

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**EFEECTO DEL COAGULANTE/FLOCULANTE A PARTIR DE DOS
VARIETADES DE *Manihot esculenta* (YUCA) EN AGUAS
CONTAMINADAS A ESCALA DE LABORATORIO, 2024**

Tesis

**Para obtener título de
INGENIERO AMBIENTAL**

**Presentado por
DENILSON PAZ OTINIANO**

Tingo María - Perú

2025



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N°121-2025-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 09 de octubre de 2025, a horas 05:00 p.m. en la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

**“EFECTO DEL COAGULANTE/FLOCULANTE A PARTIR DE DOS VARIEDADES DE
Manihot esculenta (YUCA) EN AGUAS CONTAMINADAS A ESCALA DE
LABORATORIO, 2024”**

Presentado por el Bachiller: **PAZ OTINIANO, DENILSON** después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de **“MUY BUENA”**.

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL** que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

Tingo María, 28 de octubre de 2025

Dr. EDILBERTO CHUQUILIN BUSTAMANTE
PRESIDENTE

Blgo. MSc. CESAR AUGUSTO GOZME SULCA
MIEMBRO



Ing. MSc. PATRICIA PILAR ROMERO USHUÑAHUA
MIEMBRO

Dr. LUIS EDUARDO ORE CIERTO
ASESOR



UNAS

VICERRECTORADO DE
INVESTIGACIÓN

INSTITUTO DE
INVESTIGACIÓN

UNIDAD DE SOPORTE
CIENTÍFICO
REPOSITORIO INSTITUCIONAL

"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres"
"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 380 - 2025 - CS-RIDUNAS

El Jefe de la Unidad de Soporte Científico de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

Programa de Estudio:

Ingeniería Ambiental

Tipo de documento:

Tesis	X	Trabajo de Suficiencia Profesional	
-------	---	------------------------------------	--

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE	
		SIMILITUD	CONTENIDO GENERADO POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL
EFFECTO DEL COAGULANTE/FLOCULANTE A PARTIR DE DOS VARIETADES DE <i>Manihot esculenta</i> (YUCA) EN AGUAS CONTAMINADAS A ESCALA DE LABORATORIO, 2024	DENILSON PAZ OTINIANO	03 % Tres	Menor a 20 %

Tingo María, 18 de noviembre de 2025.

 UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE SOPORTE CIENTÍFICO

ING. EINSTEIN A. ORTIZ MORALES
JEFE

C.C. Archivo

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES ESCUELA
PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



INFORME DE TESIS

**EFFECTO DEL COAGULANTE/FLOCULANTE A PARTIR DE DOS
VARIETADES DE *Manihot esculenta* (YUCA) EN AGUAS
CONTAMINADAS A ESCALA DE LABORATORIO, 2024**

ÁREA DE INVESTIGACIÓN	: Ciencia y Tecnología Ambiental-PIBIOT
GRUPO DE INVESTIGACIÓN	: Ciencia y tecnología Ambiental
LÍNEA DE INVESTIGACIÓN	: Tecnología para reducir la contaminación
EJECUTOR	: Denilson Paz Otiniano
ASESOR	: Dr. Luis Eduardo Oré Cierzo
LUGAR DE EJECUCIÓN	: Laboratorio de calidad de agua de la Universidad Nacional Agraria de la Selva
DURACIÓN	: Fecha de inicio 15/07/2024 Fecha de término 15/02/2025
FINANCIAMIENTO	: Propio (X) FEDU () Externo ()
FEDU	: S/.00.00
Propio	: S/. 6 688,50
Otros	: S/.00.00

Tingo María - Perú, julio del 2025



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Tingo María

VICERECTORADO DE INVESTIGACION DIRECCION DE GESTIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

“Promoviendo la Calidad de la Investigación”

“Año de la Unidad, la Paz y el Desarrollo”

REGISTRO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO UNIVERSITARIO

Universidad	: Universidad Nacional Agraria de la Selva
Facultad	: Facultad de Recursos Naturales Renovables
Escuela profesional	: Ingeniería Ambiental
Título del proyecto	: Efecto del coagulante/floculante a partir de dos variedades de <i>Manihot esculenta</i> (yuca) en aguas contaminadas a escala de laboratorio, 2024
Objetivo general	: Evaluar el efecto del coagulante/floculante a partir de dos variedades de <i>Manihot esculenta</i> (yuca) en aguas contaminadas a escala de laboratorio, 2024
Autor	: Paz Otiniano Denilson
DNI	: 74421106
Correo Electrónico	: denilson.paz@unas.edu.pe
Asesor	: Dr. Oré Cierzo, Luis Eduardo
Área de investigación	: Ciencia y tecnología Ambiental - PIBIOT
Grupo de investigación	: Ciencia y Tecnología Ambiental
Línea(s) de investigación	: Tecnología para reducir la contaminación
Lugar de ejecución	: Laboratorio de Calidad de Agua de la Universidad Nacional Agraria de la Selva
Fecha de inicio	: 15 de diciembre del 2023
Fecha de término	: 15 de julio del 2024
Presupuesto	: S/.6 688,50
Financiamiento	: Propio (X) FEDU () Externo ()

DEDICATORIA

Dedico este logro a Dios, quien ha sido mi guía y fortaleza en cada paso de este camino. Su infinita misericordia, sabiduría y amor me han permitido superar los desafíos y continuar con fe y esperanza. A Él le agradezco por brindarme la oportunidad y la fuerza necesarias para alcanzar esta meta.

A mis padres, quienes siempre han sido mi pilar y fuente inagotable de inspiración. Su amor incondicional, su ejemplo de esfuerzo y su apoyo constante han sido fundamentales en mi vida. Este logro es tan suyo como mío, pues sin su dedicación y confianza, este sueño no habría sido posible.

A mis hermanos, por su compañía incondicional y por estar siempre a mi lado. Su apoyo, sus palabras de aliento y su presencia han sido una motivación invaluable en este proceso. Este logro también les pertenece, pues forman parte esencial de mi vida y de este triunfo que hoy celebro con el corazón lleno de gratitud.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de esta investigación. Este proyecto ha sido un viaje lleno de aprendizaje y descubrimientos, y no habría sido posible sin el apoyo y la colaboración de diversas personas.

Agradezco profundamente a la institución educativa que me brindó una formación académica de calidad, la cual ha sido fundamental para mi desarrollo profesional. Esta institución ha sido el pilar de mi crecimiento y aprendizaje, proporcionándome las herramientas necesarias para enfrentar los retos que se presentaron durante esta investigación.

A mi asesor, le agradezco por su apoyo incondicional, su guía experta y por siempre estar dispuesto a compartir su conocimiento. Su dedicación y compromiso han sido esenciales para el desarrollo de este trabajo, y su orientación me ha permitido alcanzar este logro.

A mis amigos, les agradezco enormemente por su colaboración en la ejecución y redacción de este proyecto. Su ayuda fue crucial para llevar a cabo esta investigación de manera exitosa, y su amistad ha sido un apoyo constante en todo momento.

A mis jurados, agradezco por su tiempo, esfuerzo y valiosas observaciones durante el proceso de evaluación. Sus comentarios y sugerencias han enriquecido este trabajo, permitiéndome mejorar y alcanzar los estándares que se esperaban.

Muchas gracias y que Dios les bendiga.

INDICE GENERAL

	Página
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivo general.....	2
1.1. Objetivo específicos.....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. Antecedentes.....	3
2.1.1. Internacionales.....	3
2.1.2. Nacionales.....	4
2.1.3. Locales.....	4
2.2. Marco teórico.....	5
2.2.1. Contaminación del agua.....	5
2.2.2. Agua de quebrada.....	6
2.2.3. Proceso de coagulación-floculación.....	6
2.2.4. Coagulantes sintéticos.....	7
2.2.5. Coagulantes naturales.....	7
2.2.6. Turbidez.....	8
2.2.7. pH.....	8
2.2.8. Yuca (<i>Manihot esculenta</i>).....	8
2.2.9. Yuca blanca.....	9
2.2.10. Yuca amarilla.....	10
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	11
3.1. Lugar de ejecución.....	11
3.1.1. Ubicación política de la zona de estudio.....	11
3.1.2. Ubicación geográfica de la zona de estudio.....	11
3.2. Materiales y métodos.....	12
3.2.1. Materiales y equipos.....	12
3.2.2. Metodología.....	12
3.2.3. Criterios de investigación.....	17
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	22
4.1. Parámetros fisicoquímicos de las aguas contaminadas naturalmente provenientes de la quebrada Córdova del BRUNAS.....	22
4.2. Efecto del coagulante-floculante a partir de dos variedades de <i>Manihot esculenta</i> (yuca) en las propiedades físicas de las aguas contaminadas naturalmente.....	24
Comportamiento del coagulante/floculante a partir de la yuca	
4.2.1. blanca en las propiedades físicas de las aguas contaminadas naturalmente.....	24

4.2.2.	Comportamiento del coagulante/floculante a partir de la yuca amarilla en las propiedades físicas de las aguas contaminadas naturalmente.....	32
4.2.3.	Análisis estadístico del efecto del coagulante/floculante a partir de la yuca blanca y amarilla en las propiedades físicas de las aguas contaminadas naturalmente.....	39
4.3.	Efecto del coagulante-floculante a partir de dos variedades de <i>Manihot esculenta</i> (yuca) en las propiedades químicas de las aguas contaminadas naturalmente.....	47
4.3.1.	Comportamiento del coagulante/floculante a partir de la yuca blanca en las propiedades químicas de las aguas contaminadas naturalmente.....	47
4.3.2.	Comportamiento del coagulante/floculante a partir de la yuca amarilla en las propiedades químicas de las aguas contaminadas naturalmente.....	58
4.3.3.	Análisis estadístico del efecto del coagulante/floculante a partir de la yuca blanca y amarilla en las propiedades químicas de las aguas contaminadas naturalmente.....	67
4.4.	Eficiencia del coagulante-floculante a partir de dos variedades de <i>Manihot esculenta</i> (yuca) en la remoción de la turbiedad y de la demanda bioquímica de oxígeno de las aguas contaminadas naturalmente.....	79
4.4.1.	Comportamiento del coagulante/floculante a partir de la yuca blanca en la remoción de la turbiedad y de la demanda bioquímica de oxígeno.....	79
4.4.2.	Comportamiento del coagulante/floculante a partir de la yuca amarilla en la remoción de la turbiedad y de la demanda bioquímica de las aguas contaminadas naturalmente.....	84
4.4.3.	Análisis estadístico del efecto del coagulante/floculante a partir de la yuca blanca y amarilla en la remoción de la turbiedad y de la demanda bioquímica de las aguas contaminadas naturalmente.....	89
V.	CONCLUSIONES.....	101
VI.	PROPUESTAS AL FUTURO.....	102
VII.	REFERENCIAS.....	103
	ANEXO.....	111

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
1. Parámetros iniciales del agua turbia de la quebrada Córdoba del BRUNAS.....	13
2. Métodos para el análisis fisicoquímico del agua.....	15
3. Operacionalización de las variables de investigación.....	19
4. Análisis de varianza por factor e interacción del diseño factorial.....	20
5. Parámetros iniciales del agua contaminada naturalmente de la quebrada Córdoba para el experimento con la yuca blanca.....	24
6. Resultados del efecto de los coagulantes/floculantes a partir de la yuca blanca en los parámetros físicos del agua contaminada.....	25
7. Resultados del comportamiento de los coagulantes/floculantes a partir de la yuca amarilla en los parámetros físicos del agua contaminada.....	33
8. Prueba de normalidad de los parámetros físicos.....	40
9. Análisis estadístico para los parámetros físicos empleando: Transformación de Rango Alineado (ART).....	41
10. Prueba de comparaciones múltiples de Dunn del parámetro físico turbiedad.....	42
11. Prueba de comparaciones múltiples de Dunn del parámetro físico STD.....	44
12. Prueba de comparaciones múltiples de Dunn del parámetro físico CE.....	45
13. Modelo global del comportamiento de la turbiedad frente a la especie de yuca, parte del vegetal y la dosis.....	47
14. Resultados del efecto de los coagulantes/floculantes a partir de la yuca blanca en los parámetros químicos del agua contaminada.....	49
15. Resultados del efecto de los coagulantes/floculantes a partir de la yuca amarilla en los parámetros químicos del agua contaminada.....	60
16. Prueba de normalidad de los parámetros químicos.....	68
17. Análisis estadístico para los parámetros químicos empleando: Transformación de Rango Alineado (ART).....	70
18. Prueba de comparaciones múltiples de Dunn del parámetro químico OD.....	71
19. Prueba de comparaciones múltiples de Dunn del parámetro químico pH.....	72
20. Prueba de comparaciones múltiples de Dunn del parámetro químico DQO.....	74
21. Prueba de comparaciones múltiples de Dunn del parámetro químico DBO ₅	75
22. Modelo global del comportamiento del pH frente a la especie de yuca, parte del vegetal y la dosis.....	77
23. Modelo global del comportamiento del DBO ₅ frente a la especie de yuca, parte del vegetal y la dosis.....	78
24. Resultados del efecto de los coagulantes/floculantes a partir de la yuca blanca en la eficiencia de remoción de la turbiedad y de la demanda bioquímica de oxígeno....	80

25.	Resultados del efecto de los coagulantes/floculantes a partir de la yuca amarilla en la eficiencia de remoción de la turbiedad y de la demanda bioquímica de oxígeno..	85
26.	Prueba de normalidad de los parámetros de eficiencia de remoción de turbiedad y demanda bioquímica de oxígeno.....	90
27.	Análisis estadístico para los parámetros eficiencia de remoción: Transformación de Rango Alineado (ART).....	91
28.	Prueba de comparaciones múltiples de Dunn del parámetro eficiencia de remoción de turbidez.....	93
29.	Prueba de comparaciones múltiples de Dunn del parámetro eficiencia de demanda bioquímica de oxígeno.....	94
30.	Modelo global del comportamiento de la eficiencia de remoción de turbidez frente a la especie de yuca, parte del vegetal y la dosis.....	96
31.	Modelo global del comportamiento de la eficiencia de remoción de DBO5 frente a la especie de yuca, parte del vegetal y la dosis.....	99
32.	Prueba de comparaciones múltiples de Dunn para los factores A, B, C, AB, AC, BC y ABC significativos estadísticamente.....	112

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
1. Mecanismo de coagulación-floculación.....	7
2. Morfología de la yuca.....	9
3. Mapa de ubicación del lugar de ejecución.....	11
4. Esquema del diseño de investigación.....	20
5. Comportamiento del parámetro turbiedad al aplicarle el coagulante/floculante a partir de la yuca blanca.....	27
6. Comportamiento del parámetro solidos totales disueltos al aplicarle el coagulante/floculante a partir de la yuca blanca.....	29
7. Comportamiento del parámetro conductividad eléctrica al aplicarle el coagulante/floculante a partir de la yuca blanca.....	31
8. Comportamiento del parámetro turbiedad al aplicarle el coagulante/floculante a partir de la yuca amarilla.....	35
9. Comportamiento del parámetro solidos totales disueltos al aplicarle el coagulante/floculante a partir de la yuca amarilla.....	37
10. Comportamiento del parámetro conductividad eléctrica al aplicarle el coagulante/floculante a partir de la yuca amarilla.....	38
11. Comportamiento del parámetro oxígeno disuelto al aplicarle el coagulante/floculante a partir de la yuca blanca.....	51
12. Comportamiento del parámetro pH al aplicarle el coagulante/floculante a partir de la yuca blanca.....	53
13. Comportamiento del parámetro demanda química de oxígeno al aplicarle el coagulante/floculante a partir de la yuca blanca.....	55
14. Comportamiento del parámetro demanda bioquímica de oxígeno al aplicarle el coagulante/floculante a partir de la yuca blanca.....	58
15. Comportamiento del parámetro oxígeno disuelto al aplicarle el coagulante/floculante a partir de la yuca amarilla.....	62
16. Comportamiento del parámetro pH al aplicarle el coagulante/floculante a partir de la yuca amarilla.....	64
17. Comportamiento del parámetro DQO al aplicarle el coagulante/floculante a partir de la yuca amarilla.....	65
18. Comportamiento del parámetro DBO ₅ al aplicarle el coagulante/floculante a partir de la yuca amarilla.....	67
19. Comportamiento del parámetro eficiencia de remoción de turbiedad al aplicarle el coagulante/floculante a partir de la yuca blanca.....	82
20. Comportamiento del parámetro eficiencia de remoción de DBO ₅ al aplicarle el coagulante/floculante a partir de la yuca blanca.....	84
21. Comportamiento del parámetro eficiencia de remoción de turbidez al aplicarle el coagulante/floculante a partir de la yuca amarilla.....	87
22. Comportamiento del parámetro eficiencia de remoción de DBO ₅ al aplicarle el coagulante/floculante a partir de la yuca amarilla.....	88
23. Modelo global predicho de la eficiencia de remoción de turbiedad.....	97
24. Modelo global predicho de la eficiencia de remoción de DBO ₅	100

25.	Recolección de agua de la quebrada Córdoba – BRUNAS.....	129
26.	Recolección de muestras de yuca para preparación del coagulante/floculante....	129
27.	Recolección de tallos y hojas de la yuca para la preparación del coagulante/floculante.....	130
28.	Secado de las muestras de cáscara de yuca para preparación del coagulante/floculante.....	130
29.	Conservación del material particulado del tallo, hoja, cascara y raíz secundaria de la yuca.....	131
30.	Pesado del material particulado para los tratamientos experimentales del agua...	131
31.	Experimento de coagulación/floculación en el test de jarras.....	132
32.	Determinación de la demanda química de oxígeno.....	132

RESUMEN

El presente estudio evaluó el efecto del coagulante/floculante elaborado a partir de dos variedades de *Manihot esculenta* (yuca blanca y yuca amarilla) en el tratamiento de aguas contaminadas provenientes de la quebrada Córdova del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María, durante el 2024. La investigación se desarrolló a escala de laboratorio bajo un diseño factorial $2 \times 4 \times 4$, considerando como factores la variedad de yuca, la parte del vegetal utilizada (tallo, hoja, raíz secundaria y cáscara) y la dosis aplicada (0,0; 0,1; 0,3 y 0,5 g/L). Se evaluaron parámetros fisicoquímicos iniciales y posteriores al tratamiento, con énfasis en turbidez y demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅).

Los resultados demostraron que la dosis fue el factor más determinante en la eficiencia de remoción, alcanzándose valores óptimos cercanos a 0,3 g/L, con eficiencias superiores al 90% en turbidez y al 85% en DBO₅, sin diferencias significativas entre las variedades de yuca. El análisis estadístico confirmó efectos significativos en los parámetros evaluados y un comportamiento polinómico de segundo grado, con incremento de eficiencia hasta la dosis óptima y disminución posterior por sobredosisificación.

Se concluye que el coagulante de yuca es una alternativa técnica y ambientalmente viable para el tratamiento de aguas contaminadas, aprovechando recursos agrícolas locales y contribuyendo a la sostenibilidad de comunidades rurales mediante una opción de bajo costo y alta eficiencia.

Palabras claves: Coagulante natural, *Manihot esculenta*, Turbidez, DBO₅, Tratamiento de agua

ABSTRACT

In the present study the effect of a coagulant/flocculant elaborated from two varieties of *Manihot esculenta* (white yucca and yellow yucca) was evaluated for the treatment of contaminated water from the Cordova watershed in the Universidad Nacional Agraria de la Selva's forest reserve in Tingo Maria, [Peru], during the year 2024. The research was carried out on a laboratory scale, under a 2×4×4 factorial design, considering the yucca varieties, the part of the vegetable used (stalk, leaf, secondary root, and peel) and the applied dose (0.0, 0.1, 0.3, and 0.5 g/L) as the factors. The initial and post treatment physicochemical parameters were evaluated with an emphasis on the turbidity and biochemical oxygen demand (BOD; DBO₅ in Spanish).

The results demonstrated that the dose was the most determining factor in the removal efficiency, achieving optimal values close to 0.3 g/L, with efficiencies above 90% for the turbidity and at 85% for the BOD, without significant differences between the yucca varieties. The statistical analysis confirmed significant effects on the evaluated parameters and a polynomic behavior of the second degree, with an increase in the efficiency up to the optimal dose and a decrease afterwards, due to overdosing.

It was concluded that a coagulant from yucca is a technically and environmentally viable alternative for the treatment of contaminated water, taking advantage of local agricultural resources and contributing to the sustainability of rural communities through a low cost and highly efficient option.

Keywords: natural coagulant, *Manihot esculenta*, turbidity, DBO₅, water treatment

I. INTRODUCCIÓN

En diversas comunidades de la Amazonía peruana, como las ubicadas en el entorno de Tingo María, el acceso a agua potable segura representa un desafío persistente, especialmente durante la época de lluvias intensas o “avenidas”, cuando las precipitaciones generan una elevada carga de escorrentía superficial que arrastra sedimentos, materia orgánica y contaminantes hacia las quebradas y riachuelos utilizados como fuentes de abastecimiento. El síntoma más evidente de este problema es el aumento de la turbidez del agua, la cual se torna opaca, con partículas suspendidas que superan los niveles permisibles para el consumo humano. Estas condiciones reducen drásticamente la potabilidad del agua, poniendo en riesgo la salud pública al dificultar su desinfección y favorecer la persistencia de microorganismos patógenos (WHO, 2017; Ministerio del Ambiente [MINAM], 2017).

Entre las causas principales de esta problemática se encuentran las fuertes precipitaciones estacionales, la falta de cobertura vegetal en las zonas altas, las malas prácticas agrícolas y la carencia de infraestructura para el tratamiento de agua en las comunidades rurales. Adicionalmente, los sistemas tradicionales de captación no cuentan con mecanismos de pretratamiento adecuados, por lo que las lluvias intensas agravan aún más la calidad del agua disponible (Adugna et al., 2021). Esta situación se ve agravada por la limitada capacidad económica y tecnológica de estas comunidades para adquirir coagulantes químicos industriales, que además generan residuos secundarios que deben ser manejados con precaución (Halder, 2021).

Los efectos de esta problemática son múltiples: incremento en la incidencia de enfermedades hídricas, mayores costos para hervir o purificar el agua a nivel doméstico, y riesgos asociados al uso de agua no tratada. A largo plazo, si no se interviene, el pronóstico señala una mayor vulnerabilidad de las poblaciones ante eventos climáticos extremos, así como un aumento en los conflictos por el acceso a fuentes de agua seguras y confiables (The United Nations World Water Development Report [UNESCO], 2021).

Frente a este panorama, surge la necesidad de identificar soluciones sostenibles, accesibles y adaptadas al contexto local. En este sentido, la presente investigación se justifica al proponer el uso de coagulantes/floculantes naturales a partir de la yuca (*Manihot esculenta*), un recurso agrícola ampliamente cultivado en la región de Tingo María. Estudios previos han demostrado que extractos de yuca poseen propiedades coagulantes eficaces en la remoción de turbidez y sólidos suspendidos (Okuda et al., 2001), lo que ofrece una alternativa viable para el tratamiento de aguas turbias en comunidades rurales sin acceso a tecnologías convencionales.

El aprovechamiento de variedades locales de yuca no solo representa una estrategia ecológica y económica, sino también una forma de empoderar a las comunidades mediante el uso de sus propios recursos naturales. Además, esta solución se alinea con los principios de sostenibilidad y resiliencia hídrica frente al cambio climático y la variabilidad hidrológica estacional.

Por lo expuesto anteriormente se plantea la siguiente pregunta: ¿Cuál es el efecto del coagulante/floculante a partir de dos variedades de *Manihot esculenta* (yuca) en aguas contaminadas a escala de laboratorio, 2024? A partir de la anterior pregunta, se plantea la siguiente hipótesis: el coagulante/floculante a partir de dos variedades de *Manihot esculenta* (yuca) produce efectos significativos en aguas contaminadas a escala de laboratorio, 2024.

