio al valor de 7.



Tabla 26

*Coefficientes del modelo polinomial para el pH postratamiento de la turbidez*

Factor	Coefficientes	ST Pure error	T (19)
Mean/Interc.	-10.5793	3.117239	-3.39382
(1)Velocidad (RMP)(L)	0.1649	0.093853	1.75722
Velocidad (RMP)(Q)	-0.0012	0.001016	-1.16443
(2)Dosis de almidón (%) (L)	-0.0218	0.024171	-0.90347
Dosis de almidón (%) (Q)	-0.0001	0.000113	-0.46727
(3)pH(L)	3.7095	0.435950	8.50912
pH(Q)	-0.2094	0.024906	-8.40738
1L by 2L	0.00001	0.000401	0.00000
1L by 3L	-0.0100	0.006015	-1.66242
2L by 3L	0.0042	0.002005	2.07802

En la Tabla 26 se observa un análisis de varianza de los factores lineales (L) y cuadráticos (Q) para la obtención del modelo polinomial, donde se obtuvo que el pH es significativo obteniendo las siguientes ecuaciones polinomiales.

*Ecuación 15. Ecuación polinomial de los factores de las variables de velocidad de mezcla y dosis de almidón para la cuantificación de pH post tratamiento.*

$$Z = -10.58 + 0.165(x) - 0.0012(x^2) - 0.0218(y) - 0.0001(y^2) - 0.00001(x)(y)$$

Donde

Z = Turbidez (UNT)

x = Velocidad de mezcla (RPM)

y = Dosis de almidón (%)

*Ecuación 16. Ecuación polinomial de los factores de las variables de velocidad de mezcla y pH para la cuantificación de pH post tratamiento.*

$$Z = -10.58 + 0.165(x) - 0.0012(x^2) - 3.71(y) - 0.209(y^2) - 0.001(x)(y)$$

Donde

Z = Turbidez (UNT)

x = Velocidad de mezcla (RPM)

y = pH

*Ecuación 17. Ecuación polinomial de los factores de las variables de pH y dosis de almidón para la cuantificación de pH post tratamiento.*

$$Z = -10.58 + 3.71(x) - 0.209(x^2) - 3.71(y) - 0.209(y^2) - 0.001(x)(y)$$

Donde

Z = Turbidez (UNT)

x = Dosis de almidón (%)

y = pH

Tabla 27

*Factores y valores optimizados para el pH post-tratamiento*

<b>Factor</b>	<b>Niveles</b>	<b>Predicción de pH postratamiento</b>	<b>pH postratamiento experimental</b>
Velocidad (RPM)	46		
Dosis de almidón (%)	50	7.2	7.3
Ph	8		

En la tabla 27 se detalla los factores y valores optimizados para el modelamiento predictivo para obtener un resultado optimizado de pH. Se puede recalcar que los valores obtenidos se encuentran dentro del rango estandarizado de los parámetros de coagulación y floculación. En la tabla 28 se muestra los resultados predictivos de las variables conjugadas a un nivel de significancia del 95% logrando un resultado predictivo de pH 7.2.

Tabla 28

*Factores y coeficientes par la predicción de pH post tratamiento*

<b>Factor</b>	<b>Coeficiente</b>	<b>Valor</b>	<b>Valor de Coeficiente</b>
Constant	-10.5793		
(1)Velocidad (RMP)(L)	0.1649	46.000	7.5863
Velocidad (RMP)(Q)	-0.0012	2116.000	-2.5044
(2)Dosis de almidón (%)(L)	-0.0218	50.000	-1.0919
Dosis de almidón (%)(Q)	-0.0001	2500.000	-0.1319
(3)pH(L)	3.7095	8.000	29.6764
pH(Q)	-0.2094	64.000	-13.4012
1L by 2L	0.0000	2300.000	0.0000
1L by 3L	-0.0100	368.000	-3.6800
2L by 3L	0.0042	400.000	1.6667
<b>Predicted (pH postratamiento)</b>			<b>7.2405</b>
-95.% Conf.			7.4165
+95.% Conf.			7.6645
-95.% Pred.			7.2599
+95.% Pred.			7.8212

*Ecuación 18.*Ecuación polinomial global para la predicción del pH postratamiento.

$$pH \text{ pos tratamiento} = -10.58 + 0.165X - 0.001X^2 - 0.022Y - 0.0001Y^2 + 3.71Z - 0.21Z^2 - 0.01XZ + 0.0042YZ$$

Donde:

X: Velocidad (RPM)

Y: Dosis de almidón (%)

Z: pH

## CAPITULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

La aplicación de la metodología de superficie de respuesta (MSR) empleando el diseño central compuesto rotacional (DCCR) logró evaluar y optimizar parámetros (variables dependientes) y niveles de estudio en la eficiencia de cuantificación de reducción de turbidez (UNT), remoción de la turbidez (%) y pH post tratamiento empleando el almidón de pituca como un coagulante natural.

La caracterización las propiedades tecno funcionales del almidón de pituca (*Colocasia esculenta*) obtuvo valores de amilosa y amilopectina de 26.8 % y 73.2 % respectivamente, componentes que son potenciales coagulantes para la remoción de partículas suspendidas en el tratamiento de aguas. Además, un poder de hinchamiento de  $11,64 \pm 0,79$  %, que benefició a la ruptura de los gránulos de almidón y consecuentemente la liberación de toda la amilosa de la red de amilopectina minimizando la dispersión de los esteres monofosfatos y generando que el tamaño del granulo sea óptimo, lo cual generó su aprovechamiento en los tratamientos. El ISA fue de  $9.08 \pm 0.75$ , demostrando una baja solubilidad en el agua, el IAA fue de  $3.12 \pm 0.42$  g/gel almidón el cual demuestra que los gránulos lograron aumentar su tamaño y por tanto benefició en el proceso de floculación. El contenido de humedad fue de  $11.10 \pm 1.12$  %, el porcentaje de humedad fue de 10.31 % y la actividad de agua fue de 0.59, indicando que las propiedades tecnofuncionales y fisicoquímicas del almidón de pituca empleado se encuentran dentro de los valores normales y propicios para su actividad como auxiliar de coagulación.