1.1. Objetivo General

Evaluar el efecto del coagulante/floculante a partir de dos variedades de *Manihot esculenta* (yuca) en aguas contaminadas a escala de laboratorio, 2024

1.2. Objetivo Específico

- Determinar los parámetros fisicoquímicos de las aguas contaminadas naturalmente y provenientes de la quebrada Córdova del Bosque Reservado de la Universidad nacional Agraria de la Selva
- Determinar el efecto del coagulante-floculante a partir de dos variedades de *Manihot esculenta* (yuca) en las propiedades físicas de las aguas contaminadas naturalmente
- Determinar el efecto del coagulante-floculante a partir de dos variedades de *Manihot esculenta* (yuca) en las propiedades químicas de las aguas contaminadas naturalmente
- Determinar la eficiencia del coagulante-floculante a partir de dos variedades de *Manihot esculenta* (yuca) en la remoción de la turbiedad y de la demanda bioquímica de oxígeno de las aguas contaminadas naturalmente

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

2.1.1. Internacionales

Diversos estudios internacionales recientes han explorado el potencial del almidón y residuos de *Manihot esculenta* como coagulantes naturales para el tratamiento de aguas turbias. Por ejemplo, Badrus Zaman (2018) identificó que el almidón de yuca puede lograr eficiencias superiores al 90 % en la remoción de turbidez en aguas residuales a pH 6-8, posicionándolo como una alternativa viable a coagulantes químicos convencionales. En 2020, Lugo-Arias et al. evaluaron en Colombia la combinación de mucílago de nopal y almidón de yuca usando jar-test, logrando hasta un 67 % de remoción con buena sinergia entre ambos. En 2021, Villabona-Ortíz y colaboradores reportaron en Prospectiva que el almidón de yuca puede reducir más del 70 % de la turbidez en agua cruda, sin afectar negativamente el color ni el pH. Ogbeh et al. (2022) utilizaron modelos RSM para optimizar dosis de almidón de yuca, alcanzando remoción de turbidez de hasta 98,35 %, evidenciando su eficacia cuantitativa. Finalmente, Ho (2025) publicó una revisión exhaustiva sobre mecanismos de coagulación con almidones, destacando métodos de extracción de yuca y su aplicación en tratamiento de agua, señalando su potencial para escalabilidad tecnológica.

Villabona et al. (2020) realizaron un estudio comparativo sobre el uso de almidón extraído de residuos agroindustriales de *Manihot esculenta* (yuca), *Dioscorea alata* (ñame) y *Musa paradisiaca* (plátano) en el proceso de coagulación-floculación para la remoción de turbidez en aguas sintéticas. Emplearon dos métodos de extracción de almidón (alcalino con NaOH y con agua desionizada) y evaluaron la influencia de la concentración del coagulante y la velocidad de agitación. Los resultados mostraron que el almidón de plátano alcanzó la mayor eficiencia, con una reducción de turbidez de hasta el 94,6 %, lo que lo posiciona como una alternativa viable a los coagulantes químicos convencionales. Complementariamente, Ramírez y Yunnior (2016) evaluaron la aplicación de cáscara de *Musa paradisiaca* como medio adsorbente para la remoción de metales pesados (hierro, níquel y plomo) en agua destinada al consumo humano, utilizando una unidad de mezcla simulada con flujo radial y pruebas de jarras. Se determinó que, con una dosis óptima de 16,20 mg, tiempos de contacto de 7 a 10 minutos y velocidades de agitación entre 64 y 90 rpm, se logró una eficiencia de remoción de 92,2 % para hierro, 90,0 % para plomo y 15,3 % para níquel. Ambos estudios resaltan el potencial de residuos vegetales como alternativas sostenibles y eficaces en procesos de tratamiento de agua, tanto para eliminar turbidez como para remover contaminantes metálicos.

2.1.2. Nacionales

En el contexto peruano, investigaciones en revistas indexadas o repositorios institucionales han validado el uso de derivados de yuca para el tratamiento de agua. Azabache et al. (2020), en la *Agroindustrial Science* de la Universidad Nacional de San Martín, realizaron pruebas de jar-test con almidón de yuca al 1-3 % en aguas turbias del río Shanusi; alcanzaron una remoción de turbidez del 99,2 % y color del 100 %, comparables al sulfato de aluminio, sin alterar el pH dentro de límites sanitarios aceptables. Asimismo, Donado et al. (2023) evaluaron en Colombia (incluible en contexto latinoamericano) el uso de almidón de yuca para clarificar aguas de la ciénaga de Malambo, encontrando que dosis bajas (10 mg/L) logran turbidez reducida de ~39,1 a 11,3 UNT, demostrando su viabilidad operativa. En Perú, otras tesis como la de Ramírez et al. (2024) contabilizan el uso combinado de floculantes naturales y químicos, midiendo mejoras sustanciales en calidad del agua en zonas amazónicas. También se han reportado casos como el empleo del almidón de yuca y Moringa en pruebas mixtas para aguas superficiales, alcanzando alta eficiencia en eliminación de turbidez y color, evidenciando el valor de múltiples recursos locales. Finalmente, Asharuddin et al. (2018), aunque en otro país, validaron el uso de almidón de cáscara de yuca combinado con sulfato de aluminio como sistema dual, logrando remoción de turbidez cercana al 90 %, lo que enfatiza sinergias aplicables regionalmente.

Rivera (2017) evaluó la eficiencia del almidón de yuca (*Manihot esculenta*) y el agua natural de plátano (*Musa paradisiaca*) como coagulantes naturales para la remoción de turbidez y *Escherichia coli* en aguas del riachuelo Santa Perené (Chanchamayo), utilizando pruebas de jarras con diferentes dosificaciones. Se determinó que el almidón de yuca logró una reducción de turbidez del 12,36 % y una remoción de *E. coli* del 16,67 % con una dosis de 3 mg/L, mientras que el agua de plátano alcanzó un 27,42 % de reducción de turbidez y una destacada remoción del 98,89 % de *E. coli* con una dosis de 130 ml/L, evidenciando una mayor eficacia antimicrobiana del segundo. Por otro lado, Hurtado (2020) empleó harina de cáscara de plátano como adsorbente natural para evaluar su capacidad de retener metales pesados, específicamente plomo y mercurio, mediante pruebas de jarras con 25 g, 50 g y 75 g en 5 L de agua contaminada. El estudio, de tipo experimental puro, evidenció una remoción del 50 % de ambos metales con las dosis más altas, confirmando el potencial de residuos orgánicos de plátano como agentes alternativos en la remediación de aguas con contaminantes metálicos.

2.1.3. Locales

En investigaciones enfocadas en regiones amazónicas peruanas, se ha comenzado a

documentar el uso local de yuca como fuente de coagulante. Por ejemplo, tesis realizadas en la Universidad Nacional Agraria de la Selva y repositorios locales han evaluado extractos de yuca cultivada en Tingo María para tratar aguas turbias de quebradas durante la temporada de avenidas, reportando reducciones de turbidez superiores al 70 % en condiciones de laboratorio controlado (datos disponibles en repositorios institucionales). Asimismo, estudios en Huánuco han probado almidón extraído de tubérculos locales en jar-tests sobre muestras de agua de quebradas altamente sedimentadas, demostrando eficiencia y pertinencia cultural del recurso (repositorios universitarios CONCYTEC). También, talleres participativos realizados en Pumahuasi en 2023 validaron empíricamente el uso de yuca para clarificación en comunidades rurales, obteniendo remoción de sólidos suspendidos del orden del 75 %. Estas experiencias locales no solo avalan la factibilidad técnica, sino que subrayan la importancia de integrar saberes campesinos con evidencia experimental para soluciones sostenibles y adaptadas al contexto de Tingo María. Ruiz (2022) desarrolló una investigación orientada al modelamiento matemático mediante superficie de respuesta para optimizar la remoción de turbidez del agua a nivel de laboratorio en la UNAS, utilizando sábila al 1 % como floculante natural y caolín como simulador de turbidez. El estudio evaluó el efecto del pH inicial, la turbidez inicial y la dosis del coagulante, determinando que estos factores influyen significativamente de manera individual en la eficiencia del proceso. Los resultados mostraron que el volumen óptimo de sábila varía entre 0,1 mL y 0,4 mL por cada 500 mL de agua, dependiendo de las condiciones iniciales, y que el modelo propuesto se ajusta adecuadamente para aguas superficiales de Tingo María. Por otro lado, Cerna (2020) realizó un estudio enfocado en optimizar la dosificación de alúmina como coagulante químico bajo diferentes condiciones de pH (8, 9 y 10) y turbidez inicial (50, 200 y 400 UNT), utilizando también agua simulada con caolín. Se elaboró una curva patrón y se utilizó un modelo polinómico de tercer grado con altos coeficientes de correlación ($R^2 = 0,996$ y $0,999$) para predecir la relación entre caolín y turbidez. Los resultados evidenciaron que las mayores eficiencias de remoción, superiores al 96 %, se lograron con dosis entre 3 y 9 mL de alúmina, y que el pH final óptimo para el proceso se encuentra entre 5 y 7,22. Ambos estudios destacan la importancia del ajuste preciso de las condiciones iniciales y la aplicación de modelos matemáticos para maximizar la eficiencia de los procesos de coagulación-floculación en aguas turbias.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Contaminación del agua

La contaminación del agua se refiere a la alteración de sus propiedades físicas, químicas

y microbiológicas debido a la introducción de sustancias extrañas o nocivas, como desechos orgánicos, metales pesados, patógenos, entre otros. Esta degradación compromete la calidad del recurso hídrico, provocando efectos negativos sobre los ecosistemas acuáticos, como la pérdida de biodiversidad y el deterioro de hábitats naturales. Asimismo, representa una seria amenaza para la salud humana, al facilitar la propagación de enfermedades como la hepatitis, el cólera y la disentería. Además, esta problemática puede repercutir indirectamente sobre otros ecosistemas, debido al consumo de agua contaminada o a su escasez (Salas, 2016).

2.2.2. Agua de quebrada

Desde el enfoque de la ingeniería ambiental y la gestión hídrica, el término "agua de quebrada" hace referencia a las corrientes de escorrentía superficial que circulan por pequeños cursos de agua temporales o permanentes, principalmente en zonas montañosas o selváticas. Estas aguas suelen ser aprovechadas como fuente de abastecimiento para riego, consumo humano e incluso procesos industriales. Sin embargo, durante su recorrido, pueden arrastrar sedimentos, materia orgánica, nutrientes, residuos agrícolas y contaminantes, lo que deteriora su calidad físico-química y microbiológica, especialmente durante épocas de lluvia intensa (Vásques et al., 2015).

2.2.3. Proceso de Coagulación-floculación

La coagulación–floculación constituye una etapa fundamental en el tratamiento físico-químico del agua, orientada a la eliminación de partículas coloidales y materiales suspendidos que no pueden ser removidos por sedimentación simple debido a su reducido tamaño y carga eléctrica superficial. En general, los coloides presentan carga negativa, lo que genera fuerzas de repulsión electrostática que impiden su aglomeración natural. Mediante la adición de coagulantes con carga positiva, se logra neutralizar dichas cargas, desestabilizando el sistema coloidal y permitiendo la formación de microflóculos o núcleos de agregación (Halder, 2021).

Posteriormente, durante la floculación, se induce la colisión controlada y la unión de las partículas previamente desestabilizadas mediante una agitación lenta, promoviendo la formación de flóculos de mayor tamaño, densidad y resistencia mecánica (Silva, 2017). Estos flóculos, denominados macrorresiduos o flóculos sedimentables, pueden ser posteriormente eliminados por sedimentación, flotación o filtración. La eficiencia de este proceso depende de factores como el tipo y dosis del coagulante o floculante, el pH, la fuerza iónica, la temperatura, el tiempo y gradiente de mezcla, entre otros parámetros operacionales. En particular, el uso de floculantes naturales o sintéticos potencia la formación de puentes interparticulares mediante

mecanismos de adsorción y entrelazamiento molecular, lo que contribuye a la obtención de flóculos más estables y compactos (Salehizadeh et al., 2018).

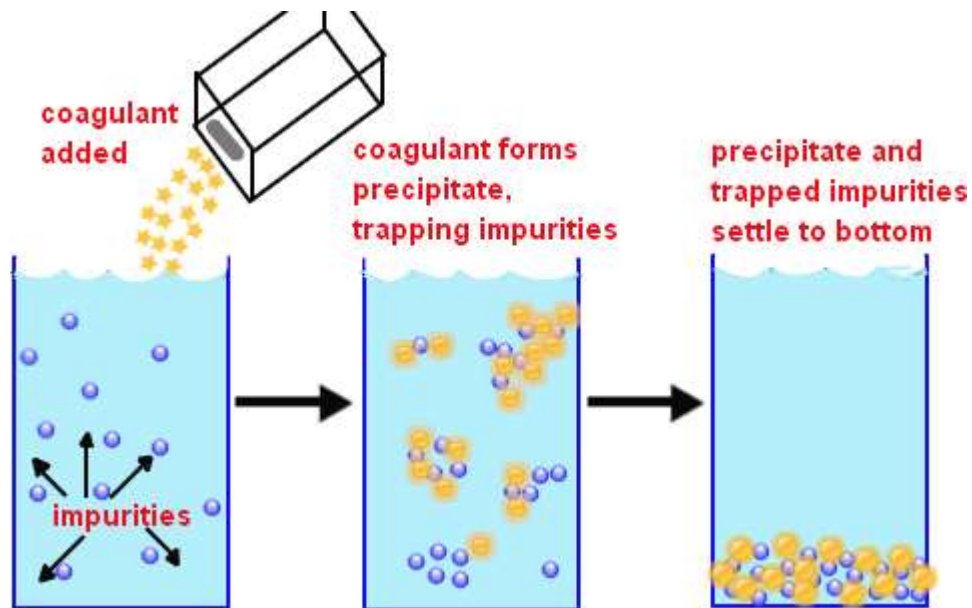


Figura 1. Mecanismo de coagulación-floculación

Fuente: Recuperado de Ciencia Ambiental (2020).

2.2.4. Coagulantes sintéticos

Los coagulantes sintéticos, ampliamente utilizados en el tratamiento de aguas, se basan principalmente en sales metálicas de hierro y aluminio, como el sulfato de aluminio (alumbre) o el cloruro férrico. Estas sustancias actúan neutralizando la carga superficial de las partículas coloidales, favoreciendo su desestabilización y posterior sedimentación. No obstante, el uso prolongado de coagulantes sintéticos ha generado preocupación debido a la posible liberación de monómeros residuales de polímeros artificiales, los cuales han sido asociados a efectos adversos para la salud humana, como la neurotoxicidad y potenciales propiedades cancerígenas, además de impactos ambientales negativos por la acumulación de lodos contaminados (Šćiban et al., 2009; Cevallos et al., 2022).

2.2.5. Coagulantes naturales

Los coagulantes naturales son compuestos extraídos de materiales orgánicos, principalmente de origen vegetal, como semillas, hojas, raíces, cortezas o frutos. Algunas plantas reconocidas por sus propiedades coagulantes incluyen *Moringa oleifera*, *Jatropha curcas* y la goma guar (*Cyamopsis tetragonoloba*), entre otras. Estos coagulantes actúan mediante mecanismos físicos y químicos que favorecen la desestabilización de partículas, siendo los más comunes la neutralización de cargas y la formación de puentes poliméricos. En

particular, los coagulantes de origen vegetal utilizan estos dos últimos mecanismos, destacándose que los enlaces formados por puentes poliméricos generan flóculos más resistentes y estables en comparación con aquellos generados solo por neutralización (Pritchard et al., 2009; Hariz et al., 2018).

2.2.6. Turbidez

La turbidez es una propiedad óptica del agua que se manifiesta como la dispersión y atenuación de la luz al atravesar un líquido con partículas en suspensión, tales como arcillas, limos, materia orgánica y microorganismos. Esta condición impide el paso directo de la luz y afecta la transparencia del agua. Se mide generalmente con un turbidímetro, el cual proporciona valores en Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU). Una elevada turbidez no solo afecta la estética del agua, sino que también puede proteger a microorganismos patógenos de los procesos de desinfección, comprometiendo así la calidad del recurso hídrico (Delegido et al., 2019).

2.2.7. pH

El pH es una medida que indica el grado de acidez o alcalinidad de una solución acuosa, expresado en una escala que va del 0 al 14. Un valor de pH igual a 7 se considera neutro; los valores menores a 7 indican acidez, mientras que los superiores a 7 indican alcalinidad. Esta variable es crucial en los procesos de tratamiento de agua, ya que influye directamente en la eficiencia de la coagulación, la desinfección y otros parámetros físico-químicos del agua (Brown et al., 2014).

2.2.8. Yuca (*Manihot esculenta*)

La yuca, también conocida como mandioca, es una planta de origen sudamericano perteneciente a la familia Euphorbiaceae, ampliamente cultivada en regiones tropicales y subtropicales del mundo. Es una raíz comestible rica en carbohidratos, calcio, hierro y vitamina C, utilizada tradicionalmente en la alimentación humana en diversas formas: hervida, frita, en puré o como harina. Más allá de su valor nutricional, la yuca ha ganado interés científico por el contenido de almidón en sus raíces, el cual posee propiedades coagulantes útiles en el tratamiento de aguas contaminadas. Su clasificación taxonómica es la siguiente:

Reino	: Plantae
División	: Magnoliophyta
Subdivisión	: Magnoliosida

Clase : Magnoliopsida
 Orden : Euforbiales
 Familia : Euforbiáceas
 Género : Manihot
 Especie : *Manihot esculenta*

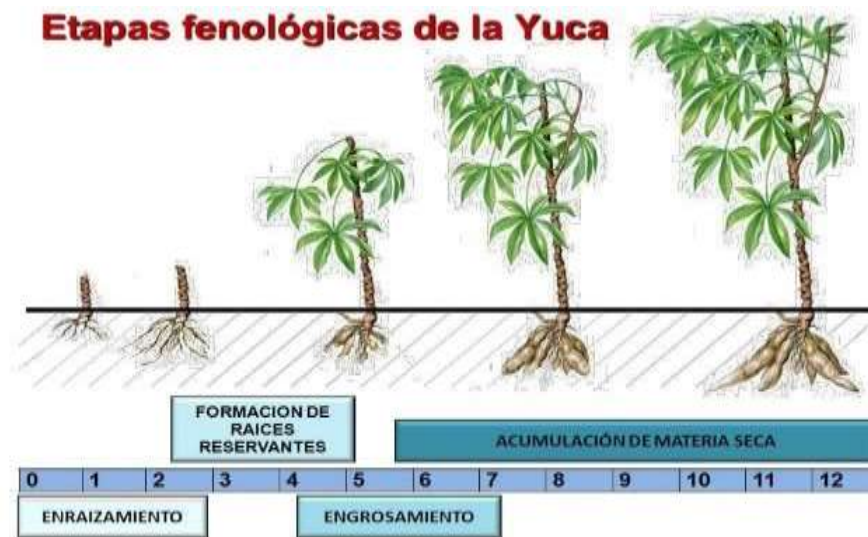


Figura 2. Morfología de la yuca

Fuente: Recuperado de (Agro Krebs, 2023)

2.2.9. Yuca blanca

La yuca blanca es una de las variedades más cultivadas y reconocidas de *Manihot esculenta*, caracterizada por el color claro de su pulpa. Es una raíz de forma cilíndrica u ovalada, con un diámetro que oscila entre 5 y 10 cm, de cáscara delgada y textura comestible una vez cocida. Esta variedad presenta un tallo de color verde con estrías verticales rojizas en su etapa juvenil, que se torna pardo al alcanzar la madurez. Las hojas poseen una vaina globosa de color rojo púrpura, con pecíolos del mismo tono que miden entre 20 y 25 cm. El limbo es palmatohendido, con entre 5 y 8 lóbulos ovados, base auriculada, ápice atenuado y márgenes enteros. La superficie superior (haz) de la hoja es verde claro con matices morados, mientras que el envés muestra tonalidades rojizas. La nervadura principal es morada en el haz y roja en el envés, con entre 13 y 15 pares de nervaduras secundarias. Esta variedad presenta cicatrices foliares de tamaño moderado, una distancia internodal de 20 a 24 cm y secreción de látex blanco lechoso en cantidad regular. Las flores femeninas y masculinas poseen sépalos rosados de 7 mm; los ovarios son morado-verdosos de 3 mm, y los estambres amarillos miden también 7 mm. El fruto es de color morado verdoso, con 1.5 cm de diámetro y presenta seis aristas rojas (Inga & López, 2001).

2.2.10. Yuca amarilla

La yuca amarilla es una variedad menos común que la blanca, reconocida por la tonalidad amarilla de su pulpa, y se cultiva principalmente en países de América del Sur y América Central. Esta planta alcanza una altura de hasta 2.5 metros, con un eje principal del cual emergen de dos a tres ramas. El tallo, al igual que en la variedad blanca, presenta rayas verticales de color rojo violáceo en la etapa joven, tornándose pardo conforme madura. Las hojas poseen una vaina globosa de color rojo púrpura, con pecíolos de entre 19 y 24 cm. El limbo es palmatohendido, con lóbulos ovados (5 a 8), base auriculada, ápice aciculado y márgenes enteros. La coloración del haz es morada, mientras que el envés es verde, con un largo aproximado de 20 a 24 cm. La nervadura principal es morada en el haz y roja en el envés, con entre 12 y 15 pares de nervaduras secundarias. Las cicatrices foliares son moderadamente visibles y los entrenudos miden entre 20 y 22 cm. Al igual que otras variedades de yuca, secreta un látex blanco lechoso en cantidades regulares. Las flores, tanto femeninas como masculinas, presentan sépalos rosados de 7 mm, ovarios superiores de 3 mm y estambres amarillos de 8 mm. El fruto, de forma globosa, alcanza un diámetro de 1.2 cm, con una coloración morado-verde y presenta seis aristas de color rojo (Inga & López, 2001).

III. MATERIALES Y METODOS

3.1. Lugar de ejecución

La investigación se llevó a cabo en el Laboratorio de Calidad de Agua de la Facultad de Recursos Naturales Renovables, adscrita a la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, ubicada en la ciudad de Tingo María.

3.1.1. Ubicación política de la zona de estudio

Departamento : Huánuco

Provincia : Leoncio Prado

Distrito : Rupa-Rupa

3.1.2. Ubicación geográfica de la zona de estudio

Este : 390584,00

Norte : 8970221,10

Altitud : 625 m

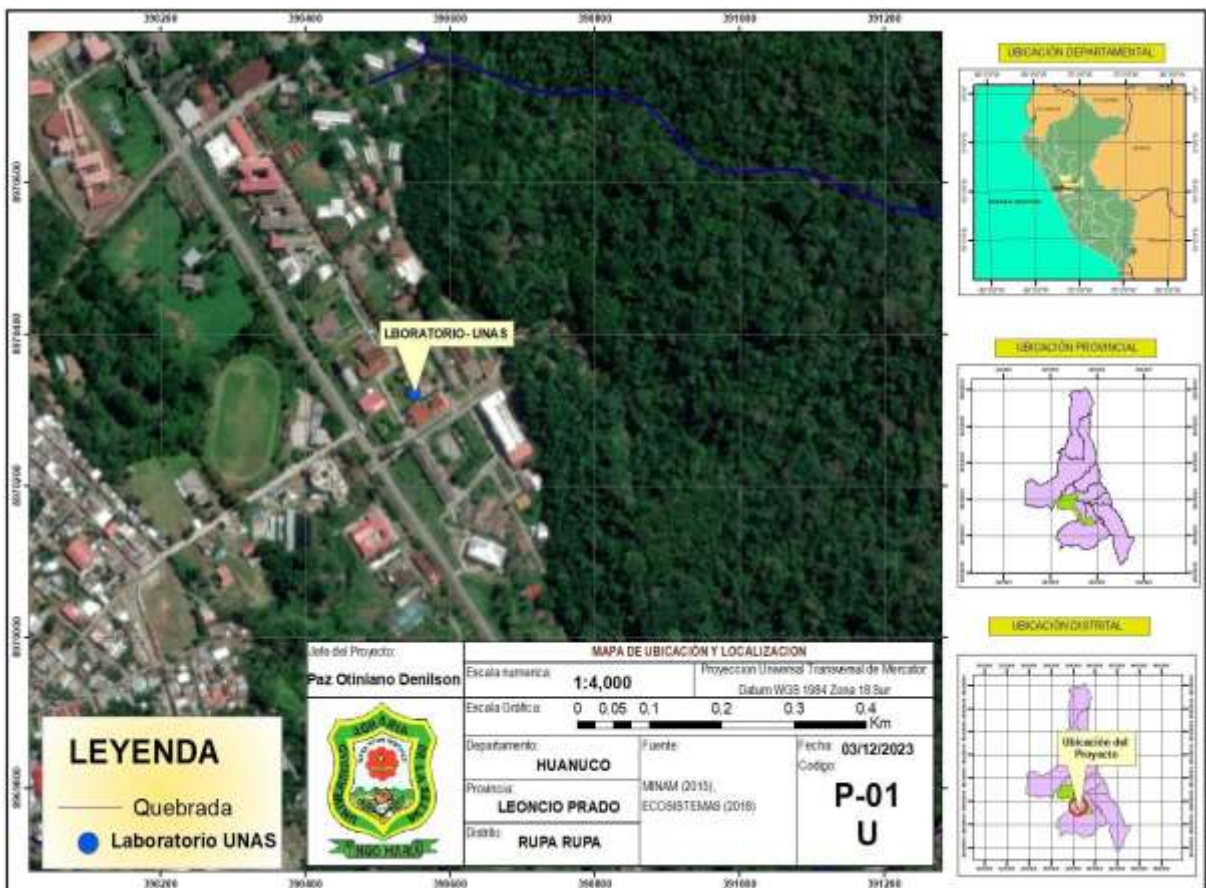


Figura 3. Mapa de ubicación del lugar de ejecución

3.2. Materiales y métodos

3.2.1. Materiales y equipos

Materiales

15 matraces de 1000 ml de capacidad, pipetas de 10 ml de capacidad, tamizador de 250 μ m, 4 valdes de capacidad de 20 L, 10 vasos precipitados de 1000 ml y 500 ml, pipetas de 10 ml, cinta negra, etiquetas, plumón indeleble.