Se logró determinar la dosis óptima del Sulfato de Aluminio en el cuarto tratamiento trabajado mediante el *Jar Test*, dando como resultado una dosis de 20 mg/L que logró una remoción de turbiedad a 0.58 UNT. A partir de ello, se definieron las proporciones de la

mezcla almidón:sulfato, las cuales variaron entre el 35 % y 65 % de la dosis óptima encontrada.

La eficiencia del polímero natural en la remoción de turbidez mediante el Jar Test y el diseño de experimentos factorial y diseño compuesto central rotacional se demostró a través de una remoción entre el 88.30 % y 99.33 %, la remoción máxima se logró en relación inversamente proporcional con la acidez y directamente proporcional con la velocidad de mezcla lenta. Además, se consiguió una cuantificación de turbidez mínima de 2.7 UNT y máxima de 45 UNT para una muestra inicial de  $400 \pm 10$  UNT. Asimismo, se comprobó que la variable de pH tiene un grado de influencia mayor a la conjugación de parámetros, dado que su efecto modifica el comportamiento de otros elementos en el agua y puede beneficiar o desmejorar el proceso de coagulación dependiendo de la naturaleza de los iones y la alcalinidad presente en el agua. Los resultados fueron coherentes con la literatura, pues la mayor remoción de turbidez se obtuvo en el rango óptimo de pH al emplear sales de aluminio, el cual es definido de 6.5 a 8.0.

Los parámetros óptimos predichos por la metodología de superficie de respuesta (MSR) fueron una velocidad de mezcla lenta de 46 RPM y una dosis de almidón 50 % en una muestra de agua con pH de 8, dando como respuesta una cuantificación de turbidez de 0.5 UNT, remoción de turbidez de 100% y pH 7.2.

## 5.2 Recomendaciones

- Realizar ensayos con otros factores que influyen en la coagulación, como la temperatura, la velocidad de mezcla rápida, etc.
- Optimizar los parámetros empleando diseños Fraccionados y DCCR en el proceso de coagulación-floculación, para obtener mayores niveles de remoción de turbiedad
- Realizar ensayos similares con otras especies oriundas del país, con el fin de generar mayor conocimiento sobre el uso de almidones para la remoción de turbiedad del agua.
- Evaluar con almidones modificados para comparar su eficiencia.
- Analizar la cantidad de lodos generados en cada prueba para comparar la influencia de los parámetros.
- Aplicar otros diseños estadísticos para la optimización del proceso y de los parámetros.
- Realizar una caracterización físico-química y tecno funcional de otros tipos de almidones a diferentes contenidos de amilosa.
- Hacer pruebas alterando la temperatura, pues de acuerdo a la literatura, el almidón no trabaja bien a temperaturas bajas (menores a 17°C), y por el contrario, mejora su rendimiento a temperaturas más altas (clima tropical).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aboubakar; Njintang, Y. N.; Scher, J. & Mbofung, C. (2008). Physicochemical, thermal properties and microstructure of six varieties of taro (*Colocasia esculenta* L. Schott) flours and starches. *Journal of Food Engineering*, 86(2), 294-305.
- Alarcón F, Dufour D. (1998). "Almidón agrio de yuca en Colombia" Tomo 1: Producción y recomendaciones. Cali Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical. ISBN: 958-9439- 67-5.
- Anderson R., Conway B. y Peplinski B. (1969). Gelatinization of corn grifts by roll and extrusion cooking. *Cereal Science Today*. Volumen14, p.4-12. Citado por Torres A, Durán M, Montero R (2013).
- Andía, Yolanda. 2000. Tratamiento de agua coagulación y floculación. Lima, Peru:SEDAPAL, 234 p.
- Annual Book of ASTM Standards, vol. 11.02.
- Arboleda V., Castro, M. y Kirchmer, C. (1975). Polimeros Naturales y su aplicación como ayudantes de floculación. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Lima, Perú.
- Arboleda, J. (1992). Teoría y Práctica de la purificación del agua. Ed. Acodal. Colombia. 72p.
- Araujo de Vizcarrondo, C., Rincón, A. M., Padilla, F. (2004). Caracterización de almidón nativo de *Discorea bulbifera* L. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*. 54(2):241–245.
- Arnal J., Sancho.M., García B., Lora J y Verdú,. G. (2006). Aquapot: UF real appliations for wáter potabilization in developing countries. Problems,location and solution adopted. *Desalination*,204(1-3), 316-321. Doi:10.1016/j.desal.2006.02.037.
- Arvalho A (2008). Uso de Coagulantes Naturais no Processo de Obtenção de Água Potável. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Maringá.
- ASTM. (1995). Standard Practice for Coagulation–Flocculation Jar Test of Water E1-1994 R (1995). D 2035-80. Annual Book of ASTM Standards, vol. 11.02.
- Barrenechea A (2007). Formato Pdf. Desarrollo coagulantes floculantes. Badui, S. (2006). Química de los alimentos. Ed. Pearson Education.

- Becaria, A., Lahiri, D., Bondy, S., Chen, D., Hamadeh, A. et al. (2006). Aluminum and copper in drinking water enhance inflammatory or oxidative events specifically in the brain. *Journal of Neuroimmunology*, 176, 16-23.
- Bolto, B. y Gregory J. (2007). Organic polyelectrolytes in water treatment. *Water Research* 41, 2301- 2324.
- Bravo, M., & Gutiérrez, J.L. (2015). Remoción de sólidos suspendidos y materia orgánica de las aguas del Río Pollo de Otuzo empleando semillas *Caesalpinia spinosa* (Tara).
- Bratskaya, S., Schwarz, S. y Chervonetsky, D. (2004). Comparative study of humic acids flocculation with chitosan hydrochloride and chitosan glutamate. *Water Research* 38, 2955-2961.
- Brumovsky, L. (2005). Química de Almidón. Universidad Nacional de Misiones.
- Borba L. (2001). Viabilidade Do Uso Da Moringa Oleifera Lam No Tratamento Simplificado De Água Para Pequenas Comunidades. Centro de Ciências exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba – UFPB.
- Bunge, M. (1971). La ciencia, su método y su filosofía. Ediciones Siglo Veinte. Argentina.
- Campos, J., Colina, G., Fernández, N., Torres, G & Ojeda, G. (2003). Caracterización del agente coagulante activo de las semillas de Moringa oleífera mediante HPLC. Venezuela: Ediciones Huracán.
- Campos, J. y Di Bernardo, L. (1991). Uso de polímeros Naturales en el tratamiento de agua para abastecimiento. Centro Interregional de abastecimiento y Remoción de Agua, Universidad de Sao Paulo, Escuela de ingeniería de Sao Carlos – Brasil. CINARA. 85p.
- Carvalho, M H (2008) Uso de coagulantes naturais no processo de obtenção de água potável. 2008. 154f. Dissertação (mestrado em engenharia urbana) – departamento de engenharia civil, universidade estadual de maringá, maringá,
- Casas J, Castillo H , Noy J, Palomares A, Rodríguez R (2008). Experiencias, recursos y otros trabajos elaboración de papel indicador a base de extractos naturales: una alternativa fundamentada en experiencias de laboratorio para el aprendizaje del concepto. *Rev. Eureka Enseñ. Divul. Cien.*, 2009, 9(2), pp. 302-314.
- Castañeda M (2015). Propuesta para la implementación de técnicas alternativas con ayudantes de coagulación naturales. Universidad militar Nueva Granada. Informe final de opción de grado, presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil Tutor: MSc. Ing. Aurora Velasco Rivera. Bogotá.