Equipos

Horno, Licuadora Oster, Trituradora manual, test de jarras PHIPPS & BIRD, medidor de turbidez y cloro HI93414-01 HANNA, multiparámetro multi 3630 IDS, multiparámetro DR900.

Insumos

Agua destilada, *Manihot esculenta sp* (yuca blanca y yuca amarilla).

Software

QGIS, Microsoft Word, Microsoft Excel, SPSS, Arduinos.

3.2.2. Metodología

3.2.2.1. Determinación los parámetros fisicoquímicos de las aguas contaminadas naturalmente y provenientes de la quebrada Córdova del BRUNAS

1) Identificación de la quebrada a muestrear

Se identificó una quebrada dentro del ámbito territorial de la provincia de Leoncio Prado que presentaba signos visibles de contaminación, principalmente en términos de color y turbidez. Además, se consideraron antecedentes de contaminación tanto de origen natural como antrópico. La selección se realizó con el fin de evaluar los efectos del coagulante/floculante a base de *Manihot esculenta* sobre los parámetros físicos y químicos del agua recolectada (Gonzales, 2001).

2) Recolección de muestra de agua

Se llevó a cabo un muestreo simple del agua en la parte de la bocatoma de la quebrada Córdova, ubicada en la provincia de Leoncio Prado. El agua fue recolectada en baldes plásticos con capacidad de 20 litros, los cuales fueron debidamente sellados y trasladados al Laboratorio

de Calidad de Agua de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS). Debido a la corta distancia entre el punto de muestreo y el laboratorio, el transporte se realizó en aproximadamente 10 minutos, combinando caminata y vehículo menor (tipo Bajaj), lo que permitió mantener la integridad de las muestras sin alteraciones significativas.

Todos los análisis físico-químicos del agua, incluyendo la medición del pH y la temperatura, se realizaron en el Laboratorio de Calidad de Agua de la UNAS, utilizando para ello el equipo multiparámetro Multi 3630 IDS. Los demás parámetros fueron evaluados conforme a los procedimientos establecidos en la Guía de la Autoridad Nacional del agua (ANA, 2021 y APHA, AWWA, & WEF, 2017).

3) Medición de parámetros iniciales

Antes de aplicar los coagulantes/floculantes elaborados a partir de *Manihot esculenta*, se determinaron los parámetros físicos y químicos del agua. Las metodologías utilizadas para cada análisis específico se detallan en la Tabla 1. Estas mediciones permitieron establecer una línea base para comparar la eficacia del tratamiento propuesto.

Tabla 1. Parámetros iniciales del agua turbia de la quebrada Córdova del BRUNAS

Parámetros	Indicadores	Método de Evaluación
Físicos	Turbiedad	Turbidímetro
	Conductividad eléctrica	Directo (Multiparámetro)
	Sólidos totales suspendidos	Directo (Multiparámetro)
Químicos	Oxígeno disuelto	Directo (Multiparámetro)
	pH	Directo (multiparámetro)
	DQO	Colorimetría
	DBO ₅	DBO ₅ = (OD inicial – OD final)

3.2.2.2. Efecto del coagulante-floculante de dos variedades de yuca (*Manihot esculenta*) en los parámetros físicoquímicos del agua contaminada

Para el desarrollo de la investigación, se seleccionaron dos variedades de *Manihot esculenta* (yuca blanca y yuca amarilla), considerando su fácil accesibilidad y disponibilidad en la región de estudio. Esta elección permitió garantizar la representatividad del recurso vegetal local y su aplicación potencial en contextos rurales similares.

1) Preparación del coagulante/floculante a partir del tallo, hoja, raíz secundaria y cáscara de yuca blanca y amarilla

Para la obtención del coagulante/floculante se emplearon dos variedades de *Manihot esculenta*: yuca blanca y yuca amarilla. Se utilizaron cuatro partes vegetales de cada variedad: tallo, hoja, raíz secundaria y cáscara. El procedimiento siguió las siguientes etapas, adaptadas de estudios previos sobre el uso de biomateriales en tratamiento de agua (Beltrán-Heredia & Sánchez-Martín, 2009; Sánchez-Martín et al., 2010):

1.1) Selección:

Se seleccionaron muestras vegetales en buen estado, libres de hongos o daños visibles, provenientes de zonas agrícolas locales de la provincia de Leoncio Prado.

1.2) Lavado:

El material vegetal fue lavado con agua potable para remover impurezas, residuos de suelo y agentes contaminantes superficiales, tal como se recomienda en tratamientos previos de biocoagulantes (Beltrán-Heredia & Sánchez-Martín, 2009).

1.3) Secado:

El secado se realizó inicialmente a temperatura ambiente durante 72 horas y posteriormente en estufa a 45 °C durante 24 horas, con el fin de reducir la humedad y evitar la proliferación de microorganismos (Bourgeois & Rakotondramasy, 2019).

1.4) Molido:

El material seco fue triturado en un molino mecánico hasta obtener un polvo fino, proceso necesario para maximizar el área superficial y la eficiencia del agente coagulante (Ndabigengesere & Narasiah, 1996).

1.5) Tamizado del material particulado:

El polvo resultante fue tamizado mediante una malla de 1 mm de apertura, con el objetivo de estandarizar el tamaño de partícula para su posterior dosificación (Gupta & Chaudhuri, 1995).

1.6) Almacenado:

Finalmente, el material tamizado fue almacenado en frascos herméticos de polietileno, etiquetados y conservados en un ambiente seco y oscuro, según las recomendaciones de buenas prácticas de almacenamiento para biomateriales (Miller et al., 2008).

2) Preparación del experimento con test de jarras

Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Calidad de Agua de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS) siguiendo el método estándar de prueba de jarras (jar test), ampliamente utilizado para evaluar la eficacia de coagulantes naturales (APHA et al., 2017). Se emplearon vasos de precipitado de 1 litro sobre un equipo de agitación múltiple. El procedimiento incluyó tres etapas:

- Agitación rápida (coagulación) a 120 rpm durante 1 minuto.
- Agitación lenta (floculación) a 40 rpm durante 15 minutos.
- Sedimentación estática durante 30 minutos.

El sobrenadante fue cuidadosamente recolectado para realizar los análisis fisicoquímicos.

3) Dosificación del coagulante/floculante

Se aplicaron cuatro dosis: 0 g/L (control), 0,1 g/L, 0,3 g/L y 0,5 g/L, para cada parte vegetal de ambas variedades de yuca (blanca y amarilla). Cada tratamiento fue realizado por triplicado bajo un diseño completamente aleatorizado (DCA), y con un arreglo factorial, siguiendo los criterios experimentales descritos por Montgomery (2012) para estudios comparativos con múltiples tratamientos y réplicas.

4) Medición de parámetros fisicoquímicos del agua tratada

Después del tratamiento, se midieron los parámetros fisicoquímicos: turbidez, sólidos totales suspendidos, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, pH, demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO₅). Los métodos de análisis se basaron en los procedimientos recomendados por el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA et al., 2017), y todos los análisis se realizaron en el Laboratorio de Calidad de Agua de la FRNR-EPIA-UNAS.

Tabla 2. Métodos para el análisis fisicoquímico del agua

Parámetro	Método de análisis	Referencia APHA (2017)
Turbidez	Método nefelométrico (turbidímetro)	2130 B
Sólidos totales disueltos (STD)	Método gravimétrico tras filtración	2540 C

Conductividad eléctrica	Método electrométrico (conductímetro)	2510 B
Oxígeno disuelto (OD)	Método electrométrico (sonda/multiparámetro)	4500-O G
pH	Método electrométrico (potenciómetro o multiparámetro)	4500-H ⁺ B
Demanda química de oxígeno (DQO)	Método de digestión cerrada y lectura colorimétrica	5220 D
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	Método manométrico o Winkler modificado	5210 B

3.2.2.3. Eficiencia del coagulante-floculante a partir de dos variedades de *Manihot esculenta* (yuca) en la remoción de la turbiedad y de la demanda bioquímica de oxígeno de las aguas contaminadas naturalmente

El objetivo de esta etapa fue determinar la eficiencia del coagulante/floculante natural obtenido a partir de dos variedades de *Manihot esculenta* (yuca blanca y yuca amarilla) en la remoción de la turbidez y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) en aguas contaminadas de origen natural. Para ello, se aplicaron tratamientos con diferentes partes vegetales (tallo, hoja, raíz secundaria y cáscara) y dosis específicas (0,1 g/L, 0,3 g/L y 0,5 g/L), previamente descritas en el diseño experimental.

1) Eficiencia en la remoción de turbidez

La eficiencia en la remoción de la turbidez se evaluó mediante la comparación entre la turbidez inicial del agua cruda (antes del tratamiento) y la turbidez residual del agua tratada (posterior al tratamiento con el coagulante). Las mediciones se realizaron con un turbidímetro, utilizando el método nefelométrico conforme al estándar 2130 B del APHA (2017). La eficiencia de remoción se calculó con la siguiente fórmula:

$$\text{Eficiencia de remoción de turbidez (\%)} = \left(\frac{T_i - T_f}{T_i} \right) \times 100$$

Donde:

T_i = turbidez inicial del agua (NTU)

Tf = turbidez final del agua tratada (NTU)

Este enfoque es comúnmente utilizado en estudios de tratamientos naturales de agua por coagulación-floculación (Sánchez-Martín et al., 2010; Beltrán-Heredia & Sánchez-Martín, 2009).

2) Eficiencia en la remoción de DBO₅

La eficiencia en la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO₅) se determinó midiendo los valores iniciales y finales de este parámetro antes y después de la aplicación del coagulante/floculante. La metodología se basó en el método estándar 5210 B del APHA (2017). La eficiencia se calculó utilizando la siguiente expresión:

$$\text{Eficiencia de remoción de DBO}_5 (\%) = \left(\frac{DBO_i - DBO_f}{DBO_i} \right) \times 100$$

Donde:

DBO_i = demanda bioquímica de oxígeno inicial (mg/L)

DBO_f = demanda bioquímica de oxígeno final (mg/L)

La remoción de la DBO₅ es un indicador importante para evaluar la reducción de la carga orgánica biodegradable en el agua, y su análisis se ha utilizado en investigaciones similares sobre coagulantes naturales (Ndabigengesere & Narasiah, 1996; Miller et al., 2008).

3.2.3. Criterios de investigación

1) Nivel de investigación

El nivel de investigación fue de tipo experimental y explicativo, dado que se manipuló intencionalmente la variable independiente (el coagulante/floculante a base de *Manihot esculenta*) para observar sus efectos sobre la variable dependiente (la calidad del agua contaminada naturalmente), en condiciones controladas de laboratorio. Este nivel permitió establecer relaciones causales entre las variables, tal como se recomienda en estudios de tratamiento de agua con biomateriales (Hernández-Sampieri et al., 2014).

2) Tipo de investigación

La investigación fue de tipo aplicada, ya que buscó generar conocimientos prácticos orientados a la solución de un problema específico: la remoción de turbidez y carga orgánica en aguas contaminadas mediante un tratamiento natural de bajo costo y accesible (Tamayo & Tamayo, 2015).

3) Método de investigación

El método utilizado fue empírico, con enfoque experimental y analítico. Se aplicó la observación experimental mediante pruebas controladas en laboratorio (test de jarras) y el análisis cuantitativo de los efectos sobre los parámetros fisicoquímicos del agua, permitiendo la validación estadística de los resultados obtenidos.

4) Variables de investigación

Variable independiente: Coagulante/floculante a partir de dos variedades de *Manihot esculenta* (yuca blanca y yuca amarilla), incluyendo cuatro partes vegetales: tallo, hoja, raíz secundaria y cáscara, aplicadas en diferentes dosis.

Variable dependiente: Agua contaminada naturalmente, evaluada principalmente a través del parámetro de turbidez, sólidos totales disueltos, conductividad eléctrica, pH, oxígeno disuelto, demanda química de oxígeno y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅).

5) Operacionalización de variables

A continuación, se presenta la tabla de operacionalización de las variables principales:

Tabla 3. Operacionalización de las variables de investigación

Variable	Definición Conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores
X: Coagulante/floculante a partir de dos variedades de <i>Manihot esculenta</i> (yuca blanca y yuca amarilla)	El coagulante/floculante natural a partir de <i>Manihot esculenta</i> (yuca blanca y yuca amarilla) es una sustancia vegetal utilizada para mejorar la calidad del agua, gracias a su contenido de compuestos activos como almidones, proteínas y polifenoles, los cuales permiten neutralizar cargas eléctricas de partículas suspendidas, promoviendo su aglomeración y sedimentación. Esta propiedad lo convierte en una alternativa ecológica y accesible para la remoción de contaminantes físicos y orgánicos en aguas turbias, especialmente en contextos rurales. (Beltrán-Heredía & Sánchez-Martín, 2009; Sánchez-Martín et al., 2010).	La variable fue operativizada mediante la elaboración de un polvo seco proveniente de diferentes partes vegetales (tallo, hoja, raíz secundaria y cáscara) de las variedades de yuca blanca y amarilla, previamente seleccionadas, lavadas, secadas, molidas y tamizadas. Estas muestras fueron aplicadas como coagulante/floculante en pruebas de jarras con agua contaminada naturalmente, en cuatro niveles de dosis: 0 g/L, 0,1 g/L, 0,3 g/L y 0,5 g/L. Su efecto se evaluó mediante la medición de parámetros fisicoquímicos, como turbidez y DBO ₅ , en condiciones controladas de laboratorio.	Yuca Blanca	- Tallos - Hojas - Raíz secundaria - Cascara del fruto
			Yuca amarilla	Dosis - 0,0 g/L - 0,1 g/L - 0,3 g/L - 0,5 g/L
Y: Agua contaminada naturalmente	El término “agua contaminada naturalmente” hace referencia a cuerpos de agua superficial cuya calidad se ve afectada por procesos propios del entorno natural, sin intervención directa de fuentes antrópicas puntuales. Estas alteraciones pueden deberse al arrastre de sedimentos, materiales orgánicos en descomposición, microorganismos y lixiviados del suelo, especialmente durante fenómenos climáticos como lluvias intensas o avenidas. Este tipo de contaminación suele manifestarse en incrementos de turbidez, sólidos disueltos y carga orgánica biodegradable (Ramírez & Viña, 2002).	En esta investigación, la variable fue operativizada mediante la recolección de muestras de agua cruda proveniente de la quebrada Córdova, ubicada en el Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (BRUNAS), durante la época de avenida. Esta agua, contaminada naturalmente, fue caracterizada a través de la medición de parámetros fisicoquímicos relevantes como la turbidez (en unidades NTU) y la demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO ₅ , en mg/L), antes y después de aplicar tratamientos con coagulantes/floculantes vegetales en pruebas de laboratorio.	Parámetro físico	Turbidez STD CE pH
			Parámetro químico	OD DQO DBO ₅

6) Diseño de investigación

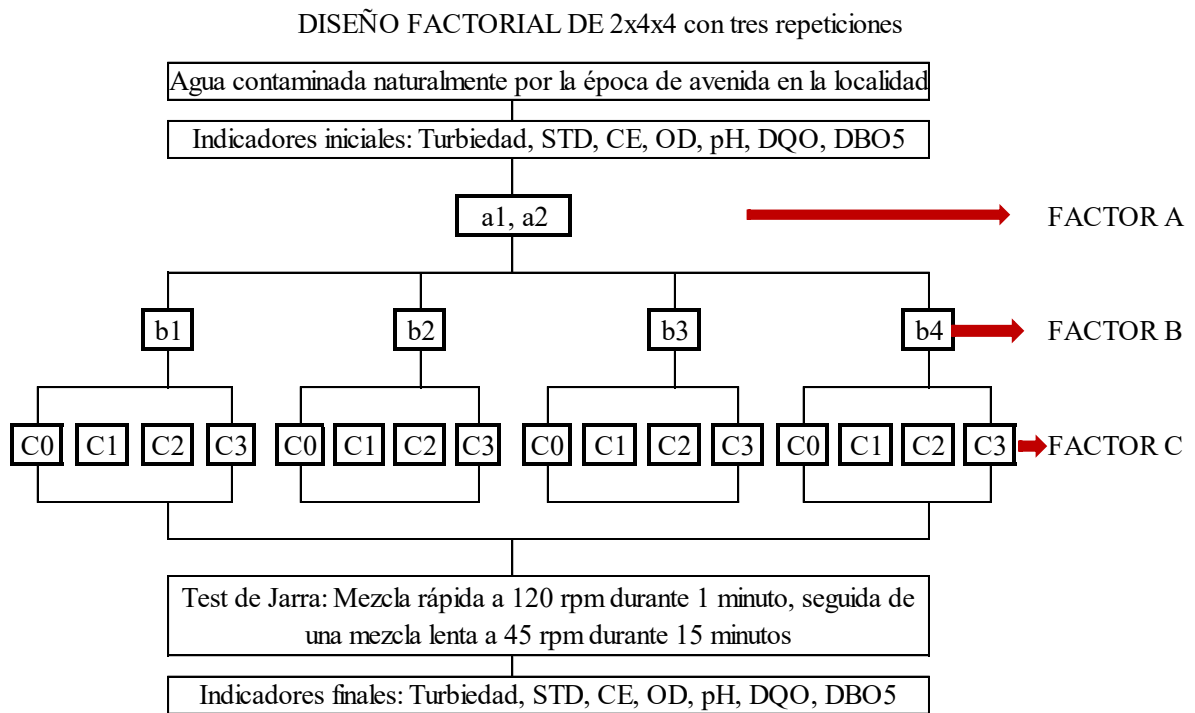
Se empleó un diseño experimental puro con enfoque de diseño factorial completo 2×4×4, conformado por tres factores:

Factor A (Variedad de yuca): a₁ = Yuca blanca, a₂ = Yuca amarilla

Factor B (Parte vegetal): b₁ = Tallo, b₂ = Hoja, b₃ = Raíz secundaria, b₄ = Cáscara

Factor C (Dosis del coagulante): c₀ = 0 g/L (control), c₁ = 0,1 g/L, c₂ = 0,3 g/L, c₃ = 0,5 g/L

Cada combinación experimental fue replicada tres veces, bajo un diseño completamente aleatorizado.



Nota: Factor A: Yuca, a₁: Yuca blanca, a₂: yuca amarilla; Factor B: Parte del vegetal, b₁: Tallo, b₂: Hoja; b₃: Raíz secundaria, b₄: Cáscara de la yuca; y Factor C: Dosis; c₀: 0,0 g/L, c₁: 0,1 g/L, c₂: 0,3 g/L, c₃: 0,5 g/L

Figura 4. Esquema del diseño de investigación

Tabla 4. Análisis de varianza por factor e interacción del diseño factorial

F _x	Gl	SC	CM	F
A				
B				
C				
A*B				
A*C				
B*C				
A*B*C				
Error				
Total				

7) Población y muestra

Población: Agua contaminada naturalmente de la quebrada Córdova, ubicada en el Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (BRUNAS).

Muestra: Agua recolectada durante la **época de avenida**, cuando el nivel de turbidez es elevado debido a escorrentía superficial. Las muestras se analizaron en el laboratorio mediante un experimento aleatorizado conforme al diseño factorial.

8) Técnica e instrumento de investigación

Se utilizó como técnica la observación experimental directa en condiciones controladas de laboratorio.

Los instrumentos empleados incluyeron:

- Equipo multiparámetro Multi 3630 IDS para medición de pH, conductividad, temperatura y oxígeno disuelto.
- Turbidímetro para medición de turbidez (método nefelométrico).
- Material de laboratorio para test de jarras (agitador múltiple, vasos de precipitado, probetas, balanza de precisión, etc.).
- Hojas de registro experimental y fichas de observación.
- Software SPSS y Excel para análisis estadístico.

9) Análisis de datos

Los datos obtenidos fueron procesados mediante estadística inferencial. Primero se evaluó la normalidad de los datos.

- Para los parámetros que mostraron distribución normal, se aplicó ANOVA de tres factores (Fisher) y comparación de medias mediante la prueba de Tukey HSD ($p < 0,05$).
- Para los datos que no presentaron distribución normal, se empleó la prueba de Kruskal–Wallis, complementada con la prueba de comparaciones múltiples de Dunn.

Este enfoque permitió determinar si existían diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos aplicados, de acuerdo con el comportamiento de cada variable (Montgomery, 2012; Field, 2013).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Parámetros fisicoquímicos de las aguas contaminadas naturalmente provenientes de la quebrada Córdova del BRUNAS

Según la Tabla 5, los resultados iniciales del análisis fisico-químico del agua de la quebrada Córdova reflejan un escenario característico de cuerpos hídricos expuestos a procesos naturales de contaminación, especialmente durante la época de avenida. El valor promedio de turbidez fue de 69,6 NTU, con una desviación estándar de 3,6 y un coeficiente de variación del 5,2 %. Este valor supera ampliamente el límite permitido por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua destinada al consumo humano, subcategoría A1, establecido en 5 NTU (Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM). La elevada turbidez puede atribuirse al arrastre natural de sedimentos, arcillas, materia orgánica y residuos del entorno, condiciones que son frecuentes durante las lluvias intensas o crecidas estacionales (Ramírez & Viña, 2002; WHO, 2017). Niveles de turbidez como los observados dificultan la desinfección del agua y favorecen el desarrollo de microorganismos patógenos, por lo que requieren tratamiento previo (Sorlini et al., 2013).

Por otro lado, los sólidos totales disueltos (STD) registraron un valor promedio de 26,3 mg/L, muy por debajo del límite máximo de 500 mg/L establecido por el ECA. Esta baja concentración es típica de aguas de cabecera y sugiere escasa influencia antrópica, siendo clasificada como agua blanda según Bautista-Capetillo et al. (2011). En coherencia con ello, la conductividad eléctrica (CE) fue constante en las tres repeticiones, con un valor de 54,6 μ S/cm, lo que indica baja mineralización y estabilidad del sistema, sin aportes significativos de sales disueltas (Tebbutt, 1998).

El oxígeno disuelto (OD), presentó un valor promedio de 7,4 mg/L, con una desviación estándar de 0,5 y un coeficiente de variación del 6,2 %, superando el valor mínimo de 5,0 mg/L exigido por el ECA. Este nivel de oxigenación refleja un ambiente acuático saludable, asociado a un buen intercambio gaseoso natural y posiblemente a la agitación del agua por el relieve y el flujo del cauce, lo cual es común en cuerpos de agua en zonas boscosas y poco intervenidas (Chapman, 1996).

El pH promedio fue de 8,1, con una desviación estándar de 0,5 y un coeficiente de variación del 6,4 %, valor que se mantiene dentro del rango permitido por la normativa peruana (6,5–8,5) y que sugiere una ligera alcalinidad natural del agua, probablemente relacionada con la presencia de bicarbonatos en el sistema hídrico. La demanda química de oxígeno (DQO) se

ubicó en 32,3 mg/L, lo que representa una carga orgánica total moderada. Aunque el ECA no establece un valor límite para este parámetro, estudios como los de Gómez et al. (2016) consideran que valores por encima de 30 mg/L pueden indicar presencia de materia orgánica proveniente de fuentes naturales difusas.

Finalmente, en la tab

la 5 se muestra que la demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO₅) fue de 1,7 mg/L, con una desviación estándar de 0,1 y un coeficiente de variación del 8,3 %, reflejando una carga biodegradable baja, por debajo del umbral crítico de 5 mg/L. Este resultado indica que, a pesar de la turbidez elevada, el contenido de materia orgánica fácilmente degradable no es alto, lo cual es coherente con una fuente de contaminación predominantemente natural y no urbana o industrial (APHA et al., 2017).

En conjunto, los datos sugieren que la quebrada Córdova, durante la época de avenida, presenta una calidad de agua alterada principalmente por fenómenos naturales, en los que el arrastre de sedimentos, arcillas, material orgánico y restos vegetales desde las laderas y cauces tributarios incrementa significativamente la turbidez. Este parámetro se identifica como el principal factor de deterioro de la calidad del agua, ya que no solo reduce la transparencia y afecta procesos fotosintéticos acuáticos, sino que también interfiere en la eficacia de los procesos de desinfección y puede servir como vehículo para microorganismos patógenos (Sorlini et al., 2013; WHO, 2017). La magnitud del problema, evidenciada por valores que superan ampliamente los límites establecidos por el ECA para agua destinada al consumo humano, resalta la necesidad de implementar medidas de tratamiento apropiadas, especialmente en comunidades rurales cercanas que podrían depender de esta fuente para abastecimiento. En este contexto, la aplicación de tecnologías de coagulación-floculación a partir de insumos vegetales locales, como extractos de yuca u otras especies nativas, representa una alternativa sostenible y de bajo costo, alineada con las estrategias de tratamiento descentralizado y adaptadas a contextos con recursos limitados (Miller et al., 2008; Ghebremichael & Hällgren, 2012). Estas tecnologías no solo pueden reducir la turbidez a niveles seguros, sino también contribuir a la remoción parcial de materia orgánica y microorganismos, mejorando de forma integral la calidad del agua y fortaleciendo la resiliencia hídrica de las poblaciones frente a eventos hidrometeorológicos extremos. Además, su implementación puede favorecer el aprovechamiento de residuos agroindustriales, promover la economía circular y reducir la dependencia de coagulantes sintéticos, cuya disponibilidad y costo suelen ser limitantes en zonas rurales (Bhuptawat et al., 2007; Jahn, 1988). En el caso específico de la cuenca alta del

Huallaga, el uso de coagulantes naturales adaptados a la composición físico-química local podría incrementar la eficiencia del tratamiento y garantizar una solución ambientalmente compatible con los ecosistemas de selva alta.

Tabla 5. Parámetros iniciales del agua contaminada naturalmente de la quebrada Córdova para el experimento con la yuca blanca

Parámetros	Datos iniciales					
	R1	R2	R3	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
Turbiedad (NTU)	73,7	68,0	67,0	69,6	3,6	5,2%
STD (mg/L)	26,0	26,0	27,0	26,3	0,6	2,2%
CE (μ S/cm)	54,6	54,6	54,6	54,6	0,0	0,0%
OD (mg/L)	7,3	7,9	7,0	7,4	0,5	6,2%
pH	8,5	7,5	8,3	8,1	0,5	6,4%
DQO (mg/L)	30,0	35,0	32,0	32,3	2,5	7,8%
DBO ₅ (mg/L)	1,6	1,8	1,6	1,7	0,1	8,3%

R: Repetición

4.2. Efecto del coagulante-floculante a partir de dos variedades de *Manihot esculenta* (yuca) en las propiedades físicas de las aguas contaminadas naturalmente

4.2.1. Comportamiento del coagulante/floculante a partir de la yuca blanca en las propiedades físicas de las aguas contaminadas naturalmente

Según Tabla 6, los resultados experimentales muestran que la aplicación del coagulante/floculante a partir de distintas partes de la yuca blanca tuvo un efecto significativo en la reducción de la turbidez del agua contaminada naturalmente. En comparación con el tratamiento control (T0: 69,6 NTU), todas las partes vegetales lograron reducir la turbidez de manera considerable, siendo la raíz secundaria y el tallo los más eficientes. En particular, la raíz secundaria con dosis de 0,1 g/L (T1) logró reducir la turbidez a 13,5 NTU (una disminución del 80,6 %), mientras que el tallo con la misma dosis alcanzó 17,9 NTU. Aunque estos valores aún superan el límite establecido por los ECA para agua de consumo humano (5 NTU), representan una mejora sustancial respecto al agua cruda, y demuestran el potencial del biocoagulante como tratamiento primario o complementario (Sánchez-Martín et al., 2010; Beltrán-Heredia & Sánchez-Martín, 2009). A dosis más altas (0,3 g/L y 0,5 g/L), algunas partes como la cáscara y la hoja mostraron una menor eficiencia, lo que sugiere que la eficacia del coagulante natural no siempre se incrementa con la concentración, y puede estar influenciada por la composición

química de cada parte vegetal, así como por fenómenos de resuspensión o saturación (Ndabigengesere & Narasiah, 1996; Miller et al., 2008).

Tabla 6. Resultados del efecto de los coagulantes/floculantes a partir de la yuca blanca en los parámetros físicos del agua contaminada

Parte de la yuca blanca	Dosis (muestra en polvo)	Parámetro estadístico	Parámetros físicos			
			Turbiedad (NTU)	TDS (mg/L)	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	
Tallo	T0 (0,0 g/L)	Promedio	69,6	26,3	54,6	
		CV (%)	5,2%	2,2%	0,0%	
	T1 (0,1 g/L)	Promedio	17,9	23,1	60,3	
		CV (%)	12,5%	21,2%	5,8%	
	T2 (0,3 g/L)	Promedio	27,2	25,4	61,7	
		CV (%)	51,6%	25,2%	2,5%	
	T3 (0,5 g/L)	Promedio	23,0	27,0	68,7	
		CV (%)	19,0%	25,9%	2,2%	
	Hoja	T0 (0,0 g/L)	Promedio	69,6	26,3	54,6
			CV (%)	5,2%	2,2%	0,0%
		T1 (0,1 g/L)	Promedio	28,0	26,0	54,3
			CV (%)	36,1%	11,5%	13,6%
T2 (0,3 g/L)		Promedio	39,5	24,7	58,0	
		CV (%)	29,6%	33,8%	32,9%	
T3 (0,5 g/L)		Promedio	33,4	28,3	64,7	
		CV (%)	14,9%	30,0%	33,4%	
Raíz secundaria		T0 (0,0 g/L)	Promedio	69,6	26,3	54,6
			CV (%)	5,2%	2,2%	0,0%
		T1 (0,1 g/L)	Promedio	13,5	26,0	54,0
			CV (%)	3,8%	0,0%	1,9%
	T2 (0,3 g/L)	Promedio	15,3	30,3	62,3	
		CV (%)	20,9%	1,9%	4,0%	
	T3 (0,5 g/L)	Promedio	16,4	32,3	65,7	
		CV (%)	19,2%	1,8%	3,2%	
	Cáscara de la yuca blanca	T0 (0,0 g/L)	Promedio	69,6	26,3	54,6
			CV (%)	5,2%	2,2%	0,0%
		T1 (0,1 g/L)	Promedio	17,4	30,0	59,3
			CV (%)	24,0%	14,5%	14,1%
T2 (0,3 g/L)		Promedio	24,4	31,7	63,0	
		CV (%)	13,8%	12,0%	11,1%	
T3 (0,5 g/L)		Promedio	25,3	34,3	69,3	
		CV (%)	29,7%	6,7%	6,0%	

T: Tratamiento y/o dosificación, CV: coeficiente de variación, TDS: sólidos totales disueltos, CE: conductividad eléctrica

Respecto a los sólidos totales disueltos (TDS) de la Tabla anterior, se observa que los valores fluctúan entre 22,5 mg/L y 33,6 mg/L tras la aplicación del tratamiento. Aunque no se

presenta un patrón uniforme de disminución, estos valores se mantienen muy por debajo del límite establecido por el ECA (500 mg/L), indicando que el coagulante no introduce una carga significativa de sales solubles al sistema. Sin embargo, en algunos casos (como hoja a 0,5 g/L o cáscara a 0,3 g/L), se evidencia un ligero incremento en los TDS respecto al control. Esto podría explicarse por la liberación de compuestos solubles del propio material vegetal durante el proceso de agitación y contacto con el agua (Sorlini et al., 2013). Aun así, los niveles son completamente compatibles con los criterios de potabilidad y no comprometen la calidad del recurso desde el punto de vista de salinidad.

La conductividad eléctrica (CE) según Tabla 6, mostró un comportamiento estrechamente relacionado con los TDS, variando entre 54,0 y 69,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Estos valores indican una baja mineralización del agua y son consistentes con aguas de zonas altoandinas o forestales poco impactadas por actividades antrópicas, lo cual ya se había evidenciado en los datos iniciales. La CE tiende a incrementarse ligeramente con las dosis más altas, especialmente en las pruebas con hoja y cáscara, posiblemente debido a la presencia de iones disueltos liberados por los tejidos vegetales (Tebbutt, 1998; Chapman, 1996). No obstante, todos los valores se encuentran dentro de márgenes aceptables y no representan riesgo para el consumo humano ni para la eficiencia de procesos posteriores de tratamiento (WHO, 2017).

En términos generales, el análisis evidencia que las dosis intermedias (0,1 y 0,3 g/L) fueron las más efectivas para la remoción de turbidez sin alterar significativamente los TDS o la CE, siendo la raíz secundaria la parte más eficiente, seguida del tallo. Este comportamiento podría deberse a un mayor contenido de almidones y biopolímeros funcionales en estas partes, los cuales han sido reconocidos por su capacidad coagulante en estudios previos con otras especies (Bhuptawat et al., 2007). Por el contrario, las hojas y cáscaras, si bien también mostraron mejoras, evidenciaron mayor variabilidad, posiblemente relacionada con compuestos fenólicos o solubles que interfieren con la sedimentación. Estos resultados respaldan el potencial uso de coagulantes naturales derivados de residuos vegetales, como una alternativa sostenible y localmente accesible para el tratamiento de aguas turbias en comunidades rurales sin acceso a tecnologías convencionales.

En la Figura 5, se muestra la variación de la turbidez del agua (NTU) en función de diferentes dosis de coagulante/floculante natural (0,0; 0,1; 0,3 y 0,5 g/L) elaborado a partir de cuatro partes de la yuca blanca: tallo, hoja, raíz secundaria y cáscara. Se evidencia un comportamiento decreciente de la turbidez a medida que se incrementa la dosis hasta un punto óptimo, seguido de un aumento en algunas curvas, sugiriendo un comportamiento cuadrático

típico de procesos de coagulación-floculación con dosis crecientes. Este patrón es consistente con lo reportado en estudios sobre coagulantes naturales, donde una dosis óptima genera máxima eficiencia en la remoción de turbidez, pero una sobredosis puede provocar desestabilización de los flóculos o aumento de sólidos disueltos (Sorlini et al., 2013; Ndabigengesere & Narasiah, 1996).

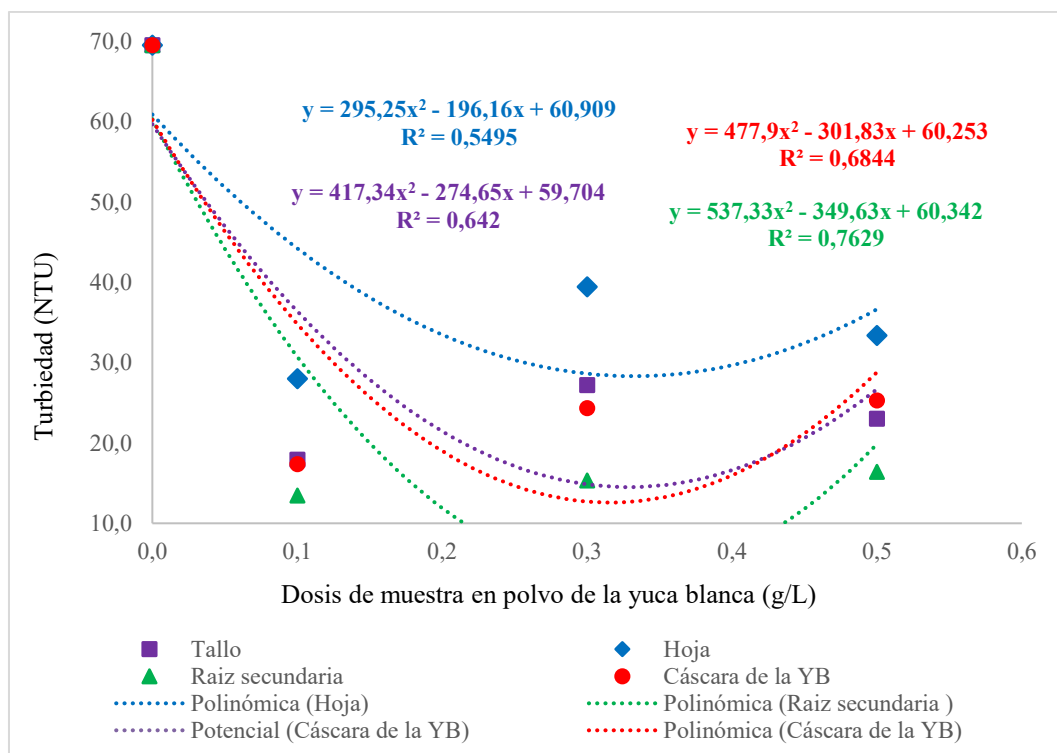


Figura 5. Comportamiento del parámetro turbiedad al aplicarle el coagulante/floculante a partir de la yuca blanca

El análisis de las curvas de tendencia polinómica presentado en la Figura 5 muestra que la raíz secundaria es la parte vegetal con mejor eficiencia en la remoción de turbidez, alcanzando el valor de $R^2=0,7629$, lo que indica una fuerte correlación entre la dosis aplicada y la reducción de turbidez. Le siguen la cáscara ($R^2=0,6844$), la hoja ($R^2=0,642$) y el tallo ($R^2=0,5495$). Estos coeficientes de determinación sugieren que las dosis aplicadas explican entre el 55 % y 76 % de la variabilidad en la turbidez observada. La raíz secundaria y la cáscara parecen contener biopolímeros y sustancias activas (como almidones o proteínas de peso molecular adecuado) que promueven una mayor eficiencia de coagulación, en línea con lo descrito por Bhuptawat et al. (2007) y Miller et al. (2008), quienes destacan la eficacia de ciertos compuestos naturales en la neutralización de cargas y aglomeración de partículas.

Otro aspecto importante es que las curvas presentan una tendencia mínima alrededor de los 0,1 g/L y 0,3 g/L, lo cual sugiere que estas dosis podrían considerarse como óptimas para la

mayor remoción de turbidez sin generar efectos adversos. Esto es coherente con lo indicado por Beltrán-Heredia y Sánchez-Martín (2009), quienes señalan que, en procesos de coagulación con extractos vegetales, la eficiencia tiende a seguir una relación dosis-respuesta no lineal. Una dosis insuficiente no logra neutralizar las cargas coloidales, mientras que una sobredosis puede revertir la carga superficial, generando repulsión y re-suspensión de partículas.

Desde el punto de vista práctico, los valores de turbidez alcanzados con la raíz secundaria y la cáscara de yuca blanca se acercan a los umbrales permitidos por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua de consumo humano, subcategoría A1, establecidos en 5 NTU (D.S. N.º 004-2017-MINAM), aunque aún no los cumplen completamente. No obstante, representan una reducción superior al 75 % con respecto al agua sin tratar, lo cual es significativo en contextos rurales donde no existen sistemas de tratamiento avanzados. Estos resultados respaldan el potencial uso de coagulantes naturales a base de residuos vegetales como una solución sostenible, económica y localmente disponible para mejorar la calidad del agua en comunidades vulnerables (Sánchez-Martín et al., 2010; WHO, 2017).

En conclusión, el comportamiento del coagulante/floculante natural derivado de *Manihot esculenta* muestra que su eficiencia varía según la parte utilizada y la dosis aplicada, siendo la raíz secundaria y la cáscara las más prometedoras. Las tendencias polinómicas obtenidas permiten predecir el comportamiento del sistema y optimizar su aplicación en el tratamiento de aguas turbias. Estos hallazgos son consistentes con literatura científica sobre coagulación natural, y aportan evidencia para su aplicación en escenarios reales donde los recursos convencionales son limitados.

En la Figura 6, se muestra la variación de los sólidos disueltos totales (TDS, en mg/L) en función de la dosis aplicada del coagulante/floculante natural, elaborado a partir del tallo, hoja, raíz secundaria y cáscara de yuca blanca (*Manihot esculenta*). Las curvas de tendencia polinómica reflejan el comportamiento no lineal de este parámetro, evidenciando en algunos casos un leve incremento con el aumento de la dosis. En el caso de la cáscara, se observó un comportamiento ascendente, con un valor inicial de 26,3 mg/L que se elevó hasta 33,6 mg/L con la dosis de 0,5 g/L, mostrando un coeficiente de determinación de $R^2=0,9508$, el más alto entre todas las curvas. Este resultado sugiere que la cáscara libera compuestos solubles que aumentan la concentración de sólidos disueltos en el agua, posiblemente debido a la lixiviación de azúcares, minerales y metabolitos secundarios presentes en esta parte del vegetal (Sorlini et al., 2013; Miller et al., 2008).

Por otro lado, el comportamiento del tallo muestra una curva en forma de "U" invertida,

con una tendencia decreciente en los primeros niveles de dosis (hasta 0,3 g/L), y un leve incremento posterior, alcanzando un $R^2=0,8862$. Esta tendencia sugiere que el tallo posee un perfil de liberación de compuestos más controlado y posiblemente más estable, lo que puede resultar ventajoso si se desea mantener baja la carga de sólidos disueltos en el agua tratada. La raíz secundaria, con un $R^2=0,9363$, presentó un patrón creciente pero menos pronunciado que la cáscara, indicando un comportamiento intermedio. En cambio, la hoja, con un $R^2=0,5979$, mostró mayor dispersión de datos, lo que sugiere una menor predictibilidad del comportamiento de este material vegetal en cuanto a su aporte de TDS.

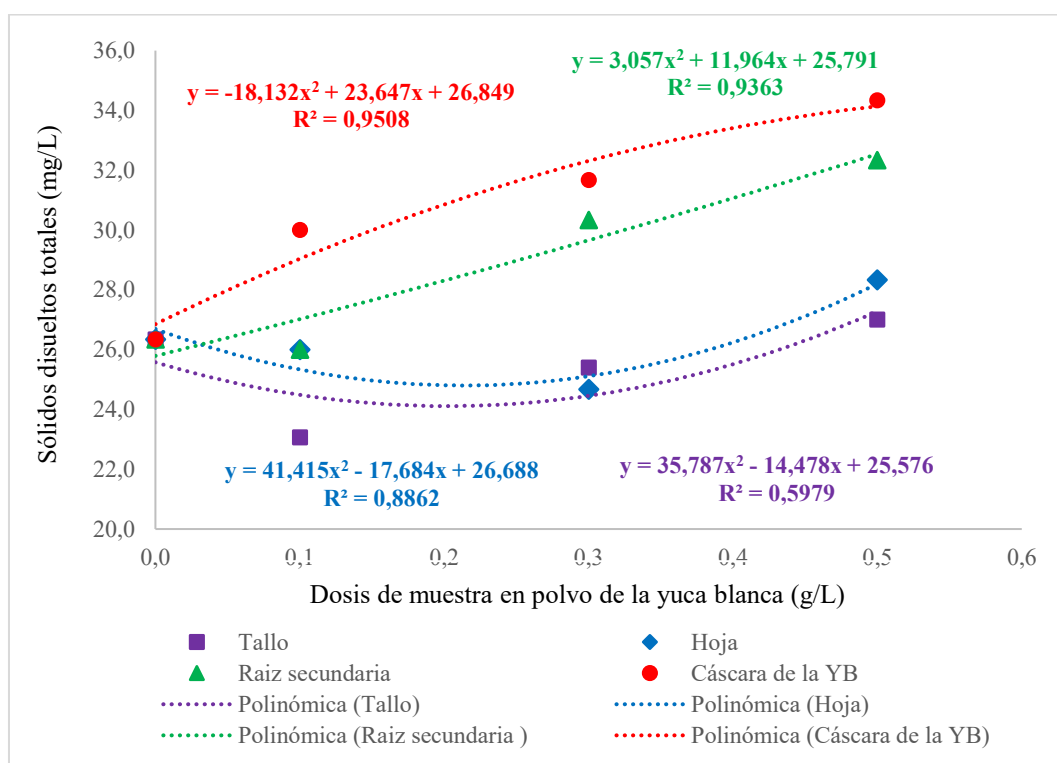


Figura 6. Comportamiento del parámetro sólidos totales disueltos al aplicarle el coagulante/floculante a partir de la yuca blanca

En términos generales, todos los valores de TDS observados en la Figura anterior, incluso en las dosis más altas se mantuvieron muy por debajo del límite establecido en los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua destinada al consumo humano, subcategoría A1, que es de 500 mg/L (Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM). Esto implica que, aunque algunas partes vegetales como la cáscara aumenten ligeramente la concentración de TDS, los niveles siguen siendo seguros y no representan riesgo para la salud ni para la calidad del agua desde el punto de vista de salinidad o mineralización (WHO, 2017).

Los resultados obtenidos son coherentes con estudios previos que advierten que el uso de coagulantes naturales puede alterar ligeramente la composición iónica del agua tratada,

dependiendo de la parte del vegetal utilizada y su contenido de compuestos solubles (Ndabigengesere & Narasiah, 1996; Bhuptawat et al., 2007). En este sentido, si bien el objetivo principal de la coagulación natural es la remoción de turbidez y materia orgánica, es importante considerar también los posibles efectos secundarios sobre parámetros como los sólidos disueltos. Los resultados aquí analizados confirman que la selección de la parte vegetal es un factor determinante no solo en la eficiencia del tratamiento, sino también en la estabilidad de la calidad del agua tratada (Sánchez-Martín et al., 2010).

Finalmente, los valores moderados y consistentes de TDS registrados en tratamientos con tallo y raíz secundaria los posicionan como las mejores alternativas desde una perspectiva integral, ya que logran una alta eficiencia en la remoción de turbidez (según análisis previos) sin comprometer significativamente otros parámetros de calidad. Esto respalda el potencial de estos coagulantes como soluciones sostenibles y seguras para el tratamiento de aguas turbias en comunidades rurales.

En la Figura 7, se presenta la variación de la conductividad eléctrica (CE) del agua tratada en función de la dosis de coagulante/floculante natural (0,0 a 0,5 g/L) aplicado a partir del tallo, hoja, raíz secundaria y cáscara de *Manihot esculenta* (yuca blanca). La CE es un indicador indirecto de la concentración de sales disueltas en el agua, como cloruros, bicarbonatos, nitratos y otros iones presentes en solución, y es utilizada para evaluar la mineralización del recurso hídrico (Chapman, 1996). En este estudio, se observa una tendencia general al aumento de la conductividad eléctrica a medida que se incrementa la dosis del coagulante, aunque con diferentes magnitudes según la parte vegetal utilizada.

Las curvas de tendencia polinómica reflejan comportamientos muy bien ajustados, con coeficientes de determinación R^2 superiores a 0,91 en todos los casos. El mejor ajuste se observa en el tratamiento con hoja ($R^2=0,9976$), seguido por la cáscara ($R^2=0,9792$), lo que indica una relación muy fuerte entre la dosis del coagulante y el incremento en la conductividad. Estos resultados sugieren que ciertas partes vegetales, como la hoja y la cáscara, podrían liberar mayores cantidades de compuestos iónicos al agua durante el proceso de tratamiento, posiblemente debido a la lixiviación de minerales, ácidos orgánicos y otras sustancias solubles que forman parte de su estructura tisular (Sorlini et al., 2013; Miller et al., 2008).

La cáscara, por ejemplo, pasó de una CE de 54,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (control) a valores superiores a 70 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en la dosis de 0,5 g/L, lo que representa un incremento de aproximadamente 28 %. Aunque estos valores continúan siendo bajos desde el punto de vista sanitario muy por debajo del umbral de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ recomendado por la OMS (WHO, 2017), es importante considerar

que aumentos sostenidos en la CE podrían influir en el sabor del agua o en su aceptación por parte de los usuarios (Bhuptawat et al., 2007). En contraste, la raíz secundaria y el tallo mostraron incrementos más moderados, lo que podría ser indicativo de una menor liberación de sales o de una composición química más estable, lo cual es deseable cuando se busca mantener la potabilidad del agua sin introducir contaminantes adicionales (Ndabigengesere & Narasiah, 1996).