- Castro, M. (1987). Parámetros fisicoquímicos que influyen en la calidad y en el tratamiento del agua. Trabajos presentados al Curso Taller sobre Control de Calidad Analítica. CEPIS. p. 1-72. Lima, Perú.
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS).
- CEPAL (2010). Panorama social de América Latina 2010. Santiago de Chile: Publicación de las Naciones Unidas.
- CEPIS (1993). Informe de actividades realizadas en CEPIS durante el periodo de mayo a julio de 1993. Universidad Mayor de San Simón Cochabamba. Bolivia.
- CEPIS.2004. Diseño de plantas de tecnología apropiada. Tratamiento de agua para consumo humano. Manual II.
- CIAT. (1995). La industria de almidón en el departamento del Cauca, Colombia. Corpotunia, Cirad, Cetec, Univalle, Fundación Carvajal y CIAT. Cali, Colombia. 16 pp.
- Chen, J., and Jane, J. (1994). Properties of granular cold-water-soluble starches prepared by alcoholic- alkaline treatments. *Cereal Chemistry* 71: 622-626.
- Christopher, H., Michael P., Doyle G. (1995). In vitro acrylamide exposure alerts growth cone morphology. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 131, 119-129. recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0041008X85710538>.
- Cornell, J. (1990). How to apply response surface methodology. Milwaukee, WI.
- Culebro, J. (2005). Cosechado de microalgas cultivadas en lagunas de alta carga para el tratamiento de aguas residuales: efecto del almidón sobre la floculación y la producción de biogás. UPC. Barcelona España.
- CIPA (2010) Extracción y análisis de polímeros obtenido a partir de varios productos naturales, para ser usados como potenciales floculantes en el tratamiento de agua para consumo humano.
- Díaz J (2014). Coagulantes – floculantes orgánicos e inorgánicos elaborados de plantas y del reciclaje de la chatarra, para el tratamiento de aguas contaminadas. Asesora: Álvarez Estela. Universidad pedagógica nacional Francisco Morazán.
- Díaz H. (1998). Almidón de Yuca. Universidad Autónoma de Occidente. Santiago de Cali-Colombia. Pág 35-36.
- Dogu, I., Arol A. (2004). Separation of dark-colored minerals from feldspar by selective flocculation using starch. *Powder Technol.* 139(3):258-63.

- Edwarson JA, Lacery RF. (1989). Geographical relation between Alzheimer's disease and aluminum in drinking water. *Lancet*, Volumen 1, No. 8629. p.59-62. Citado por Trejo R (2004). Riesgos a la salud por presencia del aluminio en el agua potable *Conciencia y tecnología* vol. 25 ISSN:1405- 5597.
- Ebeling J, Rishel K, Sibrell P. (2005). Screenin and evaluation of polymers as flocculation aids for the treatment of aquacultural effluents. *Aquacultural Engineering* 33 (2005) 235–249
- Ebeling J , Welsh C , Rishel K (2005). Performance evaluation of an inclined belt filter using coagulation/flocculation aids for the removal of suspended solids and phosphorus from microscreen backwash effluent. *Aquacultueal Engineerin* 35 (2006) 61-77.
- Eerlingen, C.; Delcour, A. (1995). Formation, analysis, structure and properties of type III enzyme resistant starch. *Journal of Cereal Science*, v. 22, n. 2, p. 129-138.
- FAO. (2007). Guía técnica para la producción y análisis de almidón de yuca. Roma Felez M (2004) Capitulo 1: El agua.
- Fernández L, Manassés, F. (1970). Importancia de la pituca para la alimentación humana. Lima: Universidad Nacional Federico Villareal.
- Ferreira S, Ortiz E, Pardo C (1990). Estudio químico bromatológico de la Colocasia esculenta (Taro). *Revista Colombiana de Ciencias Químicas Farmacéuticas* pag 53-59Fonseca. M.; Saborío. D. (2001). Tecnología post cosecha de yuca fresca parafinada (*Manihot esculenta* Crantz) para exportación en Costa Rica. Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA), Universidad de Costa Rica. Consultado el 28 de marzo del 2017.Formato PDF. Disponible en:  
<[http://www.mag.go.cr/biblioteca\\_virtual\\_ciencia/tec-yuca-post.pdf](http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual_ciencia/tec-yuca-post.pdf)>.
- García, B. (2007). Metodología de extracciones in situ de coagulantes naturales para la clarificación de agua superficial. Aplicación en países en vías de desarrollo, Director: Dr. José Miguel Arnal Arnal. Tesis de Maestría. Universidad Politécnica de Valencia. 1-103.
- García B., Rivera F ., Arnal J.M ., Sancho M (2014) Design of a wáter treatment plan for rural communities us the coagulant compund from moringa oleidera seed. Universidad politécnica Valéncia:España.
- González, M., Hernández, C. y Kaehler, J. (1991). Determinación de aluminio en el agua potable de Valencia y localidades cercanas. Departamento de Química, Universidad de Carabobo.