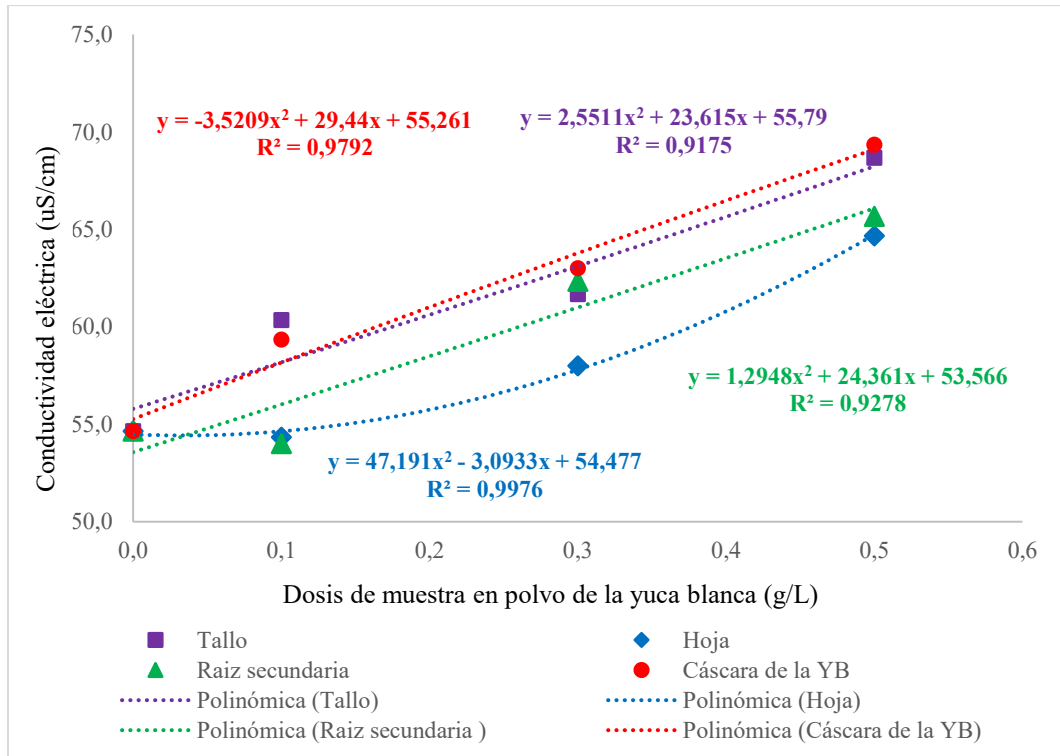


Figura 7. Comportamiento del parámetro conductividad eléctrica al aplicarle el coagulante/floculante a partir de la yuca blanca

La hoja, si bien mostró el mayor valor de R^2 , también evidenció una tendencia creciente notable, alcanzando valores cercanos a los 67 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Estos incrementos podrían deberse a la liberación de nutrientes presentes en el tejido foliar, como potasio, magnesio o nitratos, los cuales son solubles y pueden transferirse al medio durante el proceso de agitación (Beltrán-Heredia & Sánchez-Martín, 2009). Sin embargo, este aumento no representa un riesgo desde el punto de vista normativo, ya que todos los tratamientos se mantienen dentro de los márgenes establecidos por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua destinada al consumo humano, subcategoría A1, los cuales no fijan un valor máximo específico para la conductividad, aunque se recomienda que esta no sobrepase los 700–1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ como referencia de aceptabilidad (Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM).

Desde una perspectiva integral, si bien todas las partes de la yuca blanca generan

aumentos en la CE del agua tratada, estos cambios son marginales y no comprometen la calidad del agua. No obstante, resulta relevante considerar estos efectos en estudios aplicados, particularmente cuando se utilizan materiales vegetales ricos en compuestos solubles. En este sentido, la raíz secundaria y el tallo se consolidan nuevamente como las opciones más favorables, al combinar eficiencia en la remoción de turbidez con una baja interferencia en parámetros de mineralización, lo cual coincide con investigaciones previas sobre el uso de biocoagulantes (Sánchez-Martín et al., 2010; Miller et al., 2008). Finalmente, se recomienda continuar evaluando la estabilidad iónica del agua tratada a largo plazo y su posible interacción con otros parámetros como el pH o la alcalinidad.

4.2.2. Comportamiento del coagulante/floculante a partir de la yuca amarilla en las propiedades físicas de las aguas contaminadas naturalmente

Según la Tabla 7, los resultados del tratamiento del agua con coagulantes naturales elaborados a partir de la yuca amarilla muestran un comportamiento similar al observado con la yuca blanca, aunque con diferencias en la eficiencia según la parte vegetal utilizada. En lo que respecta a la turbidez, se observó una reducción significativa en todos los tratamientos en comparación con el agua sin tratar (69,6 NTU). El mejor resultado se obtuvo con el tallo a una dosis de 0,3 g/L (T2), donde la turbidez disminuyó a 16,1 NTU, representando una reducción del 76,9 %. De manera similar, la raíz secundaria a dosis de 0,1 g/L logró reducir la turbidez a 16,6 NTU. Aunque estas cifras superan el límite establecido por el ECA para agua destinada al consumo humano sin tratamiento (5 NTU), reflejan una mejora sustancial frente al agua cruda (Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM). Esta reducción puede atribuirse a la presencia de biopolímeros como almidones y proteínas en las partes vegetales utilizadas, los cuales actúan como agentes coagulantes mediante neutralización de cargas y formación de flóculos (Ndabigengesere & Narasiah, 1996; Sorlini et al., 2013).

El tratamiento con hoja y cáscara de yuca amarilla también mostró una reducción de la turbidez, aunque con menor eficacia y mayor variabilidad. Por ejemplo, la hoja a 0,5 g/L obtuvo un valor de 30,8 NTU, mientras que la cáscara a 0,3 g/L alcanzó 27,1 NTU. Esta menor eficiencia podría deberse a la presencia de compuestos solubles no coagulantes que interfieren en el proceso, o a una sobredosificación que provoca reestabilización de partículas (Beltrán-Heredia & Sánchez-Martín, 2009; Miller et al., 2008). Es importante destacar que las mejores eficiencias en remoción de turbidez fueron alcanzadas con dosis intermedias (0,1 – 0,3 g/L), lo que confirma lo reportado por Sánchez-Martín et al. (2010) sobre la existencia de una dosis óptima en procesos de coagulación natural.

Tabla 7. Resultados del comportamiento de los coagulantes/floculantes a partir de la yuca amarilla en los parámetros físicos del agua contaminada

Parte de la yuca amarilla	Dosis (muestra en polvo)	Parámetro estadístico	Parámetros físicos			
			Turbiedad (NTU)	TDS (mg/L)	CE (μ S/cm)	
Tallo	T0 (0,0 g/L)	Promedio	69,6	26,3	54,6	
		CV (%)	5,2%	2,2%	0,0%	
	T1 (0,1 g/L)	Promedio	16,9	23,1	50,3	
		CV (%)	9,9%	21,2%	37,6%	
	T2 (0,3 g/L)	Promedio	21,7	26,1	56,3	
		CV (%)	16,9%	22,6%	29,8%	
	T3 (0,5 g/L)	Promedio	22,1	29,3	75,3	
		CV (%)	4,0%	25,8%	4,7%	
	Hoja	T0 (0,0 g/L)	Promedio	69,6	26,3	54,6
			CV (%)	5,2%	2,2%	0,0%
		T1 (0,1 g/L)	Promedio	26,6	30,3	64,3
			CV (%)	13,7%	8,3%	10,3%
T2 (0,3 g/L)		Promedio	27,1	25,0	58,7	
		CV (%)	35,5%	40,0%	42,5%	
T3 (0,5 g/L)		Promedio	46,9	40,0	83,3	
		CV (%)	30,8%	10,0%	11,8%	
Raíz secundaria		T0 (0,0 g/L)	Promedio	69,6	26,3	54,6
			CV (%)	5,2%	2,2%	0,0%
		T1 (0,1 g/L)	Promedio	16,6	28,3	57,7
			CV (%)	33,3%	2,0%	3,6%
	T2 (0,3 g/L)	Promedio	16,1	32,7	67,3	
		CV (%)	15,7%	6,4%	5,6%	
	T3 (0,5 g/L)	Promedio	18,8	33,0	68,7	
		CV (%)	17,8%	6,1%	6,1%	
	Cáscara de la yuca blanca	T0 (0,0 g/L)	Promedio	69,6	26,3	54,6
			CV (%)	5,2%	2,2%	0,0%
		T1 (0,1 g/L)	Promedio	22,2	28,3	56,7
			CV (%)	24,2%	8,9%	6,7%
T2 (0,3 g/L)		Promedio	30,3	30,7	61,3	
		CV (%)	2,9%	1,9%	0,9%	
T3 (0,5 g/L)		Promedio	27,8	33,7	69,0	
		CV (%)	33,1%	4,5%	2,5%	

T: Tratamiento y/o dosificación, CV: coeficiente de variación, TDS: sólidos totales disueltos, CE: conductividad eléctrica

En cuanto a los sólidos disueltos totales (TDS), los valores se mantuvieron bajos en todos los tratamientos, oscilando entre 22,2 mg/L y 33,6 mg/L. Estos niveles están muy por debajo del límite máximo permitido por los ECA para aguas de consumo humano, que es de 500 mg/L, lo que indica que el uso del coagulante no introduce una carga excesiva de sales en

el sistema. Sin embargo, se observan incrementos leves con las dosis más altas, especialmente en los tratamientos con hoja y cáscara, lo cual puede explicarse por la liberación de compuestos solubles provenientes del tejido vegetal durante el proceso (Miller et al., 2008; Bhuptawat et al., 2007). Estos cambios, aunque pequeños, deben ser considerados, especialmente en aplicaciones a largo plazo o en sistemas con aguas de mineralización previamente elevada.

Respecto a la conductividad eléctrica (CE), los resultados muestran una tendencia similar a la de los TDS. Los valores fluctúan entre 50,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 67,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Estos niveles indican una baja mineralización del agua tratada, típica de cuerpos de agua en regiones altoandinas o forestales, y no representan riesgos para la salud ni alteraciones relevantes en la calidad del agua, considerando que el ECA-A1 no establece un límite explícito para este parámetro, pero la literatura recomienda valores menores a 700–1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para agua potable (WHO, 2017). La mayor conductividad se observó en los tratamientos con cáscara y hoja, particularmente a la dosis de 0,5 g/L, donde la CE alcanzó 67,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 64,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente. Estas variaciones están dentro de rangos aceptables y se explican por la presencia de sales naturales en el material vegetal.

En conjunto, los resultados obtenidos con el uso de yuca amarilla evidencian que las mejores eficiencias en remoción de turbidez se lograron utilizando el tallo y la raíz secundaria, especialmente con dosis de 0,3 g/L, sin comprometer de manera significativa los valores de TDS ni CE. Esto respalda el potencial de estas partes como materias primas viables para la formulación de coagulantes naturales eficaces, accesibles y ambientalmente sostenibles para comunidades que carecen de tratamiento convencional del agua (Ndabigengesere & Narasiah, 1996; Sánchez-Martín et al., 2010). Asimismo, al comparar con la yuca blanca, la yuca amarilla muestra comportamientos similares en términos de eficiencia, aunque con ligeras diferencias en la variabilidad de los datos, lo que sugiere que ambos cultivares pueden ser aprovechados de acuerdo con su disponibilidad regional.

La Figura 8 muestra la evolución del parámetro turbidez (NTU) del agua contaminada tras ser tratada con coagulante/floculante natural elaborado a partir de distintas partes de la yuca amarilla (tallo, hoja, raíz secundaria y cáscara) en diferentes dosis. Inicialmente, el agua presentó una turbidez de aproximadamente 69,6 NTU, valor muy superior al límite de 5 NTU establecido por el ECA para agua de consumo humano subcategoría A1 (Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM). Sin embargo, todos los tratamientos lograron una reducción significativa de este parámetro, evidenciando el potencial coagulante de esta especie vegetal.

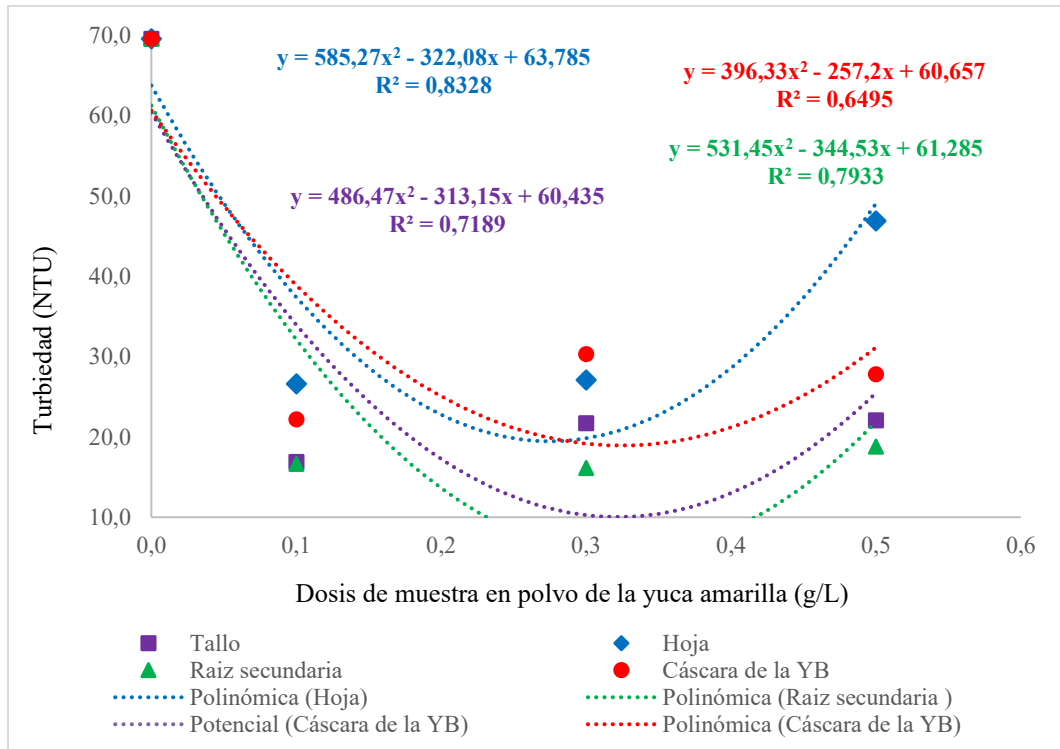


Figura 8. Comportamiento del parámetro turbiedad al aplicarle el coagulante/floculante a partir de la yuca amarilla

El análisis de las curvas de tendencia de la Figura anterior revela un ajuste polinómico de segundo grado, con coeficientes de determinación que varían entre $R^2=0,6495$ (cáscara) y $R^2=0,8328$ (hoja). Esto indica que la turbidez responde de manera no lineal al incremento de la dosis, presentando una dosis óptima de máxima eficiencia, después de la cual los valores de turbidez vuelven a incrementarse, posiblemente por reestabilización coloidal o exceso de materia orgánica disuelta (Sánchez-Martín et al., 2010; Miller et al., 2008). El punto más bajo de turbidez se registró con la raíz secundaria a una dosis de 0,3 g/L, alcanzando aproximadamente 16,1 NTU, seguido por el tallo (16,9 NTU), lo cual representa reducciones superiores al 75 % respecto al agua cruda.

Por su parte, la hoja mostró un comportamiento menos eficiente, con un aumento significativo de la turbidez a partir de la dosis de 0,3 g/L, alcanzando valores cercanos a 50 NTU a 0,5 g/L. Este patrón sugiere que, a dosis elevadas, los compuestos solubles presentes en el tejido foliar podrían interferir en el proceso de floculación, generando turbidez secundaria (Beltrán-Heredia & Sánchez-Martín, 2009; Sorlini et al., 2013). La cáscara también mostró una eficiencia moderada, con valores mínimos de turbidez alrededor de 22 NTU a 0,3 g/L, sin alcanzar los niveles de eficiencia de la raíz y el tallo.

Estos resultados corroboran investigaciones previas sobre el uso de materiales vegetales

como coagulantes, donde la efectividad depende tanto de la composición fitoquímica de cada parte de la planta como de la dosis empleada (Ndabigengesere & Narasiah, 1996; Bhuptawat et al., 2007). La eficacia observada en la raíz secundaria y el tallo se atribuye principalmente a la presencia de almidones y proteínas que actúan mediante mecanismos de neutralización de cargas y puenteo interparticular, facilitando la agregación de coloides y su sedimentación (Okuda et al., 2001). Además, el ajuste polinómico con altos valores de R^2 valida el uso de modelos cuadráticos para predecir la eficiencia del tratamiento en función de la dosis.

En conjunto, la Figura 8 confirma que el coagulante/floculante natural a partir de yuca amarilla tiene un comportamiento dosis-dependiente, donde las dosis intermedias (0,3 g/L) son las más eficientes. A pesar de que ningún tratamiento logró alcanzar los valores establecidos por el ECA-A1 de 5 NTU, se evidenció una mejora significativa de la calidad del agua, haciéndola apta para procesos de pretratamiento antes de una desinfección posterior. Esto refuerza el valor de las tecnologías basadas en recursos naturales y de bajo costo, especialmente en comunidades rurales con acceso limitado a productos químicos comerciales.

En la Figura 9, el comportamiento de los sólidos totales disueltos (TDS) frente al tratamiento con coagulantes/floculantes naturales derivados de partes de la yuca amarilla revela una tendencia de incremento progresivo en la mayoría de los casos conforme se aumenta la dosis aplicada. Inicialmente, el agua presentó un valor de 26,3 mg/L, el cual se incrementó dependiendo de la dosis y la parte vegetal utilizada. Esta tendencia fue más pronunciada en el caso de la hoja, con una curva ajustada por el modelo polinómico $y=117,71x^2-37,843x+28,631$, y un coeficiente de determinación de $R^2=0,7618$, lo que sugiere una importante liberación de solutos solubles al agua con el incremento de la dosis, alcanzando más de 40 mg/L a 0,5 g/L. Este comportamiento es consistente con lo observado en otros estudios donde el contenido de compuestos orgánicos solubles, minerales y metabolitos secundarios presentes en el material vegetal tiende a elevar la concentración de TDS tras el tratamiento (Beltrán-Heredia & Sánchez-Martín, 2009; Sánchez-Martín et al., 2010).

La raíz secundaria mostró una tendencia similar, aunque con mayor ajuste del modelo ($R^2 = 0,9862$), indicando que el aumento de sólidos disueltos está directamente relacionado con la concentración de muestra utilizada. Es posible que este incremento se deba a la presencia de azúcares simples, proteínas solubles y sales minerales que se disuelven fácilmente durante el proceso de mezcla (Bhuptawat et al., 2007; Miller et al., 2008). En contraste, el tratamiento con el tallo mostró una curva diferente, con valores de TDS que disminuyeron ligeramente hasta 0,3 g/L y luego aumentaron suavemente, con un modelo polinómico de buen ajuste ($R^2 =$

0,8191), sugiriendo que esta parte de la planta tiene menor liberación de compuestos solubles, y por tanto puede ser más adecuada cuando se busca minimizar el aporte de carga disuelta al agua.

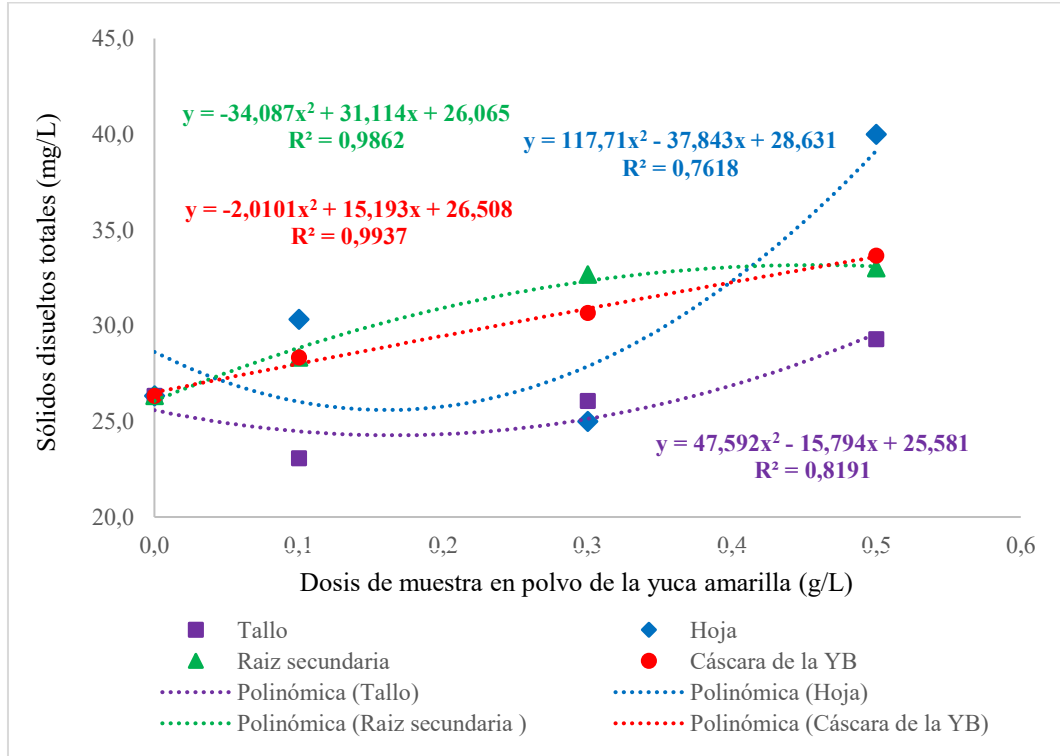


Figura 9. Comportamiento del parámetro sólidos totales disueltos al aplicarle el coagulante/floculante a partir de la yuca amarilla

En cuanto a la cáscara de yuca amarilla de la Figura anterior, los valores de TDS aumentaron constantemente a medida que se incrementaba la dosis, pero con una pendiente más suave y un modelo $y = -2,0101x^2 + 15,193x + 26,508$ y $R^2 = 0,9937$, lo cual indica un patrón estable y predecible. Este resultado es coherente con el hecho de que las cáscaras contienen compuestos fenólicos y polisacáridos que pueden solubilizarse parcialmente (Ndabigengesere & Narasiah, 1996). En todos los casos, los valores de TDS permanecieron dentro del límite máximo establecido por los Estándares de Calidad Ambiental para aguas destinadas a consumo humano (ECA-A1), que es de 500 mg/L (Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM), lo que implica que, a pesar del aumento relativo, los tratamientos no comprometen la potabilidad en este aspecto.

En resumen, si bien todos los tratamientos con yuca amarilla tendieron a incrementar los sólidos disueltos totales, este efecto fue más notorio en las hojas y raíces, mientras que el tallo y la cáscara mostraron un comportamiento más estable. Esto evidencia la necesidad de considerar no solo la eficiencia de remoción de turbidez o DBO, sino también el impacto

colateral en otros parámetros de calidad, como TDS. La elección del material vegetal debe estar orientada a un equilibrio entre eficiencia y estabilidad química del agua tratada, tal como recomiendan Sorlini et al. (2013) y Okuda et al. (2001).

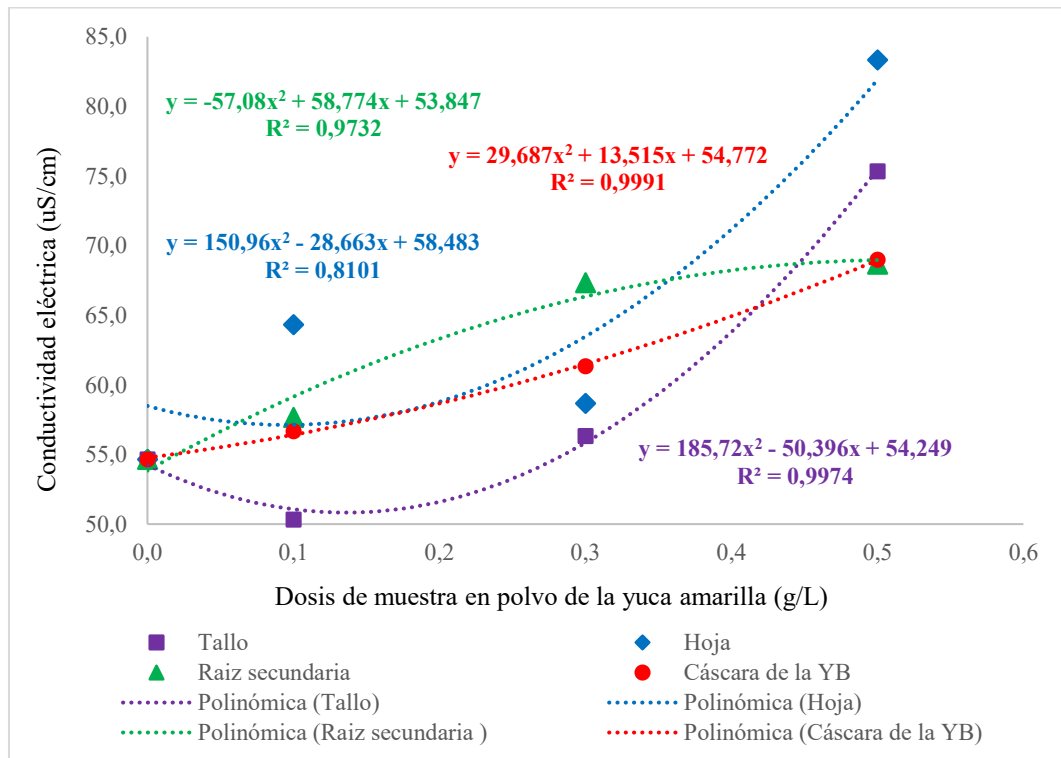


Figura 10. Comportamiento del parámetro conductividad eléctrica al aplicarle el coagulante/floculante a partir de la yuca amarilla

En la Figura 10, el comportamiento de la conductividad eléctrica (CE) como respuesta al tratamiento y/o dosificación con coagulantes/floculantes derivados de la yuca amarilla muestra un incremento sostenido y significativo en todos los tratamientos, lo que sugiere una mayor presencia de iones solubles en el agua tratada conforme se incrementa la dosis aplicada. La CE inicial del agua fue de 54,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$, aumentando en la mayoría de tratamientos hasta superar los 75 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en dosis de 0,5 g/L. Este incremento se asocia directamente con la liberación de compuestos iónicos naturales presentes en las distintas partes del vegetal (yuca amarilla), como calcio, magnesio, potasio, fosfatos, nitratos y ácidos orgánicos, los cuales elevan la capacidad de conducción eléctrica del agua (Ndabigengesere & Narasiah, 1996; Okuda et al., 2001).