- Ghimici L, y Nichifor M. 2010. Novel biodegradable flocculating agents based on cationic amphiphilic polysaccharides. *Bioresour. Technol* 101:8549-8554.
- Guan, J. y Hanna, M. (2004). Extruding foams from corn starch acetate and native corn starch. *Biomacromolecules*, v. 5, p. 2329-2339.
- ISO. (2007) Determination of amylose content, method B. Part 2: routine methods. ISO 6647 – 2. Switzerland.
- ISO. (2016). Water quality – Determination of turbidity. Quantitative methods. 7021-1:2016.
- Lavenda, B (2005) .El movimiento browniano. Formato PDF. Disponible < <http://www.lanais.famaf.unc.edu.ar/QuantumSimposium2005/MB.pdf>>
- Laines, J., Goñi, J., Adams, R. y Camacho, W. (2008). Mezclas con potencial coagulante para tratamiento de lixiviados de un relleno sanitario. *Interciencia*.
- Leal, M. (2005). Tecnologías convencionales de tratamiento de aguas y sus limitaciones. Tecnologías solares para la desinfección y descontaminación del agua. *Solar Safe Water*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, México. Pp. 63-72. Disponible en: [https://www.psa.es/es/projects/solarsafewater/documents/libro/04\\_Capitulo\\_04.pdf](https://www.psa.es/es/projects/solarsafewater/documents/libro/04_Capitulo_04.pdf)
- Libânio M (2014). *Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água*. 3ed. Campinas: Editora Átomo, 2010.
- Lorenzo-Acosta, Y (2006). Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar Ciudad de La Habana, Cuba Vol. XL, Num.2. pp. 10-17.
- López, R., Hernández, J., Laines, J. y Aparicio, M. (2012). Evaluación de almidones de malanga (*colocasia esculenta*) como agentes coadyuvantes en la remoción de turbiedad en procesos de potabilización de agua. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. México.
- Medina, T. Gómez, A. Aragon, A. y Toro, V. (2006). Structural characteristics of gels formed by mixtures of carrageenan and mucilage gum from *Opuntia ficus-indica*. *Carbohydrate Polymers*, 63, 299-309. Recuperado de <http://worldwidescience.org/+opuntia+ficus-inidica.html>.

- Mejías D, Delgado M, Chacín E, Fernández N (2010). Uso potencial del exudado gomoso de *Cedrela odorata* como agente coagulante para el tratamiento de las aguas destinadas a consumo humana. *Rev. Forestal Venezolana* vol.54 (2). pp 147-153.
- Mestres, C. 1993. Comparison of various processes for making maize pasta. *J. Cereal Sci.*, 17: 277-290.
- Montaldo, A. (1977). «Diseño de una mezcla alimenticia a partir de harina de pituca, cáscara de huevo y leche en polvo». Tingo María, Universidad Nacional Agraria de la Selva. Proyecto de tesis. Disponible en [http://dc437.4shared.com/doc/\\_-2VoG-0/preview.html](http://dc437.4shared.com/doc/_-2VoG-0/preview.html) (Consulta:31/12/12).
- Morán, E. (1987). El uso de fécula de maíz como una alternativa de ayuda en el proceso de coagulación del agua cuando se emplea el sulfato de aluminio. Guatemala: Estudio Especial, ERIS-USAC.
- Morales, A. (2012). Fitogeografía e industrialización del almidón de pituca (*Colocasia esculenta*). Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Perú.
- Mozcoso, L. (2015). Uso de almidón de yuca como sustituto del sulfato de aluminio en el proceso de coagulación-floculación en sistemas de tratamiento de agua para potabilización. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
- Manogna B, James S (2014). Impacto of natural cationic polymers on charge and clarification of microalae suspensions. Clarkson University , Potsdam , New York.
- Metcalf and Eddy Inc., 1991. *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse*, third ed.
- McGraw-Hill Inc., Boston, MA.; Citado por Ebeling J , Welsh C , Rishel K (2005).
- Montgomery, D. (2004). *Diseño y Análisis de Experimentos*. Editorial Limusa Wiley. México.
- Morejón, T.D.E. (2017). Utilización del mucílago de *Opuntia ficus-indica* (*Opuntia ficus-indica*) en el mejoramiento de la calidad del agua de consumo humano, en la comunidad de Pusir Grande, provincia del Carchi. Universidad técnica del norte.
- Núñez, R. (1989). Sustitución parcial de la harina de trigo por la harina de pituca en la elaboración de panes enriquecidos con hidrolizado de pescado. Tesis. Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima.
- Nieto, C., y Orellana, V. (2011). Aplicación del quitosano como promotor de floculación para disminuir la carga contaminante. (Trabajo de grado), Facultad de Ciencias Agropecuarias y Ambientales: Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca. 1-132.

- OPS. (1985). Aspectos de salud involucrados en el uso de polielectrolitos en el tratamiento de aguas para consumo humano.
- OMS. (2017). Agua, saneamiento e higiene: Salubridad y calidad de agua. Disponible en: [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/water-quality/es/](http://www.who.int/water_sanitation_health/water-quality/es/)
- Qudsieh, I., Fakhru, L., Razi, A., Kabbashi, N., Mirghani, M., Fandi, K., Alam, M., Muyibi, S. y Nasef, M. (2008). Preparation and characterization of a new coagulant based on the sago starch biopolymer and its application in water turbidity removal. *J. Appl. Polymer Sci.* 109, 3140-3147.
- Perez, A., Delgado, L. y Torres, P. (2012). Evolución y perspectivas del sistema de abastecimiento de la ciudad de Santiago de Cali frente al aseguramiento de la calidad del agua potable. Universidad del valle Cali, Colombia Ingenierías y competitividad. Vol 14 (2):69- 81.
- Pompilio, C. (2013). Uso de floculantes de origen natural en el tratamiento del agua en términos de turbidez en el Río Santa – Huaraz. Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión. Huacho, Perú
- Páez, L. y Peña, S. (2015). Ensayo preliminar: Almidón de “Malanga” Colocasia esculenta, como ayudante de floculación en la potabilización del agua. Fundación Universitaria de San Gil – Unisangil, Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería: Programa Ingeniería Ambiental. Yopal, Colombia.
- Palomino, C., Molina, Y. y Perez, E. (2010). Atributos físicos y composición química de harinas y almidones de los tubérculos de colocasia esculenta. *Shott y Zanthosoma sagittifolin*. Revista de la Facultad de agronomía (UCV) Edición 36 Vol (2) pág: 58-66
- Ramirez, H. y Jaramillo, J. (2016). Agentes naturales como alternativa para el tratamiento de agua. *Rv Ciencias Básicas*. Vol 2. 11p. ISSN:1900-4699.  
Disponible en <http://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rfcb/article/view/1303>.
- Rhind W (1985). A History of the vegetable Kingdom. Disponible en <https://archive.org/details/ahistoryvegetab01rhingoog>
- Rodríguez, S, García, O. y Muñoz, R. (2002). Una solución para la clarificación de aguas para consumo humano. *Noticias Técnica de Laboratorio*, 1: 21-22.
- Rodríguez J, Lugo I, Rojas A, y Malaver C. (2007). Evaluación del proceso de la coagulación para el diseño de una planta potabilizadora. *Umbral Científico*, 11: 8 – 16.
- Romero, C., Bello, L., García, M., Martino, M., Solorza, N. y Zaritzky, N. (2005). Physicochemical and microstructural characterization of films prepared by thermal