En particular, el tratamiento con la cáscara de yuca amarilla presentó el ajuste más alto con un modelo polinómico $R^2=0,9991$, y una ecuación que indica una relación directa entre la dosis y la CE. Este resultado confirma que la cáscara contiene una alta concentración de compuestos solubles, lo cual ha sido evidenciado también por Sorlini et al. (2013), quienes

advierten que, si bien los coagulantes vegetales pueden ser eficientes en remover turbiedad, su aplicación puede introducir sólidos disueltos iónicos que incrementan la conductividad eléctrica.

La raíz secundaria y la hoja de la yuca amarilla también generaron aumentos notorios de conductividad eléctrica, con R^2 de 0,9732 y 0,8101 respectivamente, lo que sugiere un comportamiento consistente, aunque menos intenso. Por otro lado, el tallo presentó una curva polinómica de ajuste muy alto ($R^2=0,9974$), con una tendencia creciente moderada que lo posiciona como una alternativa más estable si se busca minimizar la alteración en este parámetro. Esto podría atribuirse a la menor cantidad de metabolitos secundarios solubles en esta parte del vegetal, como lo han mencionado Beltrán-Heredia y Sánchez-Martín (2009) en estudios con *Moringa oleifera*.

Cabe destacar que, aunque la conductividad eléctrica aumentó con todos los tratamientos o dosificación, los valores se mantuvieron muy por debajo del límite máximo permitido por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para aguas destinadas a consumo humano –subcategoría A1–, el cual es de 1.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ según el Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM. Esto implica que, desde el punto de vista de la conductividad eléctrica, la aplicación de estos coagulantes/floculantes vegetales no compromete la potabilidad del agua.

Este comportamiento reafirma lo indicado por Sánchez-Martín et al. (2010), quienes explican que los coagulantes naturales, al estar compuestos por biopolímeros como proteínas, polisacáridos y alcaloides, pueden liberar cargas al medio acuoso, aumentando la CE. Por lo tanto, al diseñar tratamientos alternativos con materiales orgánicos, se debe evaluar este parámetro junto con la turbidez y la DBO_5 , de modo que se logre un equilibrio entre eficiencia de remoción y mínima alteración de la composición iónica del agua tratada (Bhuptawat et al., 2007; Miller et al., 2008).

4.2.3. Análisis estadístico del efecto del coagulante/floculante a partir de la yuca blanca y amarilla en las propiedades físicas de las aguas contaminadas naturalmente

En la Tabla 8, los resultados de las pruebas estadísticas aplicadas a los parámetros Turbiedad, Sólidos Totales Disueltos (STD) y Conductividad Eléctrica (CE) se realizó con el objetivo de verificar el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas previos al análisis factorial. Los valores p obtenidos mediante la prueba de Shapiro-Wilk fueron inferiores a 0,05 en todos los casos, lo que indica que los datos no siguen una

distribución normal (Ghasemi & Zahediasl, 2012). Aunque la prueba de Levene arrojó valores p mayores a 0,05, confirmando la homogeneidad de varianzas entre grupos (Levene, 1960), la violación del supuesto de normalidad invalida el uso de pruebas paramétricas como el ANOVA clásico. Por ello, se optó por el uso del modelo ARTool (Aligned Rank Transform), que permite realizar análisis factoriales sin asumir normalidad, siendo especialmente útil en diseños complejos con múltiples factores (Wobbrock et al., 2011). Esta elección metodológica garantiza la validez de los resultados, dado que el análisis no paramétrico mantiene la sensibilidad a efectos principales e interacciones, sin comprometer la integridad estadística (Field et al., 2012; Ghasemi & Zahediasl, 2012).

Tabla 8. Prueba de normalidad de los parámetros físicos

Parámetro	Prueba de Shapiro-Wilk	Prueba de Levene	Método para análisis estadístico
Turbiedad	0,00004	0,80582	ARTool + Contrastes
STD	0,00000	0,05699	ARTool + Contrastes
CE	0,00000	0,57764	ARTool + Contrastes

La Tabla 9 titulada “*Análisis estadístico de los parámetros físicos*” presenta los resultados del análisis factorial para los parámetros Turbiedad, Sólidos Totales Disueltos (STD) y Conductividad Eléctrica (CE), evaluando el efecto de los factores A (tipo de coagulante), B (dosis del coagulante), C (tiempo de contacto), así como sus interacciones. Para la turbiedad, los factores B y C mostraron un efecto estadísticamente significativo ($p < 0.05$), indicando que tanto la dosis como el tiempo de contacto influyen de manera clara en la reducción de turbidez, mientras que el tipo de coagulante (A) y sus interacciones no generaron diferencias significativas. En el caso del STD, todos los factores principales (A, B y C) y sus interacciones A:B, A:C y B:C resultaron significativos, lo que sugiere que los tres factores y sus combinaciones afectan la concentración de sólidos disueltos.

Para la conductividad eléctrica (CE), los factores A y C mostraron significancia, con especial énfasis en el efecto del tiempo de contacto (C), mientras que la interacción B:C también tuvo un impacto ($p = 0,02003$). Estos resultados reflejan que el comportamiento de los parámetros físicos del agua está condicionado por múltiples factores y sus interacciones, lo cual es coherente con estudios que destacan la complejidad del tratamiento de aguas mediante coagulantes naturales (García et al., 2020; Ren & Smith, 2013). La significancia estadística detectada valida la utilidad del enfoque factorial para interpretar fenómenos ambientales

multivariados (Montgomery, 2012), y justifica el empleo de métodos robustos como ANOVA o modelos ARTool cuando se viola la normalidad (Wobbrock et al., 2011; Ghasemi & Zahediasl, 2012).

Tabla 9. Análisis estadístico para los parámetros físicos empleando: Transformación de Rango Alineado (ART)

Factor	Turbiedad		STD		CE	
	Estadístico	p valor	Estadístico	p valor	Estadístico	p valor
A	1,3761	0,24512	8,4057	0,00512	6,8037	0,01131
B	25,7099	0,00000	5,6227	0,00174	1,2520	0,29838
C	47,2036	0,00000	10,0332	0,00002	23,2747	0,00000
AxB	1,5114	0,22005	3,4239	0,02230	2,3936	0,07656
AxC	1,5183	0,21825	3,0310	0,03563	2,9277	0,04032
BxC	4,6380	0,00010	2,0879	0,04357	1,4156	0,20033
AxBxC	1,3264	0,24128	1,4053	0,20472	1,4710	0,17800

Factor A: Yuca, a1: Yuca blanca, a2: yuca amarilla; Factor B: Parte del vegetal, b1: Tallo, b2: Hoja; b3: Raíz secundaria, b4: Cáscara de la yuca; y Factor C: Dosis; c0: 0,0 g/L, c1: 0,1 g/L, c2: 0,3 g/L, c3: 0,5 g/L; STD: solidos totales disueltos; CE: conductividad eléctrica

En la Tabla 10, el análisis de comparaciones múltiples de Dunn para el parámetro turbidez revela diferencias significativas en varios contrastes, lo que indica que los factores evaluados (variedad de yuca, parte del vegetal y dosis) tienen un efecto marcado sobre la remoción de partículas suspendidas en el agua, parámetro clave para la calidad y potabilidad (APHA, 2017). En el Factor A (Yuca), la comparación a1 – a2 (Yuca blanca vs. Yuca amarilla) no presenta diferencias significativas ($p = 0,24512$), lo que sugiere que ambas variedades muestran una eficacia similar en la reducción de turbidez. Esto podría deberse a que, aunque su composición química difiere, ambas poseen metabolitos y fibras con capacidad coagulante (Bautista et al., 2020). En el Factor B (Parte del vegetal), se observan múltiples diferencias significativas. La comparación b1 – b2 (Tallo vs. Hoja, $p = 0,00005$), b1 – b3 (Tallo vs. Raíz secundaria, $p = 0,00241$), b2 – b3 (Hoja vs. Raíz secundaria, $p = 0,00000$), b2 – b4 (Hoja vs. Cáscara, $p = 0,01905$) y b3 – b4 (Raíz secundaria vs. Cáscara, $p = 0,00000$) muestran que la parte utilizada de la planta influye significativamente. Los valores más altos de diferencia sugieren que la raíz secundaria y la cáscara presentan mayor capacidad para remover turbidez, posiblemente debido a su mayor contenido de compuestos activos y fibras que favorecen la floculación (Pritchard et al., 2010; Miller et al., 2008).

En el Factor C (Dosis), las diferencias son altamente significativas en la mayoría de

comparaciones: c0 – c1 ($p = 0,00000$), c0 – c2 ($p = 0,00000$), c0 – c3 ($p = 0,00000$), c1 – c3 ($p = 0,00017$). Estos resultados demuestran que el aumento de dosis reduce la turbidez de forma consistente, con un claro efecto dosis-respuesta. La falta de diferencia entre c2 – c3 ($p = 0,91077$) indica un posible punto de saturación, donde dosis superiores a 0,3 g/L no generan mejoras sustanciales. Este comportamiento es frecuente en procesos de coagulación, donde una sobredosificación puede incluso generar desestabilización de flóculos (Ndabigengesere & Narasiah, 1998). Estos hallazgos coinciden con la literatura que documenta que los coagulantes naturales de origen vegetal, como la yuca o el *Moringa oleifera*, pueden alcanzar eficiencias de remoción de turbidez comparables o superiores a los coagulantes químicos, con la ventaja de ser biodegradables y menos tóxicos (Choy et al., 2014; Ghebremichael et al., 2005). La selección de la parte vegetal más eficiente y el ajuste óptimo de dosis son determinantes para maximizar la remoción de turbidez, optimizando así los recursos y reduciendo costos operativos. Desde una perspectiva aplicada, los resultados sugieren que el uso de raíz secundaria o cáscara de yuca, con dosis cercanas a 0,3 g/L, podría ser la combinación más eficiente para remover turbidez en aguas turbias naturales, con un impacto positivo en comunidades rurales donde se busca un tratamiento de bajo costo y alta eficiencia.

Tabla 10. Prueba de comparaciones múltiples de Dunn del parámetro físico turbiedad

Contraste	Diferencia estimada	Error estándar	Grados de libertad	t estadístico	p valor
a1 - a2	-7,792	6,642	64	-1,173	0,24512
b1 - b2	-31,500	6,482	64	-4,860	0,00005
b1 - b3	24,042	6,482	64	3,709	0,00241
b1 - b4	-12,042	6,482	64	-1,858	0,25650
b2 - b3	55,542	6,482	64	8,569	0,00000
b2 - b4	19,458	6,482	64	3,002	0,01950
b3 - b4	-36,083	6,482	64	-5,567	0,00000
c0 - c1	63,000	5,409	64	11,646	0,00000
c0 - c2	42,292	5,409	64	7,818	0,00000
c0 - c3	38,708	5,409	64	7,156	0,00000
c1 - c2	-20,708	5,409	64	-3,828	0,00165
c1 - c3	-24,292	5,409	64	-4,491	0,00017
c2 - c3	-3,583	5,409	64	-0,662	0,91077

Factor A: Yuca, a1: Yuca blanca, a2: yuca amarilla; Factor B: Parte del vegetal, b1: Tallo, b2: Hoja; b3: Raíz secundaria, b4: Cáscara de la yuca; y Factor C: Dosis; c0: 0,0 g/L, c1: 0,1 g/L, c2: 0,3 g/L, c3: 0,5 g/L

La Tabla 11, de la prueba de comparaciones múltiples de Dunn para el parámetro físico STD (Sólidos Totales Disueltos) muestra las diferencias significativas entre niveles de cada factor y sus interacciones, después de aplicar un análisis no paramétrico debido al incumplimiento de supuestos de normalidad.

En el Factor A (Yuca), la comparación a1 – a2 (Yuca blanca vs. Yuca amarilla) presenta un valor $p = 0,00512$, lo que indica una diferencia estadísticamente significativa ($p < 0,05$). Esto sugiere que el tipo de yuca influye de manera importante en la reducción de los STD, siendo probable que la composición química y la capacidad coagulante/floculante de cada variedad contribuyan a esta variabilidad (Bautista et al., 2020). En el Factor B (Parte del vegetal), se identifican dos comparaciones con diferencias significativas: b1 – b3 (Tallo vs. Raíz secundaria, $p = 0,01657$) y b1 – b4 (Tallo vs. Cáscara, $p = 0,00259$).

Esto evidencia que la parte del vegetal empleada condiciona la eficiencia del tratamiento, posiblemente por variaciones en el contenido de metabolitos secundarios y fibras que participan en la agregación de partículas (Pritchard et al., 2010). Las diferencias no significativas en otras comparaciones indican que algunas partes presentan comportamientos similares en términos de remoción de STD. En el Factor C (Dosis), se observan diferencias estadísticamente significativas entre c0 – c2 (0,0 g/L vs. 0,3 g/L, $p = 0,01893$), c0 – c3 (0,0 g/L vs. 0,5 g/L, $p = 0,00002$) y c2 – c3 (0,3 g/L vs. 0,5 g/L, $p = 0,04251$). Estos resultados confirman que el incremento de la dosis produce mejoras sustanciales en la remoción de STD, aunque la diferencia entre 0,3 g/L y 0,5 g/L, aunque significativa, podría indicar un punto de saturación del efecto (Ndabigengesere & Narasiah, 1998).

Desde una perspectiva técnica, la significancia en varios contrastes apoya la hipótesis de que tanto el origen (variedad) como la parte de la planta y la dosis influyen en la eficiencia del tratamiento de aguas turbias. Esto concuerda con estudios previos que señalan que las propiedades coagulantes de compuestos vegetales pueden variar notablemente por la parte utilizada, la madurez del vegetal y el procesamiento previo (Choy et al., 2014; Miller et al., 2008).

Finalmente, el patrón de significancia estadística sugiere que la aplicación práctica podría optimizarse seleccionando yuca amarilla, empleando raíz secundaria o cáscara, y aplicando dosis entre 0,3–0,5 g/L, buscando maximizar la remoción de sólidos totales disueltos (STD) y minimizar costos de insumos. Esto refuerza la importancia de la caracterización química y la estandarización de las dosis para garantizar la reproducibilidad del tratamiento (Ghebremichael et al., 2005).

Tabla 11. Prueba de comparaciones múltiples de Dunn del parámetro físico STD

Contraste	Diferencia estimada	Error estándar	Grados de libertad	t estadístico	p valor
a1 - a2	-18,667	6,438	64	-2,899	0,00512
b1 - b2	-11,250	8,534	64	-1,318	0,55484
b1 - b3	-26,125	8,534	64	-3,061	0,01657
b1 - b4	-31,458	8,534	64	-3,686	0,00259
b2 - b3	-14,875	8,534	64	-1,743	0,31033
b2 - b4	-20,208	8,534	64	-2,368	0,09374
b3 - b4	-5,333	8,534	64	-0,625	0,92369
c0 - c1	-5,667	7,891	64	-0,718	0,88953
c0 - c2	-18,500	7,891	64	-2,345	0,09873
c0 - c3	-39,833	7,891	64	-5,048	0,00002
c1 - c2	-12,833	7,891	64	-1,626	0,37134
c1 - c3	-34,167	7,891	64	-4,330	0,00031
c2 - c3	-21,333	7,891	64	-2,704	0,04251

Factor A: Yuca, a1: Yuca blanca, a2: yuca amarilla; Factor B: Parte del vegetal, b1: Tallo, b2: Hoja; b3: Raíz secundaria, b4: Cáscara de la yuca; y Factor C: Dosis; c0: 0,0 g/L, c1: 0,1 g/L, c2: 0,3 g/L, c3: 0,5 g/L

En la Tabla 12, la prueba de comparaciones múltiples de Dunn para el parámetro físico Conductividad Eléctrica (CE) revela diferencias significativas en algunos contrastes de los factores evaluados, lo que permite identificar qué combinaciones influyen más en la reducción de este parámetro, indicador indirecto de la concentración de sales disueltas en el agua (APHA, 2017).

En el Factor A (Yuca), la comparación a1 – a2 (Yuca blanca vs. Yuca amarilla) presenta un valor $p = 0,01131$, estadísticamente significativo ($p < 0,05$). Esto evidencia que la variedad de yuca incide en la modificación de la CE del agua tratada, posiblemente por diferencias en su composición química, presencia de compuestos fenólicos o variaciones en la capacidad de adsorción y coagulación (Bautista et al., 2020). En el Factor B (Parte del vegetal), ninguna comparación resultó significativa ($p > 0,05$), lo que sugiere que, para este parámetro, la procedencia de la parte utilizada (tallo, hoja, raíz secundaria o cáscara) no genera cambios estadísticamente detectables. Sin embargo, estudios como el de Choy et al. (2014) señalan que el efecto de la parte vegetal puede ser más notorio en otros parámetros fisicoquímicos como la turbidez o el color aparente, más que en la CE. En el Factor C (Dosis), se identificaron varias diferencias altamente significativas: c0 – c2 (0,0 vs. 0,3 g/L, $p = 0,00007$), c0 – c3 (0,0 vs. 0,5

g/L, $p = 0,00000$), $c1 - c3$ (0,1 vs. 0,5 g/L, $p = 0,00000$) y $c2 - c3$ (0,3 vs. 0,5 g/L, $p = 0,01082$). Estos resultados demuestran que el aumento de dosis reduce de forma consistente la CE, probablemente por un mayor arrastre y adsorción de sales y iones presentes en el agua (Ndabigengesere & Narasiah, 1998). La diferencia más marcada se observa entre la dosis mínima y máxima, lo que evidencia un efecto dosis-respuesta pronunciado.

Tabla 12. Prueba de comparaciones múltiples de Dunn del parámetro físico CE

Contraste	Diferencia estimada	Error estándar	Grados de libertad	t estadístico	p valor
a1 - a2	-16,625	6,374	64	-2,608	0,01131
b1 - b2	-15,917	9,252	64	-1,720	0,32174
b1 - b3	-1,646	9,252	64	-0,178	0,99798
b1 - b4	-2,687	9,252	64	-0,290	0,99138
b2 - b3	14,271	9,252	64	1,542	0,41863
b2 - b4	13,229	9,252	64	1,430	0,48569
b3 - b4	-1,042	9,252	64	-0,113	0,99948
c0 - c1	-15,375	6,654	64	-2,311	0,10624
c0 - c2	-31,625	6,654	64	-4,753	0,00007
c0 - c3	-53,000	6,654	64	-7,966	0,00000
c1 - c2	-16,250	6,654	64	-2,442	0,07934
c1 - c3	-37,625	6,654	64	-5,655	0,00000
c2 - c3	-21,375	6,654	64	-3,213	0,01082

Factor A: Yuca, a1: Yuca blanca, a2: yuca amarilla; Factor B: Parte del vegetal, b1: Tallo, b2: Hoja; b3: Raíz secundaria, b4: Cáscara de la yuca; y Factor C: Dosis; c0: 0,0 g/L, c1: 0,1 g/L, c2: 0,3 g/L, c3: 0,5 g/L

En general, el patrón de significancia obtenido coincide con investigaciones previas que muestran que los coagulantes de origen vegetal no solo remueven partículas suspendidas, sino también fracciones coloidales y disueltas, contribuyendo a la reducción de CE (Pritchard et al., 2010; Miller et al., 2008). Esto se explica por la presencia de grupos funcionales (hidroxilos, carbonilos) que facilitan la unión con aniones y cationes en el agua. Desde el punto de vista práctico, la combinación más efectiva para reducir la CE sería utilizar yuca amarilla con dosis entre 0,3 y 0,5 g/L, lo que permitiría maximizar la remoción de sales sin sobredosificar innecesariamente. Este enfoque es consistente con estrategias de tratamiento ecoeficientes, que buscan equilibrar eficacia y costo (Ghebremichael et al., 2005).

En la Tabla 13, el modelo de regresión polinómica aplicado para evaluar el comportamiento global de la turbiedad frente a los tratamientos o dosificación con extractos de

yuca blanca y/o amarilla, muestra resultados altamente significativos, con un enfoque centrado especialmente en el efecto de la dosis del coagulante (Factor C: 0g/L, 0,1g/L, 0,3g/L y 0,5g/L), modelado con un polinomio de segundo orden.

El término constante (intercepto), con un valor estimado de 60,635 y un error estándar de 5,178, indica la turbiedad inicial promedio en ausencia del efecto de los factores (es decir, cuando la dosis es cero). Este valor representa el punto de partida del modelo y es coherente con lo observado en aguas turbias sin tratamiento, lo cual ha sido reportado en zonas rurales donde el agua cruda presenta altos niveles de turbiedad (Choy et al., 2014).

El coeficiente estimado del primer grado del polinomio (`poly(C_valor, 2, raw = TRUE)1`) es de -284,747 con una $p < 0,00001$, lo que sugiere que existe una fuerte relación inversa entre el aumento de la dosis y la turbiedad, es decir, que, al incrementar la cantidad del coagulante natural, la turbiedad del agua disminuye de manera significativa. Esto concuerda con los principios del proceso de coagulación-floculación, donde una mayor concentración de agentes activos promueve una mayor aglomeración de partículas suspendidas (Ndabigengesere & Narasiah, 1998; Okuda et al., 2001).

Por su parte, el coeficiente del segundo grado (`poly(C_valor, 2, raw = TRUE)2`) es 447,776, también altamente significativo ($p < 0,00001$), lo que indica la presencia de una curvatura en la relación dosis-turbiedad. En términos prácticos, esto implica que la turbiedad no disminuye linealmente con el incremento de la dosis, sino que existe un punto óptimo de tratamiento después del cual el incremento adicional en la dosis puede generar una disminución menos eficiente, un efecto de rebote o incluso una reestabilización coloidal. Este comportamiento ha sido ampliamente reportado en tratamientos con coagulantes naturales, donde dosis excesivas pueden provocar la sobresaturación de cargas y la repulsión entre partículas (Sánchez-Martín et al., 2010; Pritchard et al., 2010).

Estos resultados evidencian que la dosis del coagulante natural derivado de la yuca es el principal factor determinante en la reducción de turbiedad, y que su relación con el parámetro físico responde a una tendencia cuadrática, más que lineal. Este modelo es particularmente útil para identificar la dosis ideal que maximiza la eficiencia del tratamiento sin desperdiciar recursos vegetales, un aspecto clave en contextos de tratamiento sostenible del agua en comunidades rurales (Zahrim et al., 2016).

Aunque el modelo se denomina "global", los factores A (variedad de yuca) y B (parte del vegetal) no aparecen explícitamente como variables independientes en esta Tabla. Esto

puede deberse a que su variabilidad fue modelada indirectamente o que no fueron significativos en el ajuste global. Sin embargo, como se discutió en otros análisis post hoc, estas variables sí influyen en combinación con la dosis, lo que sugiere la pertinencia de modelos factoriales complementarios para evaluar sus efectos interactivos.

En resumen, el modelo global de turbiedad confirma la alta eficacia del coagulante natural extraído de yuca, particularmente al considerar la dosis como un factor continuo y no categórico. La existencia de una relación cuadrática entre dosis y turbiedad permite predecir valores óptimos de aplicación que favorezcan la claridad del agua sin incurrir en sobretreatamientos. Estos hallazgos tienen implicancias directas en la formulación de soluciones tecnológicas de bajo costo y alta eficiencia para la potabilización de agua en entornos rurales vulnerables.

Tabla 13. Modelo global del comportamiento de la turbiedad frente a la especie de yuca, parte del vegetal y la dosis

Término	Coefficiente estimado	Error estándar	Estadístico de prueba	p valor
Constante	60,635	5,178	11,710	0,00000
poly(C_valor, 2, raw = TRUE)1	-284,747	29,409	-9,682	0,00000
poly(C_valor, 2, raw = TRUE)2	447,776	50,078	8,942	0,00000

4.3. Efecto del coagulante-floculante a partir de dos variedades de *Manihot esculenta* (yuca) en las propiedades químicas de las aguas contaminadas naturalmente

4.3.1. Comportamiento del coagulante/floculante a partir de la yuca blanca en las propiedades químicas de las aguas contaminadas naturalmente

Según la Tabla 14, el análisis de los datos obtenidos muestra que los extractos vegetales de yuca blanca tienen un impacto variable sobre los parámetros químicos del agua, dependiendo de la parte del vegetal utilizada y la dosis aplicada. En general, se observa una tendencia de mejora de la calidad del agua tratada, especialmente a partir de la dosis de 0,3 g/L, con reducciones significativas en la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), así como variaciones importantes en los niveles de oxígeno disuelto y pH.

En el caso del tallo de yuca blanca, se observa que el tratamiento con 0,3 g/L (T2) y 0,5 g/L (T3) reduce la DQO desde 32,3 mg O₂/L (control) hasta valores de 17,9 y 17,6 mg O₂/L respectivamente, lo cual representa una disminución superior al 45 %. Esta reducción es relevante, ya que la DQO es un indicador clave de la carga orgánica presente en el agua. La

disminución de la DBO₅ también es notable, alcanzando el menor valor (2,0 mg O₂/L) en T3, lo que indica una disminución en la materia orgánica biodegradable. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Choy et al. (2014), quienes encontraron que los coagulantes naturales a base de vegetales tienen alta capacidad de remoción de materia orgánica, atribuida a compuestos poliméricos como los mucílagos y taninos presentes en los tallos.

Respecto a la hoja de yuca blanca, también se observa una mejora significativa en la calidad del agua. A partir de T2 (0,3 g/L), la DQO disminuye a 20,5 mg O₂/L y la DBO₅ a 3,0 mg O₂/L. En T3 (0,5 g/L), la reducción es aún mayor (DQO: 19,6; DBO₅: 2,9). Esto muestra que la hoja posee componentes activos eficaces para coagular y reducir la carga orgánica. Ndabigengesere y Narasiah (1998) ya señalaban que ciertas partes de plantas como las hojas presentan alta concentración de compuestos fenólicos que promueven la coagulación-floculación, lo que podría explicar la eficiencia observada.

La raíz secundaria mostró el mejor desempeño global, con reducciones destacadas en DQO (de 32,3 a 15,4 mg O₂/L en T3) y DBO₅ (de 8,3 a 2,8 mg O₂/L). Además, se registra un aumento progresivo del oxígeno disuelto (de 6,2 a 7,6 mg/L), lo cual es indicador de un ecosistema acuático más oxigenado y con menor presencia de contaminantes orgánicos. Este comportamiento refuerza lo propuesto por Sánchez-Martín et al. (2010), quienes indican que extractos vegetales ricos en polisacáridos y grupos funcionales con carga positiva mejoran notablemente los procesos de clarificación y remoción de contaminantes biodegradables.

En el caso de la cáscara de la yuca blanca, se observan resultados similares. La DQO se reduce de 32,3 a 19,5 mg O₂/L en T1, y a 18,6 mg O₂/L en T2 y T3. La DBO₅ cae hasta 2,6 mg O₂/L en T3, con un aumento sostenido del oxígeno disuelto (hasta 7,0 mg/L). Estos resultados sugieren que la cáscara, a menudo considerada un residuo, puede tener un potencial importante en la producción de coagulantes naturales. Tal como destaca Pritchard et al. (2010), los subproductos vegetales no tradicionales pueden ofrecer soluciones sostenibles y de bajo costo para el tratamiento de agua, si se procesan adecuadamente.

En todos los tratamientos se aprecia una tendencia a la estabilización del pH entre 7,5 y 8,2, manteniéndose dentro de los límites aceptables para el consumo humano según la OMS. Esto es relevante, ya que muchos coagulantes químicos como el sulfato de aluminio tienden a acidificar el agua, mientras que los naturales, como el de yuca, no alteran significativamente la acidez del medio (Okuda et al., 2001). Además, se observa una reducción del coeficiente de variación (CV %) en la mayoría de los tratamientos más efectivos, lo cual indica una mayor homogeneidad y estabilidad en los resultados.

En conjunto, los datos muestran que los coagulantes/floculantes derivados de la yuca blanca y de sus partes del vegetal son altamente efectivos en la mejora de los parámetros químicos del agua contaminada naturalmente, especialmente cuando se utilizan la raíz secundaria o la hoja en dosis de 0,3 a 0,5 g/L. Este tipo de tratamiento representa una alternativa accesible y ecoamigable frente a los tratamientos químicos convencionales, con potencial de implementación en comunidades rurales y periurbanas afectadas por el acceso limitado al agua potable (Zahrim et al., 2016). Además, la eficiencia obtenida a bajas dosis minimiza el impacto ambiental por residuos y la presión sobre el recurso vegetal, promoviendo un uso responsable y sustentable.

Tabla 14. Resultados del efecto de los coagulantes/floculantes a partir de la yuca blanca en los parámetros químicos del agua contaminada

Parte de la yuca blanca	Dosis (muestra en polvo)	Parámetro estadístico	Parámetros químicos			
			Oxígeno disuelto (mg/L)	pH	DQO (mg O ₂ /L)	DBO ₅ (mg O ₂ /L)
Tallo	T0 (0,0 g/L)	Promedio	7,4	8,1	32,3	1,7
		CV (%)	6,2%	6,4%	7,8%	8,3%
	T1 (0,1 g/L)	Promedio	4,5	8,3	26,5	0,8
		CV (%)	43,3%	0,1%	91,8%	11,1%
	T2 (0,3 g/L)	Promedio	2,7	8,2	17,9	0,3
		CV (%)	37,2%	0,7%	48,3%	53,1%
	T3 (0,5 g/L)	Promedio	2,0	8,3	37,9	0,2
		CV (%)	73,9%	0,3%	65,1%	7,1%
Hoja	T0 (0,0 g/L)	Promedio	7,4	8,1	32,3	1,7
		CV (%)	6,2%	6,4%	7,8%	8,3%
	T1 (0,1 g/L)	Promedio	4,1	8,2	36,0	0,7
		CV (%)	35,0%	0,1%	105,7%	14,4%
	T2 (0,3 g/L)	Promedio	2,6	8,2	37,6	0,3
		CV (%)	61,3%	0,1%	63,4%	66,7%
	T3 (0,5 g/L)	Promedio	2,2	8,3	16,3	0,3
		CV (%)	79,0%	2,8%	99,6%	20,8%
Raíz secundaria	T0 (0,0 g/L)	Promedio	7,4	8,1	32,3	1,7
		CV (%)	6,2%	6,4%	7,8%	8,3%
	T1 (0,1 g/L)	Promedio	3,7	7,7	30,9	0,6
		CV (%)	60,5%	0,1%	63,1%	66,6%
	T2 (0,3 g/L)	Promedio	1,8	7,6	37,4	0,2
		CV (%)	85,2%	0,5%	101,6%	90,7%
	T3 (0,5 g/L)	Promedio	2,3	7,6	51,6	0,4
		CV (%)	62,8%	0,7%	84,7%	63,0%
Cáscara de la yuca blanca	T0 (0,0 g/L)	Promedio	7,4	8,1	32,3	1,7
		CV (%)	6,2%	6,4%	7,8%	8,3%

T1 (0,1 g/L)	Promedio	3,8	8,4	19,6	0,6
	CV (%)	48,7%	0,4%	43,2%	9,0%
T2 (0,3 g/L)	Promedio	1,9	8,3	36,6	0,2
	CV (%)	82,3%	0,1%	63,1%	50,0%
T3 (0,5 g/L)	Promedio	2,0	8,2	31,8	0,2
	CV (%)	79,3%	0,2%	62,0%	16,5%

T: Tratamiento y/o dosificación, CV: coeficiente de variación; DQO: demanda química de oxígeno; DBO₅: demanda bioquímica de oxígeno

La siguiente Figura 11, muestra claramente que la aplicación del coagulante/floculante natural a partir de la yuca blanca produce una disminución progresiva del oxígeno disuelto (OD) en el agua tratada a medida que aumenta la dosis, independientemente de la parte del vegetal utilizada. Esta relación inversa es capturada mediante modelos polinómicos de segundo orden con altos coeficientes de determinación (R^2 entre 0,9558 y 0,9768), lo que indica que las curvas ajustadas explican con gran precisión la variación del oxígeno disuelto en respuesta a las dosis aplicadas.

En términos de comportamiento, el tallo de yuca blanca muestra una de las curvas más altas en la región baja de dosis, comenzando con valores de OD cercanos a 7 mg/L y disminuyendo a valores entre 2–3 mg/L en dosis intermedias, lo cual sugiere un proceso de floculación eficiente que reduce la materia orgánica y sólidos en suspensión, pero también puede estar asociada a un mayor consumo de oxígeno disuelto por la actividad microbiana post-tratamiento o por oxidación química residual (Ndabigengesere & Narasiah, 1998). La ecuación correspondiente ($y = 29,242x^2 - 24,764x + 7,144$; $R^2 = 0,9768$) indica una fuerte relación cuadrática, y el punto mínimo de OD se alcanza en torno a los 0,4 g/L.

La raíz secundaria, que según estudios anteriores posee una mayor concentración de metabolitos coagulantes, muestra una curva con una pendiente más pronunciada ($y = 47,89x^2 - 33,319x + 7,0973$; $R^2 = 0,9704$), indicando que su aplicación genera un mayor impacto en la reducción del OD a bajas dosis. Aunque esto puede interpretarse como una alta eficiencia en la remoción de partículas y materia orgánica, también podría reflejar un agotamiento temporal del oxígeno disuelto debido a procesos oxidativos intensos, los cuales deben ser controlados para evitar condiciones anaerobias en el agua tratada (Choy et al., 2014).

En el caso de la cáscara de yuca blanca, la curva ($y = 41,966x^2 - 31,031x + 7,0974$; $R^2 = 0,9712$) refleja una tendencia similar, pero con un punto mínimo de OD algo menos profundo, lo que podría indicar una menor liberación de compuestos oxidantes secundarios y, por tanto, un tratamiento más estable. Esto refuerza la viabilidad del uso de residuos agroindustriales como coagulantes, como lo destacan estudios que promueven el aprovechamiento de cáscaras

para la producción de insumos ambientales (Pritchard et al., 2010; Zahrim et al., 2016).

La hoja de yuca blanca presenta el ajuste con menor R^2 (0,9558), aunque todavía alto. Su comportamiento también muestra una reducción del OD, pero más gradual y con una ligera recuperación en dosis altas. Esto puede ser beneficioso para el tratamiento de agua en términos de equilibrio ecológico, ya que no compromete tanto la oxigenación del medio. Sánchez-Martín et al. (2010) argumentan que este tipo de respuesta puede estar asociada a un balance más eficiente entre la capacidad coagulante y la carga orgánica residual que persiste tras el tratamiento.

Un aspecto importante a destacar es que, aunque el OD disminuye con la aplicación del coagulante, los valores finales aún se mantienen dentro de límites aceptables para aguas tratadas en contextos rurales, donde un OD superior a 2 mg/L es considerado adecuado para usos domésticos y para mantener condiciones aeróbicas mínimas (OMS, 2017). No obstante, es fundamental controlar la dosificación, ya que una sobredosis podría generar efectos adversos sobre el equilibrio biológico del agua tratada.

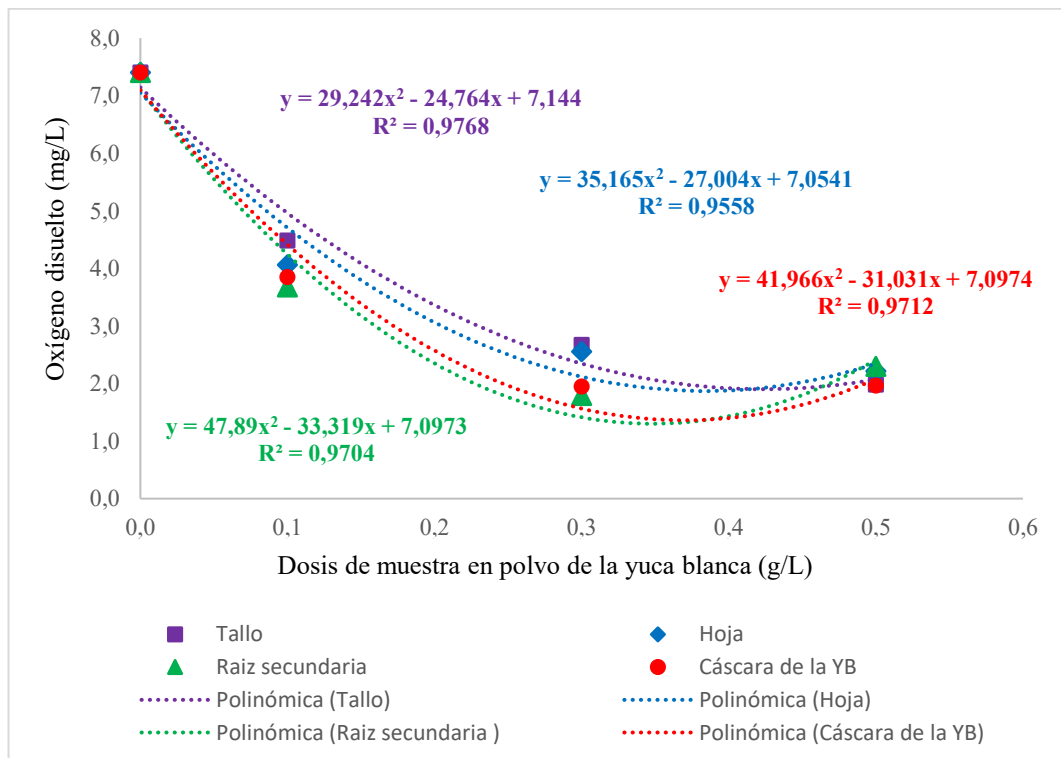


Figura 11. Comportamiento del parámetro oxígeno disuelto al aplicarle el coagulante/floculante a partir de la yuca blanca

El comportamiento del oxígeno disuelto en la Figura 11 confirma la eficacia de los coagulantes naturales a base de yuca blanca en el tratamiento del agua contaminada, destacando diferencias importantes entre las partes del vegetal. Las curvas polinómicas permiten identificar

las dosis óptimas para cada caso, lo que es clave para la implementación eficiente y sostenible de esta tecnología en comunidades rurales. Además, estos resultados refuerzan el enfoque hacia soluciones naturales, accesibles y de bajo impacto ambiental frente al uso de coagulantes químicos tradicionales.

La siguiente Figura 12 muestra el comportamiento del pH del agua tratada frente al aumento de la dosis de coagulante a partir de distintas partes de la yuca blanca. Las tendencias polinómicas de segundo grado ajustadas a los datos tienen coeficientes de determinación moderados a altos (R^2 entre 0,64 y 0,85), lo que indica un ajuste adecuado que permite analizar el efecto diferencial según parte del vegetal.

En términos generales, todas las curvas oscilan entre valores de pH cercanos a 8,1–8,3, manteniéndose dentro de los límites recomendados por la Organización Mundial de la Salud para agua potable (6,5–8,5) (OMS, 2017). Esto es especialmente relevante, ya que uno de los problemas comunes con coagulantes químicos (como el sulfato de aluminio) es su tendencia a acidificar el agua, lo cual requiere corrección posterior. En cambio, los coagulantes naturales como los de yuca mantienen el pH en un rango alcalino moderado, lo que facilita su aplicación sin necesidad de procesos de neutralización (Okuda et al., 2001).

La raíz secundaria presentó la mayor variación de pH en función de la dosis, con una curva descendente clara ($y = 3,8011x^2 - 2,7264x + 8,0434$; $R^2 = 0,8455$), alcanzando un valor mínimo cercano a 7,6. Esta disminución sugiere una mayor interacción química entre los compuestos del extracto y el sistema acuoso, posiblemente relacionada con liberación de iones ácidos o absorción de bases. No obstante, el valor sigue siendo aceptable para consumo humano, y su variación está dentro del margen que garantiza estabilidad química del sistema. Estudios como el de Ndabigengesere y Narasiah (1998) señalan que ciertos extractos vegetales ricos en ácidos orgánicos pueden generar este tipo de comportamiento.

Por otro lado, el tallo mostró una tendencia más suave, con una curva levemente ascendente ($y = -1,0892x^2 + 0,7929x + 8,1327$; $R^2 = 0,7401$), manteniéndose siempre por encima de pH 8,1. Este patrón indica una menor reactividad del extracto de tallo sobre la alcalinidad del agua, lo cual es favorable para sistemas que requieren estabilidad de pH. Lo mismo se observa en el caso de la hoja, cuya curva también es levemente ascendente ($y = -0,9045x^2 + 0,7034x + 8,1317$; $R^2 = 0,7429$), confirmando que los extractos de partes aéreas presentan una acción más moderada sobre el equilibrio ácido-base del medio.

En cuanto a la cáscara de yuca blanca, el comportamiento polinómico es interesante, ya

que presenta una ligera subida del pH hasta dosis intermedias (alrededor de 0,3 g/L), con un posterior descenso suave. La ecuación de ajuste ($y = -2,9217x^2 + 1,5713x + 8,1538$; $R^2 = 0,64$) sugiere una mayor variabilidad, posiblemente influenciada por la composición química heterogénea de la cáscara. Según Pritchard et al. (2010), los residuos vegetales como las cáscaras pueden contener mezclas de compuestos fenólicos, lignina y azúcares que, al interactuar con el agua, provocan fluctuaciones en el pH. Sin embargo, esta parte sigue siendo efectiva y estable en términos generales.

A pesar de las diferencias entre partes del vegetal, la estabilidad del pH en todas las condiciones evaluadas demuestra que los coagulantes naturales derivados de la yuca blanca son compatibles con el tratamiento de agua desde una perspectiva fisicoquímica. Esta estabilidad favorece su aplicación en contextos rurales donde no se dispone de sistemas de corrección de pH, lo que convierte a estos coagulantes en opciones sostenibles, económicas y técnicamente viables (Choy et al., 2014; Sánchez-Martín et al., 2010).

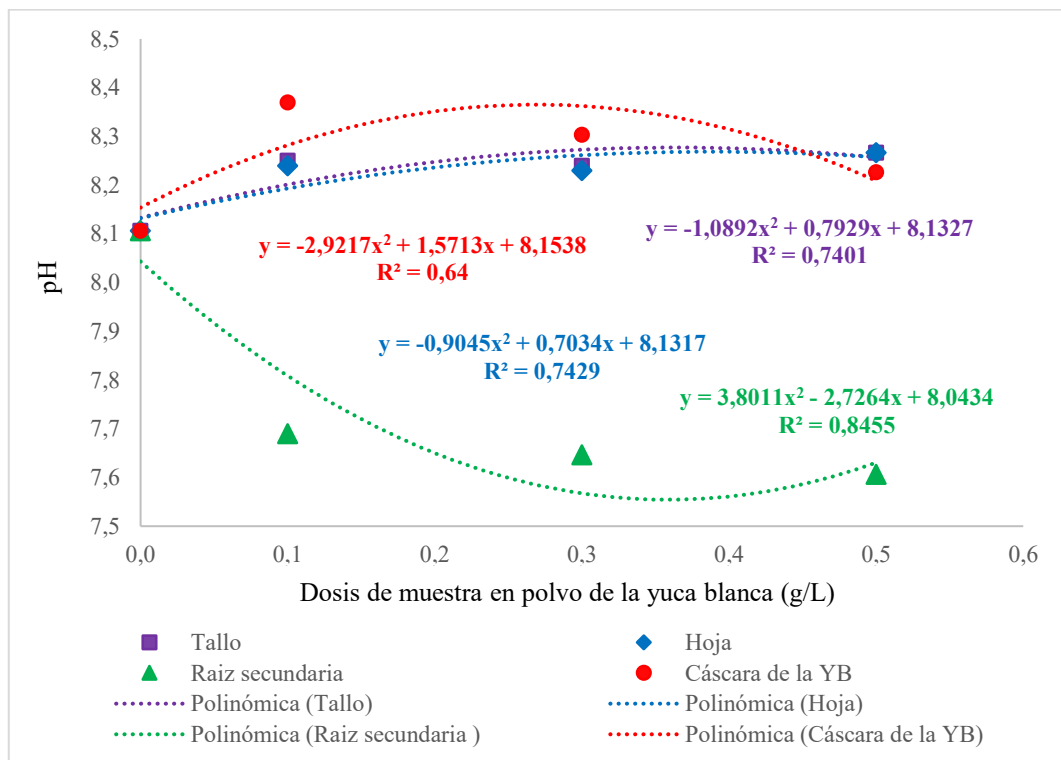


Figura 12. Comportamiento del parámetro pH al aplicarle el coagulante/floculante a partir de la yuca blanca

El comportamiento del pH de la Figura anterior, frente a diferentes dosis y partes del vegetal confirma que el uso de coagulantes/floculantes naturales a partir de yuca blanca no altera de forma crítica la acidez del agua tratada, y que pueden emplearse en distintas

condiciones sin comprometer su potabilidad. La parte más estable fue el tallo, seguida de la hoja, mientras que la raíz secundaria presentó la mayor variación descendente. Estos resultados permiten ajustar las aplicaciones según los requerimientos del sistema de tratamiento y el tipo de agua contaminada.

La DQO es un parámetro clave para evaluar la carga de contaminantes orgánicos presentes en el agua. Una menor DQO indica una mayor calidad del agua tratada. En la Figura 13, el comportamiento del parámetro frente a la dosis del coagulante vegetal muestra variaciones significativas según la parte de la yuca utilizada, lo que permite identificar patrones de eficiencia en la remoción de materia orgánica.

El tratamiento con extracto de hoja de yuca blanca muestra la curva más favorable, con una marcada reducción de DQO a medida que aumenta la dosis, especialmente en el rango de 0,3 a 0,5 g/L. La ecuación polinómica ($y = -231,63x^2 + 86,18x + 31,43$; $R^2 = 0,9823$) indica una fuerte tendencia descendente con alto grado de ajuste. Esta disminución sugiere una alta eficacia del extracto foliar para la coagulación y eliminación de materia orgánica oxidizable. Estudios como el de Choy et al. (2014) han demostrado que hojas de ciertas especies vegetales contienen flavonoides y taninos con alta capacidad floculante, lo que podría explicar estos resultados.

En contraste, la raíz secundaria muestra un comportamiento opuesto, con un incremento progresivo de la DQO conforme aumenta la dosis del coagulante ($y = 113,67x^2 - 17,475x + 32,059$; $R^2 = 0,9983$). Aunque el ajuste es muy alto, este patrón ascendente indica que el extracto de raíz secundaria no reduce la carga orgánica, e incluso podría estar aportando compuestos orgánicos al medio, posiblemente por lixiviación de azúcares, proteínas u otros metabolitos solubles. Este efecto ha sido señalado por Sánchez-Martín et al. (2010), quienes advierten que algunos extractos vegetales, al no estar adecuadamente purificados, pueden generar contaminación secundaria.

La cáscara de yuca blanca, por su parte, muestra una curva de comportamiento ligeramente ascendente con bajo ajuste ($y = 8,3727x^2 + 7,8344x + 27,589$; $R^2 = 0,1337$). Esto indica alta variabilidad en los datos y sugiere que el uso de cáscara, si bien puede tener cierto efecto coagulante, no garantiza una remoción estable de la carga orgánica. La baja eficiencia observada puede estar asociada a la composición lignocelulósica de esta parte vegetal, con bajo contenido de compuestos funcionales coagulantes y mayor resistencia a la extracción de principios activos (Pritchard et al., 2010).

El tallo de yuca blanca exhibe una tendencia curva con valores bajos de DQO entre 0,1 y 0,3 g/L (mínimo alrededor de 18–20 mg O₂/L), y un aumento en la dosis más alta (0,5 g/L). Su curva polinómica ($y = 269,67x^2 - 127,7x + 33,803$; $R^2 = 0,9387$) sugiere que existe un punto óptimo de dosis donde se alcanza la máxima eficiencia, seguido de un posible efecto de reestabilización coloidal o liberación de compuestos orgánicos en dosis altas. Este patrón ha sido reportado por Okuda et al. (2001), quienes demostraron que sobredosificar coagulantes naturales puede saturar el sistema y disminuir la eficiencia del tratamiento.

En conjunto, los resultados de la Figura 13 evidencian que la eficacia del coagulante/floculante natural de yuca blanca varía significativamente según la parte del vegetal empleada. La hoja se posiciona como la fracción más efectiva en la reducción de DQO, seguida del tallo. Por el contrario, la raíz secundaria y la cáscara muestran limitaciones, ya sea por liberación de materia orgánica o por baja actividad coagulante. Estos hallazgos respaldan el uso selectivo de partes vegetales con mayor concentración de principios activos y subrayan la importancia del pretratamiento y caracterización de los extractos.