and cold gelatinization from non- conventional sources of starches. Carbohydr. Polym. 60: 235-244.

Samame V. (2016). Determinar la influencia de dos materias primas coagulantes en el aluminio residual del agua tratada del distrito de Pedro Ruiz Gallo.

Šćiban, M., Klačnja, M., Antov, M. And Škrbić, B. (2009). Removal Of Water Turbidity By Natural Coagulants Obtained From Chestnut. Bioresource Technology, 100 (24), p. 6639-6643.

Solsona F, CEPIS (1999). Cantidad y calidad de las aguas en el mundo y en el mercosur . Lima,Perú. Formato PDF:Recopilado de <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacd/scan2/034403/034403.pdf>.

Suárez,L & Mederos, V (2011) Apuntes sobre el cultivo de la yuca (Manihot esculenta Crantz). Tendencias actuales. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA), Cuba .Disponible en [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0258-59362011000300004](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362011000300004)

Torres A, Montero P, Duran M (2013). Propiedades fisicoquímicas,morfológicas y funcionales del almidón de malanga ( Colocasia esculenta). Revista LASALLISTA de Investigación- Vol. 10 No.2 – 2013.

Torres J (2019). Evaluación de remoción de turbiedad de agua del canal de riego mediante tratamiento químico por coagulación-floculación con dos métodos de extracción de coagulante de mucílago de Opuntia ficus-indica a escala laboratorio. Universidad Peruana Unión: Lima.

Trejo R, Montoya H (2004). Riesgos a la salud por presencia de aluminio en el agua potable. Conciencia y tecnología Vol. 25 ISSN:1405-5597.

Torres A., Durán, M., Montero, R. (2013). Revista Ciencias e Ingeniería al Día, 2013, 8(2), Julio-Diciembre de 2013, 29-38 ISSN: 1900-768X

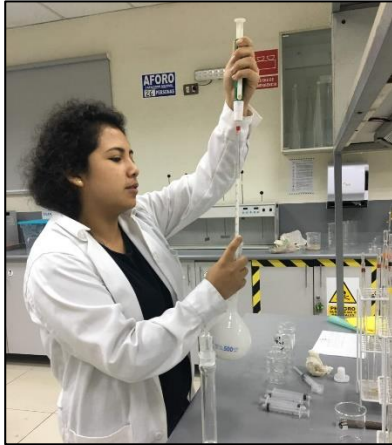
Trujillo, D., Duque, L., Arcila, J., Rincón, A., Pacheco, S. y Herrera, O. (2014). Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano. Universidad Católica de Manizales. Bucaramanga, Colombia

Vargas C , Rojas R , Joseli J (2004).Control y vigilancia de la calidad del agua de consumo humano.Lima-Perú.Disponible en PDF.Recopilado de <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/e/cd-cagua/ref/text/09.pdf>>

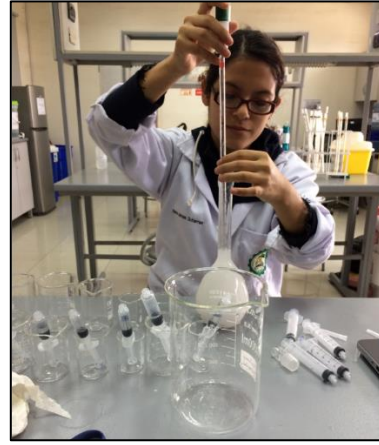
- Valeriano, J., Chamorro, M., Rodrigo, A. (2013) Polielectrolitos orgánicos naturales en el tratamiento de agua para consumo humano. Universidad Peruana Unión. Revista de Investigación Universitaria 2, 88-95.
- Vargas, C., Romero, E. (2006). Aprovechamiento de algunos materiales en el desarrollo de coagulantes y floculantes para el tratamiento de aguas en Costa Rica.
- Vargas, J., Macarulla, J. (1971). Fisicoquímica Fisiológica-coloides. 5ta ed. Pp1-11. Editorial Interamericana, Madrid. Disponible en: <http://cidta.usal.es/residuales/libros/logo/pdf/coloides.pdf>
- Vargas L (2004). Capítulo 6 – Floculación.
- Vogh, R.; Warrington, J. y Black, A. (1969). Potato starch as a sludge conditioner. J. AWWA, 61(6): 276- 284.
- Wakeman RJ , Tarleton E . 1999. FILTRATION: equipment selection, modeling, and process simulation. Elsevier Science Ltd. New York, 446. . Citado por Ebeling J , Welsh C , Rishel K (2005).
- Wang, Z.; White, J. (1994). Structure and physicochemical properties of starches from oats with different lipid content. Cereal Chemistry, v. 71, n. 5, p. 443-450.
- Walton, J., Tuniz, C., Fink, D., Jacobsen, G. and Wilcox, D. (1995). Uptake of trace amounts of aluminum into the brain from drinking water. Neurotoxicology 16, p.187-190.
- Zerbatto, M.; Gilli, M.I.; Carrera, E.; Eliggi, S.; Vaira, S., Eluk, D. y Abramovich, B. (2007). Coagulación optimizada: influencia en la eliminación de enteroparásitos. Ing. Sanit. y Amb. 93: 59– 63
- Citado por : Zerbatto M , 2012 Coagulación optimizada en el tratamiento de potabilización de agua: Su efecto sobre la remoción de enteroparásitos.. Tesis para la obtención del Grado Académico de Magister en Salud Ambiental. Universidad Nacional Del Litoral Facultad De Bioquímica Y Ciencias Biológicas
- Zobel, F. 1988. Molecules to granules: A comprehensive starch review. Starch/Stärke, v. 40, n. 2, p. 41- 50.

## ANEXOS

### Anexo 1– Ensayo de prueba de jarras



Preparación de la solución de Sulfato de aluminio  $Al_2SO_3$



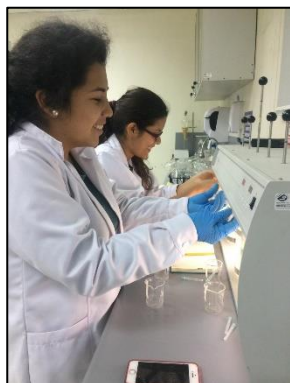
Preparación de solución de almidón de pituca (*Colocassia Esculenta*)



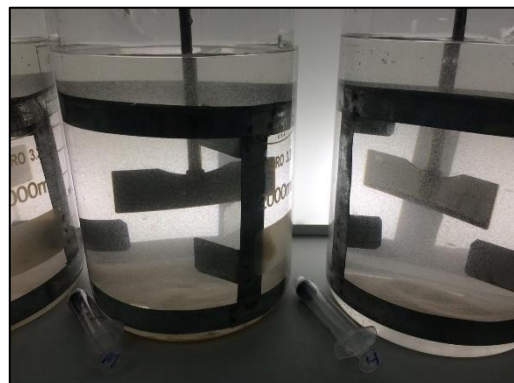
Preparación de muestra patrón ( 400 UNT)



Colocación de dosis de sulfato de aluminio y almidón de pituca



Colocación de dosis de sulfato de aluminio y almidón de pituca



Proceso de mezcla lenta





Proceso de sedimentación



Sustracción de muestra para medición de turbidez



Sustracción de muestra para medición de turbidez



**INLAD S.A.C.**

**ASEGURAMIENTO METROLÓGICO**

**INDUSTRIAS & LABORATORIOS AL DIA S.A.C.**  
Empresa de Servicios Metroológicos



**LABORATORIO DE CALIBRACIÓN CON PATRONES TRAZABLES INDECOPI - INACAL**



# CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LE-367-2018

Página 2 de 2

## 5. CONDICIONES AMBIENTALES

Temperatura °C	22.5	22.4
Humedad Relativa %HR	61	62

## 6. TRAZABILIDAD

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI)

Trazabilidad	Patrón utilizado	Certificado de calibración
DM-INACAL	Solución 4 pH	MRC-009-2018
DM-INACAL	Solución 7 pH	MRC-010-2018
DM-INACAL	Solución 10 pH	MRC-011-2018
Termómetro		LT-049-2018

## OBSERVACIONES

Con fines de identificación se colocó una etiqueta adhesiva de color verde con la indicación

## RESULTADOS DE CALIBRACIÓN

Los resultados de la calibración dependen del uso, mantenimiento y conservación del instrumento de medición

## RESULTADOS DE MEDICIÓN

Indicación del instrumento (pH)	Valor	Incertidumbre (pH)
4.01	4.00	0.01
7.01	7.00	0.00
10.01	10.02	0.02

Los resultados de pH están dados a la temperatura de 25 °C

NOTA: No se usó el sensor de temperatura externo del instrumento



PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE ESTE DOCUMENTO SIN LA AUTORIZACIÓN DE INDUSTRIAS & LABORATORIOS AL DIA S.A.C.

Av 28 de Julio Mz. V1-Lf 17 - alt. Cdra. 15 de Angélica Gamarra - Los Olivos, Lima  
Teléfonos 531 0003, Nextel (946480783, 51\*648\*783), Claro (965305195), Movistar (939295001)  
E-mail: [metrologia@inladsac.com](mailto:metrologia@inladsac.com) Web site: [www.inladsac.com](http://www.inladsac.com)



**INLAD S.A.C.**  
**ASEGURAMIENTO METROLÓGICO**



**LABORATORIO DE CALIBRACIÓN CON PATRONES TRAZABLES INDECOPI - INACAL.**



**INDUSTRIAS & LABORATORIOS AL DÍA S.A.C.**  
**Empresa de Servicios Metrológicos**

**CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° LE-367-2018**

Página 2 de 2

**5. CONDICIONES AMBIENTALES**

CONDICIÓN	INICIAL	FINAL
Temperatura °C	22.3	22.4
Humedad Relativa %HR	61	62

**6. TRAZABILIDAD**

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Trazabilidad	Patrón utilizado	Certificado de calibración
DM-INACAL	Solución 4 pH	MRC-009-2018
DM-INACAL	Solución 7 pH	MRC-010-2018
DM-INACAL	Solución 10 pH	MRC-011-2018
DM-INACAL	Termómetro	LT-049-2018

**OBSERVACIONES**

Con fines de identificación se colocó una etiqueta adhesiva de color verde con la indicación

El resultado de la calibración depende del uso, mantenimiento y conservación del instrumento de medición

**RESULTADOS DE MEDICIÓN**

Indicador del instrumento (pH)	Valor	Indicador de Error (pH)	Incertidumbre (pH)
4.01	4.00	0.01	0.02
7.01	7.01	0.00	0.02
10.01	10.02	0.01	0.02

Los resultados de pH están dados a la temperatura de 25 °C

NOTA: No se usó el

sensor de temperatura externo del instrumento



PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE ESTE DOCUMENTO SIN LA AUTORIZACIÓN DE INDUSTRIAS & LABORATORIOS AL DÍA S.A.C.

Av 28 de Julio Mz. V1 Lt 17 alt. Cdra. 15 de Angélica Gamarra Los Olivos, Lima  
 Teléfonos 531.0003 Nextel (966480783, 51\*648\*783), Claro (965305195), Movistar (939295001)  
 E-mail: [metrologia@inladsac.com](mailto:metrologia@inladsac.com) web site: [www.inladsac.com](http://www.inladsac.com)





**CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° MM-375-2018**

**FECHA DE EMISIÓN: 2018-08-28**  
**PAGINA: 1 de 3**  
**EXP. I.D.: 1879-2018**

**1. SOLICITANTE:** UNIVERSIDAD PERUANA UNION  
**DIRECCION:** GAR. CENTRAL, KM: 19 VILLA UNION-ÑAÑA- LIMA- LIMA; LURIGANCHO  
**2. INSTRUMENTO DE MEDICIÓN:** BALANZA  
**CLASIFICACION:** NO AUTOMÁTICO  
**MARCA:** OHAUS  
**MODELO:** Nihiliter Pro AV262C  
**N.º SERIE:** 8030111002  
**TIPO:** ELECTRONICA  
**CLASE DE EXACTITUD:** 0.001 g  
**CAPACIDAD MÁXIMA:** 260 g  
**DIVISION DE ESCALA (d):** 0.0001 g  
**DIVISION DE VERIFICACION:** 0.001 g  
**CAPACIDAD MINIMA:** 0.01 g  
**CODIGO DE IDENTIFICACION:** No Indica  
**COE. DE TEMPERATURA:** 0,0002  
**AT. LOCAL:** 20,0 °C hasta 24,0 °C

**3. METODO Y PATRON DE MEDICION:**  
 La calibración se realizó por comparación directa ante las indicaciones de lectura y las cargas aplicadas mediante pesas patrón, siguiendo el procedimiento PC-001, Procedimiento para la calibración de balanzas de funcionamiento No Automático de Clase II (Edición 04) del SNM/INDECOPI.  
 Se utilizó Pesas Patrón con Certificado: LM-C-048-2018 del DM/INACAL.

**4. RESULTADO:**  
 La incertidumbre de la medición se ha determinado con un factor de cobertura k = 2 para un nivel de confianza de 95%.  
 Los ensayos realizados se encuentran en las páginas 2 y 3 del presente documento.

**5. OBSERVACIONES:**  
 Con fines de identificación se ha colocado una etiqueta adhesiva de color verde con la indicación "CALIBRADOS".  
 De acuerdo a la NMP 4-003-2009 (2da. Edición), el límite inferior de medida para esta balanza no debe ser menor de 0,01 g, como se indicó en la balanza.  
 Se ha redondeado la desviación de las pesas a la división de la balanza.  
 La periodicidad de la calibración está en función del uso, conservación y mantenimiento del instrumento de medición o reglamentos vigentes.  
 Los resultados se refieren únicamente al equipo ensayado en el momento de la calibración y en las condiciones especificadas en este documento.

**Ing. Ernesto Rodríguez Morón**  
 Jefe de Metrología

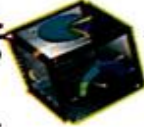




**INLAD S.A.C.**

**ASEGURAMIENTO METROLÓGICO**

**INDUSTRIAS & LABORATORIOS AL DIA S.A.C.**  
Empresa de Servicios Metrológicos



**LABORATORIO DE CALIBRACIÓN CON PATRONES TRAZABLES INDECOPI - INACAL**



**CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN N° MM-375-2018**

PAGINA: 2 de 3

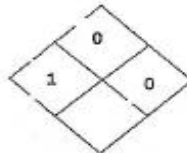
FECHA DE CALIBRACIÓN	2018-08-26		
LUGAR DE CALIBRACIÓN	LABORATORIO		
<b>INSPECCIÓN VISUAL</b>			
AJUSTE DE CERO	Tiene	ESCALA	No Tiene
OSCILACIÓN LIBRE	Tiene	CURSOR	No Tiene
PLATAFORMA	Tiene	NIVEL DE BURBUJA	Tiene
SISTEMA DE TRABAJO	No Tiene	PLATAFORMA	Tiene
<b>ENSAYO DE REPETIBILIDAD</b>			
Temperatura (°C)	22.2	Temperatura (°C)	22.5
Carga L1 = 30.0000 g		Carga L2 = 260.0002 g	
Indicador	1	Indicador	2
Medida (g)	129.9998	Medida (g)	260.0004
Medida (g)	129.9998	Medida (g)	260.0005
Medida (g)	129.9998	Medida (g)	260.0005
Medida (g)	129.9997	Medida (g)	260.0004
Medida (g)	129.9998	Medida (g)	260.0003
Medida (g)	129.9998	Medida (g)	260.0005
Medida (g)	129.9999	Medida (g)	260.0005
Medida (g)	129.9998	Medida (g)	260.0005
Medida (g)	129.9998	Medida (g)	260.0006
Medida (g)	129.9998	Medida (g)	260.0005
<b>CARGA (g)</b>	<b>30.0000</b>	<b>Ensayo - E<sub>min</sub> (g)</b>	<b>0.0002</b>
<b>160.0002</b>	<b>0.0003</b>	<b>e<sub>m.p.</sub> (g)</b>	<b>0.0003</b>



Av 28 de Julio Mz. VI Lt 17 4to. Cdra 15 de Angélica Gamarra Los Olivos, Lima - Lima  
Teléfonos 531 0003, Nextel (946480783 51 648 783), Claro (965305195), Movistar (939295001)  
E-mail: metrologia@inladsac.com Web Site: www.inladsac.com



## HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD



**Nombre del Producto:** SULFATO DE ALUMINIO FINO

### SECCIÓN 1: IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO

Producto manufacturado a partir de hidróxido de aluminio purificado, ó bauxita, según el tipo de sulfato de aluminio, el cual puede ser libre de hierro (tipo A), grados B500 y B200, que difieren en su contenido de material inerte y hierro. Corresponde aproximadamente a la fórmula  $Al_2/SO_4 \cdot 13.14H_2O$ .

### SECCIÓN 2: COMPOSICIÓN E INFORMACIÓN DE LOS COMPONENTES

El sulfato de aluminio granulado con 14 moles de agua, contiene entre 15.5 a 17% de aluminio, expresado como  $Al_2O_3$ , peso molecular de 594.14. El peso molecular del sulfato de aluminio anhidro (si las moles de agua) es de 342.14.

### SECCIÓN 3: IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS

El sulfato de aluminio no es considerado como un material particularmente peligroso. Su acción acida amortiguada es irritante cuando el sulfato de aluminio toma contacto con los ojos, la piel ó membranas mucosas.

No se dispone datos cuantitativos de la toxicidad de los sulfates de aluminio.

Presenta riesgo de lesiones oculares graves (R41). Se recomienda usar gafas protectoras y máscara contra polvos, así como no fumar durante su uso.

**Por contacto con la piel:** se producen leves irritaciones.

**Por ingestión:** Irritaciones en las membranas mucosas en la boca, garganta, esófago y tracto gastro-intestinal.

**Características Especiales:** Astringente.

### SECCIÓN 4: PRIMEROS AUXILIOS

En caso de contacto con los ojos, lavar con abundante agua. Si la irritación persiste, consultar al médico. Si se ha inhalado el polvo, retirar a una zona de aire fresco. Si fue ingerido, beber abundante agua, inducir el vómito y llamar al médico.





## HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD

---

### SECCIÓN 5: EXTINCIÓN DE INCENDIOS

No es combustible. No es oxidante ni reductor. En caso de incendios, puede producir trióxido de azufre.

### SECCIÓN 6: DERRAMES ACCIDENTALES

No aplicable.

En caso de soluciones preparadas con este producto, ventilar el área. Sólo ingresar con protección personal. Parar ó reducir el derrame si es seguro poder hacerlo.

Evitar que el material ingrese al alcantarillado.

**Materiales desactivadores:** Cal, carbonato de sodio, o hidróxido de sodio

### SECCIÓN 7: MANIPULACIÓN Y ALMACENAJE

El sulfato de aluminio es envasado en bolsas de polipropileno de 25 y 50 Kg. Netos. Debe almacenarse en lugares frescos, secos y bajo tacho, sobre parihuelas. Es recomendable apilar en rumas de un máximo de 18 bolsas bajo las condiciones mencionadas.

Para el embarque y transporte vía marítima se recomienda cubrir las bolsas adecuadamente para protegerlas de la humedad, luz solar directa y cambios de temperatura extremos.

### SECCIÓN 8: CONTROLES DE EXPOSICIÓN Y PROTECCIÓN PERSONAL

**Protección de cara y ojos:** Usar lentes panorámicos ó careta protectora.

**Protección dérmica:** Usar guantes.

**Protección respiratoria:** Necesaria en presencia de polvo.

**Riesgos específicos:** Ninguno conocido.

### SECCIÓN 9: PROPIEDADES FÍSICO - QUÍMICAS:

Esas varían según el tipo de Sulfato de Aluminio ya sean TIPO A, o TIPO B



## HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD

Características	Especificaciones entre
Aluminio, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	15.50 – 17.0 mín.
Basicidad, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	0.60 – 0.70 máx.
Hierro, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	0.05 – 0.50 máx.
Insoluble, %	0.20 – 5.00 máx.

**Estado Físico:** Sólido.

**Color:** Blanco (tipo A), beige (tipos B200 y B500)

**Olor:** Inodoro.

**pH, 50g/L, 25 °C:** 3.5 aprox.

**Punto de fusión, °C:** 90-95

**Punto de ebullición, °C:** No disponible.

**Densidad aparente:** 820 Kg/m<sup>3</sup> aprox.

**Descomposición térmica:** Desde 90 °C

**Solubilidad en Agua, 20 °C:** Fácilmente soluble.

### SECCIÓN 10: ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

El sulfato de aluminio comercial con aprox. 14 moles de agua de cristalización (42.42%) es relativamente estable. Si el ambiente es húmedo, puede llegar a ganar peso, hasta alcanzar la composición del Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>.18H<sub>2</sub>O (48.65 % de agua de cristalización), que es la forma cristalina estable, pudiendo incrementar su peso hasta en un 6%.

**DESCOMPOSICIÓN TÉRMICA:** A partir de 90°C

### SECCIÓN 11: INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

**Irritabilidad:** Corrosivo.

**Sensibilización:** No Disponible.

**Efectos Crónicos/Agudos:** El contacto frecuente y prolongado puede causar dermatitis.

**Materiales.** Sinérgicos. No Disponible.

#### **Datos de Toxicidad animal:**

LD50 (ratones, oral) = 6207 mg/Kg.

LD50 (ratones, IP) = 1735 g/Kg.

LD50 (rata, oral) = 1930 mg/kg

Carcinogenicidad - No considerado

Como carcinogénico por IARC, NTP, OSHA.

Toxicidad /reproducibilidad - No Disponible.

Teratogenicidad - No Disponible.

Mutagenicidad - No Disponible.



## HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD

---

### SECCIÓN 12: INFORMACIÓN RELACIONADA AL MEDIO AMBIENTE

**Toxicidad a los peces:** TLm (48 horas, pez mosquito) = 240mg/L

**Biodegradabilidad:** No disponible

**Efectos Ambientales:** Puede ser dañino a la vida acuática. Su toxicidad se asocia con el pH ácido. Cuando el suelo se contamina con este material éste se acidifica.

### SECCIÓN 13: CONSIDERACIONES PARA DESCARTE

Disposición de los desperdicios: Disponer de acuerdo con la legislación local, regional o nacional. Si no se dispone, consultar la legislación internacional

### SECCIÓN 14: INFORMACIÓN RELATIVA AL TRANSPORTE

Las informaciones relativas al transporte serán de acuerdo a la reglamentación nacional o internacional vigente.

Para el transporte se recomienda cubrir las bolsas adecuadamente para protegerlas de la humedad, luz solar directa y cambios de temperatura extremos.

### SECCIÓN 15: INFORMACIÓN REGLAMENTARIA

Clasificación WHMIS: E

NOTA: La hoja de seguridad del Sulfato de Aluminio en solución ha sido preparada en base al criterio de riesgo dado por las Leyes de Canadá. Por lo tanto, esta Hoja de Seguridad (MSDS) contiene toda la información requerida por la Regulación de dicho país, debido a la no disponibilidad de regulación específica en el Perú.

### SECCIÓN 16: OTRAS INFORMACIONES:

La presente información procede de fuentes confiables y es, según nuestro conocimiento y convicción precisa y fidedigna en el momento que fue compilada. No obstante, no se asume ninguna responsabilidad ni garantía (expresa o implícita) sobre la precisión, Habilidad o integridad de la información aquí contenida.

La presente información se refiere a los materiales específicos designados y no puede ser válida para dicho material utilizado en combinación con otros materiales o procesos.

#### En Caso de Emergencia Comunicarse:

Central de emergencia

Fono: 116