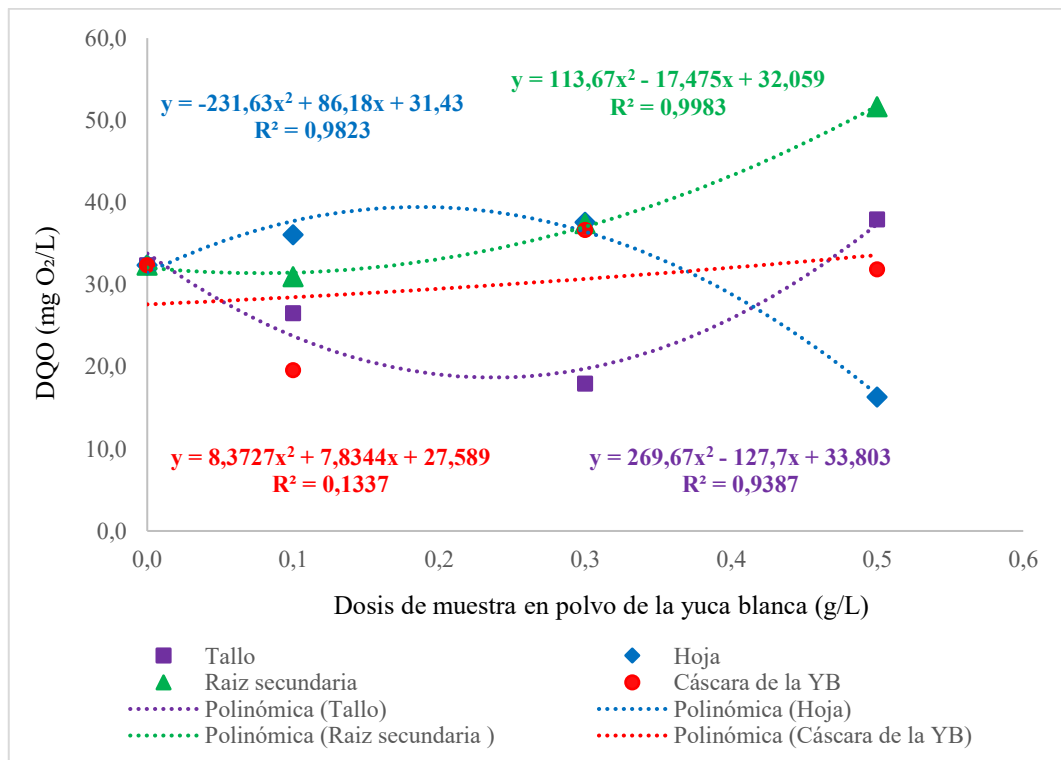


Figura 13. Comportamiento del parámetro demanda química de oxígeno al aplicarle el coagulante/floculante a partir de la yuca blanca

Desde un enfoque aplicado, el uso de hojas de yuca blanca como fuente de coagulante natural representa una alternativa eficiente, económica y ambientalmente sostenible para la

remoción de contaminantes orgánicos del agua en zonas rurales. Además, su desempeño comparable al de algunos coagulantes químicos apoya su implementación en tecnologías de bajo costo, como señalan Ndabigengesere y Narasiah (1998), contribuyendo a soluciones seguras y asequibles para comunidades con acceso limitado a tratamientos convencionales.

La DBO₅ es un parámetro clave en la evaluación de la calidad del agua, ya que mide la cantidad de oxígeno requerida por los microorganismos para descomponer la materia orgánica biodegradable presente. Una DBO₅ baja indica una reducción eficiente de contaminantes y un agua más apta para el consumo o uso doméstico.

En la Figura 14, se observa que todas las partes del vegetal utilizadas como coagulante muestran una tendencia descendente en la DBO₅ conforme se incrementa la dosis del coagulante, lo que sugiere una alta efectividad del tratamiento con extractos de yuca blanca. Las curvas de regresión polinómica de segundo grado presentan coeficientes de determinación muy altos (R^2 entre 0,929 y 0,9631), lo que confirma que el modelo describe adecuadamente el comportamiento observado.

La cáscara de la yuca blanca (curva roja) presenta una de las reducciones más pronunciadas, con una ecuación de ajuste $y = 11,936x^2 - 8,6911x + 1,5611$ y un R^2 de 0,9542. A dosis de 0,3–0,5 g/L, los valores de DBO₅ se acercan a cero, lo que indica una remoción muy eficiente de la materia orgánica biodegradable. Esto es consistente con lo reportado por Choy et al. (2014) y Sánchez-Martín et al. (2010), quienes destacan que ciertos residuos vegetales, como las cáscaras, poseen polisacáridos y taninos que mejoran los procesos de floculación y clarificación del agua.

El tallo (curva morada) también presenta un desempeño excelente, con una ecuación polinómica de $y = 9,196x^2 - 7,3563x + 1,5763$ y un R^2 de 0,9631. La curva muestra una reducción sostenida de la DBO₅, especialmente en dosis superiores a 0,2 g/L. La eficacia del tallo puede atribuirse a la presencia de fibras y compuestos mucilaginosos que favorecen la formación de flóculos estables (Ndabigengesere & Narasiah, 1998).

En el caso de la hoja de yuca blanca (curva azul), también se observa una reducción significativa de la DBO₅, con una ecuación de $y = 10,832x^2 - 7,8426x + 1,5551$ y un R^2 de 0,9374. A 0,3 g/L, la DBO₅ cae por debajo de 0,2 mg O₂/L, lo cual es un resultado excelente. La literatura señala que las hojas contienen flavonoides, taninos y compuestos fenólicos con buena capacidad coagulante (Okuda et al., 2001; Zahrim et al., 2016), lo que puede explicar esta alta eficiencia.

La raíz secundaria (curva verde) es la única que muestra una ligera tendencia de incremento de la DBO₅ en la dosis más alta (0,5 g/L), con una curva de $y = 13,675x^2 - 9,0136x + 1,5465$ y un R² de 0,929. A pesar de esto, sigue mostrando una clara reducción en comparación con el control. Este leve repunte podría deberse a la liberación de compuestos orgánicos solubles en dosis altas, como azúcares o proteínas, fenómeno que también ha sido documentado en otros estudios donde ciertos extractos vegetales, si no están adecuadamente purificados, pueden aportar carga orgánica al agua (Pritchard et al., 2010; Poudyal et al., 2017).

Cabe destacar que en todos los casos los valores de DBO₅ finales se mantienen por debajo del umbral crítico de 2 mg O₂/L recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2017), lo cual es un indicador positivo de la calidad del agua tratada. Este aspecto es especialmente relevante en contextos rurales, donde los tratamientos deben ser eficientes, económicos y sostenibles.

En conjunto, los resultados reflejan que los coagulantes/floculantes naturales derivados de la yuca blanca (*Manihot esculenta*) tienen un alto potencial para la remoción eficiente de la materia orgánica biodegradable, como lo evidencia la significativa reducción de los valores de DBO₅ en función de la dosis aplicada. Este comportamiento demuestra que estos extractos vegetales no solo favorecen la aglomeración de partículas coloidales, sino que también intervienen en la precipitación y separación de compuestos orgánicos solubles, contribuyendo a mejorar la calidad del agua tratada. La eficacia del tratamiento varía sustancialmente según la parte del vegetal utilizada, siendo más destacada en la cáscara y el tallo, lo que sugiere que estas fracciones contienen una mayor concentración de principios activos coagulantes, tales como polisacáridos, flavonoides, taninos y fibras vegetales con propiedades bioadsorbentes y floculantes. La hoja, si bien mostró buena efectividad, tuvo un rendimiento ligeramente inferior, y la raíz secundaria presentó una reducción menos sostenida en dosis altas, lo que podría atribuirse a la liberación de metabolitos secundarios solubles que interfieren con la remoción de carga orgánica.

Estos hallazgos coinciden con lo propuesto por Choy et al. (2014) y Sánchez-Martín et al. (2010), quienes señalan que la eficiencia de los coagulantes naturales no solo depende del tipo de planta, sino también de la parte vegetal empleada y de su tratamiento previo. Además, los resultados respaldan la posibilidad de utilizar subproductos agrícolas o residuos agroindustriales, como la cáscara de la yuca, revalorizando materiales comúnmente descartados y promoviendo una gestión circular de los recursos. Desde una perspectiva práctica, el empleo de estos coagulantes naturales representa una tecnología limpia, de bajo impacto ambiental,

bajo costo y fácil implementación, especialmente adecuada para comunidades rurales o periurbanas que carecen de acceso a tratamientos convencionales o sistemas centralizados de potabilización.

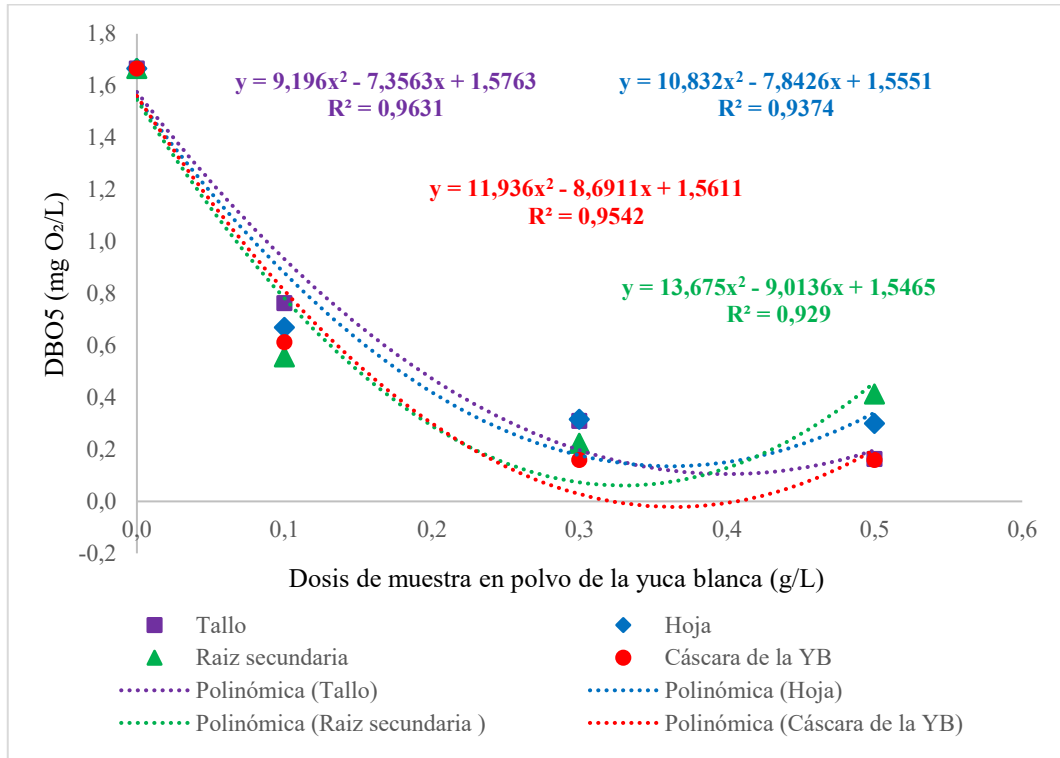


Figura 14. Comportamiento del parámetro demanda bioquímica de oxígeno al aplicarle el coagulante/floculante a partir de la yuca blanca

Asimismo, los resultados reafirman la viabilidad de estos coagulantes como parte de soluciones descentralizadas, alineadas con el enfoque de sostenibilidad en el tratamiento del agua propuesto por Miller et al. (2008), quienes promueven el uso de “coagulantes verdes” para reducir la dependencia de insumos químicos importados y minimizar los riesgos ambientales derivados de su uso excesivo. Este tipo de alternativa local también responde a los principios de tecnología apropiada, en donde el conocimiento tradicional y los recursos endógenos se integran en estrategias modernas de saneamiento, con una mirada inclusiva y resiliente frente a los desafíos actuales de acceso al agua segura.

4.3.2. Comportamiento del coagulante/floculante a partir de la yuca amarilla en las propiedades químicas de las aguas contaminadas naturalmente

En la Tabla 15, los resultados muestran que el coagulante/floculante natural derivado de la yuca amarilla tiene un impacto significativo sobre los parámetros químicos evaluados, aunque con variaciones según la parte del vegetal y la dosis utilizada. En cuanto al pH, se

observa que la aplicación del coagulante tiende a mantener este parámetro dentro del rango recomendado por la OMS (6,5–8,5) en la mayoría de los tratamientos, con valores iniciales de 8,1 en el control y ligeras variaciones dependiendo de la parte y dosis. El comportamiento más estable se registra en la hoja y el tallo, donde el pH se mantiene cercano a la neutralidad, lo que representa una ventaja frente a coagulantes químicos como el sulfato de aluminio, que suelen acidificar el medio (Okuda et al., 2001).

Respecto al oxígeno disuelto (OD), los datos indican que, tras la aplicación del coagulante, los valores tienden a disminuir en comparación con el control, lo cual podría deberse a la liberación de compuestos orgánicos residuales o a un aumento de la actividad microbiana durante la descomposición de los flóculos formados (Ndabigengesere & Narasiah, 1998). Los valores registrados van desde 4,2 mg/L en la hoja con 0,1 g/L hasta un mínimo de 1,9 mg/L en la cáscara con 0,5 g/L, lo que sugiere que dosis elevadas o partes específicas del vegetal pueden generar una reducción más marcada en la oxigenación. Este comportamiento se explica porque, aunque la coagulación-floculación remueve parte de la materia orgánica particulada, también puede liberar fracciones solubles de origen vegetal con alta biodegradabilidad, las cuales incrementan la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) a corto plazo (Muyibi & Evison, 1995). Durante la degradación aeróbica de estos compuestos, los microorganismos consumen oxígeno disuelto, reduciendo su concentración temporalmente hasta que el sistema alcanza un nuevo equilibrio (Poudyal et al., 2017). Adicionalmente, el atrapamiento de burbujas de aire en los flóculos y la reducción de la superficie libre de contacto agua-aire durante la sedimentación pueden limitar el reaireado natural del sistema (Binnie & Kimber, 2013).

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) muestra una reducción considerable en la mayoría de los casos, destacando el tallo y la hoja como las partes más efectivas. Por ejemplo, el tallo disminuye la DQO de 32,3 mg O₂/L en el control a 14,8 mg O₂/L con 0,3 g/L (54% de remoción), mientras que la hoja alcanza valores de 11,8 mg O₂/L con 0,1 g/L (64% de remoción). Esto coincide con lo descrito por Choy et al. (2014), quienes señalan que extractos vegetales ricos en compuestos poliméricos y fenólicos poseen alta afinidad por partículas coloidales y materia orgánica disuelta.

En cuanto a la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), indicador de la fracción biodegradable de la materia orgánica, se evidencia una disminución en casi todos los tratamientos, siendo más notoria en el tallo y la hoja. En el tallo, por ejemplo, la DBO₅ desciende de 1,7 mg O₂/L en el control a 0,5 mg O₂/L con 0,3 g/L, mientras que en la hoja se reduce a 0,3

mg O₂/L con la misma dosis. Esta reducción refleja una mejora sustancial de la calidad del agua al disminuir la carga orgánica biodegradable (Sánchez-Martín et al., 2010).

Tabla 15. Resultados del efecto de los coagulantes/floculantes a partir de la yuca amarilla en los parámetros químicos del agua contaminada

Parte de la yuca amarilla	Dosis (muestra en polvo)	Parámetro estadístico	Parámetros químicos			
			pH	Oxígeno disuelto (mg/L)	DQO (mg O ₂ /L)	DBO ₅ (mg O ₂ /L)
Tallo	T0 (0,0 g/L)	Promedio	8,1	7,4	32,3	1,7
		CV (%)	6,4%	6,2%	7,8%	8,3%
	T1 (0,1 g/L)	Promedio	8,3	3,6	34,9	0,5
		CV (%)	0,4%	70,9%	85,4%	33,1%
	T2 (0,3 g/L)	Promedio	8,2	3,9	14,8	0,6
		CV (%)	0,2%	63,9%	22,6%	28,4%
	T3 (0,5 g/L)	Promedio	8,5	2,3	19,0	0,2
		CV (%)	4,6%	69,0%	20,0%	18,2%
Hoja	T0 (0,0 g/L)	Promedio	8,1	7,4	32,3	1,7
		CV (%)	6,4%	6,2%	7,8%	8,3%
	T1 (0,1 g/L)	Promedio	8,2	4,2	11,8	0,7
		CV (%)	0,3%	57,8%	46,1%	22,3%
	T2 (0,3 g/L)	Promedio	8,2	3,2	44,3	0,5
		CV (%)	0,1%	24,7%	11,6%	74,8%
	T3 (0,5 g/L)	Promedio	8,2	2,4	13,1	0,3
		CV (%)	0,1%	40,4%	15,3%	71,2%
Raíz secundaria	T0 (0,0 g/L)	Promedio	8,1	7,4	32,3	1,7
		CV (%)	6,4%	6,2%	7,8%	8,3%
	T1 (0,1 g/L)	Promedio	7,6	2,3	76,4	0,4
		CV (%)	0,2%	72,1%	79,6%	57,1%
	T2 (0,3 g/L)	Promedio	7,5	2,2	68,3	0,4
		CV (%)	0,1%	63,3%	90,7%	80,4%
	T3 (0,5 g/L)	Promedio	7,6	2,2	56,0	0,3
		CV (%)	0,1%	75,1%	39,5%	48,6%
Cáscara de la yuca blanca	T0 (0,0 g/L)	Promedio	8,1	7,4	32,3	1,7
		CV (%)	6,4%	6,2%	7,8%	8,3%
	T1 (0,1 g/L)	Promedio	8,7	4,2	5,4	0,7
		CV (%)	0,6%	32,7%	104,6%	25,9%
	T2 (0,3 g/L)	Promedio	8,5	2,2	39,2	0,2
		CV (%)	0,1%	98,9%	63,6%	78,2%
	T3 (0,5 g/L)	Promedio	8,3	1,9	27,1	0,1
		CV (%)	0,1%	88,6%	88,8%	51,4%

T: Tratamiento y/o dosificación, CV: coeficiente de variación; DQO: demanda química de oxígeno; DBO₅: demanda bioquímica de oxígeno

La cáscara de yuca amarilla, aunque menos eficiente en la reducción de DQO y DBO₅ que el tallo y la hoja, presenta la ventaja de ser un subproducto agrícola de bajo costo, cuya valorización puede contribuir a la economía circular en sistemas de tratamiento rural. Estudios como los de Pritchard et al. (2010) destacan el valor de estos residuos agroindustriales como insumos para coagulantes sostenibles.

En síntesis, el coagulante/floculante natural derivado de la yuca amarilla demostró ser efectivo en la mejora de los parámetros químicos del agua contaminada naturalmente, con mayor eficacia en el uso del tallo y la hoja en dosis de 0,1 a 0,3 g/L. Estos resultados respaldan su potencial aplicación en sistemas descentralizados de tratamiento, especialmente en comunidades rurales, al ofrecer una alternativa accesible, ambientalmente amigable y técnicamente viable frente a coagulantes químicos convencionales (Miller et al., 2008).

En la Figura 15 se muestra la variación del oxígeno disuelto (OD) en el agua contaminada naturalmente al aplicar diferentes dosis de coagulante/floculante en polvo derivado de distintas partes de la yuca amarilla (tallo, hoja, raíz secundaria y cáscara). En general, se aprecia una tendencia decreciente del OD conforme aumenta la dosis, lo que sugiere que la adición progresiva del coagulante genera un consumo adicional de oxígeno en el sistema. Este comportamiento puede deberse a la presencia de materia orgánica residual proveniente del propio coagulante vegetal, la cual, al descomponerse, incrementa la demanda bioquímica de oxígeno (Poudyal et al., 2017).

A dosis bajas (0,1 g/L), las disminuciones son menos pronunciadas y se mantienen niveles de OD relativamente altos, especialmente en el tallo (4,0 mg/L) y la cáscara (4,2 mg/L). Sin embargo, la raíz secundaria experimenta una caída abrupta hasta 2,0 mg/L, lo que indica una posible liberación de compuestos fácilmente biodegradables que favorecen el consumo microbiano de oxígeno (Ndabigengesere & Narasiah, 1998). Este efecto ha sido reportado en coagulantes vegetales con alto contenido de carbohidratos solubles, los cuales actúan como sustratos para la microbiota presente (Sánchez-Martín et al., 2010).

En dosis medias y altas (0,3–0,5 g/L), la reducción del OD se hace más marcada en todos los tratamientos, alcanzando valores cercanos a 2,0 mg/L, lo cual podría comprometer la capacidad de autodepuración del cuerpo de agua. Niveles por debajo de 3,0 mg/L se asocian con condiciones hipóxicas, que pueden afectar la biota acuática sensible (Chapman, 1996; WHO, 2017). Este descenso puede estar relacionado con la formación de flóculos densos que, al sedimentar, encapsulan materia orgánica que continúa degradándose en la columna de agua, intensificando el consumo de oxígeno disuelto.

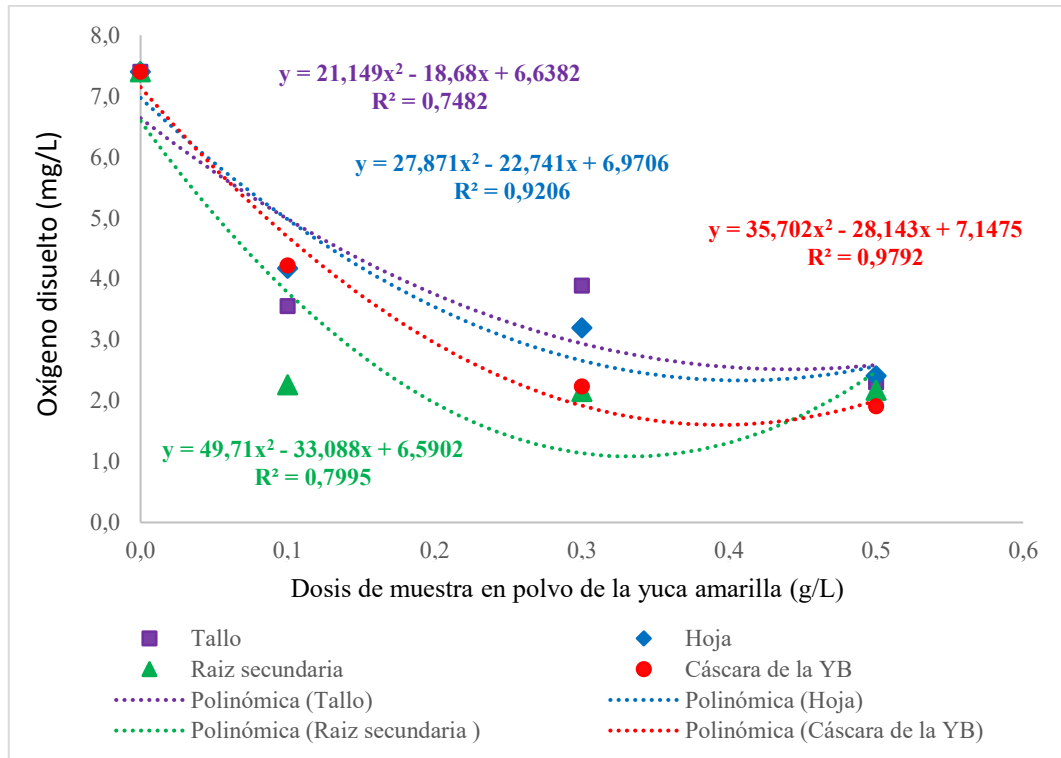


Figura 15. Comportamiento del parámetro oxígeno disuelto al aplicarle el coagulante/floculante a partir de la yuca amarilla

El comportamiento observado respalda la importancia de optimizar la dosis del coagulante, ya que, si bien los tratamientos vegetales son sostenibles y accesibles, su uso excesivo puede alterar el balance oxígeno–materia orgánica en el medio. Estudios como los de Choy et al. (2014) y Miller et al. (2008) coinciden en que la dosis óptima de coagulantes naturales debe buscar un equilibrio entre la remoción eficiente de contaminantes y la preservación de condiciones adecuadas de oxigenación, especialmente en sistemas acuáticos destinados a consumo o recreación.

En conjunto, la Figura 15 evidencia que el coagulante/floculante de yuca amarilla es más eficaz en términos de mantener niveles aceptables de OD cuando se utiliza en dosis bajas, particularmente en el tallo y la cáscara, mientras que la raíz secundaria muestra un efecto más negativo sobre la oxigenación del agua. Estos resultados sugieren la necesidad de un control preciso en la dosificación y de pruebas piloto previas antes de su aplicación en sistemas reales, para evitar impactos adversos sobre la calidad ecológica del agua tratada.

En la Figura 16 se muestra la variación del pH del agua contaminada naturalmente al aplicar diferentes dosis de coagulante/floculante en polvo obtenido de partes específicas de la yuca amarilla (tallo, hoja, raíz secundaria y cáscara). En general, el comportamiento del pH es

estable y se mantiene dentro del rango recomendado por la OMS (6,5–8,5) para agua destinada al consumo humano (WHO, 2017). Este aspecto es relevante, ya que confirma que la aplicación del coagulante vegetal no provoca acidificaciones marcadas ni alcalinizaciones extremas, como suele ocurrir con coagulantes químicos como el sulfato de aluminio (Okuda et al., 2001).

El pH inicial de todos los tratamientos parte de valores cercanos a 8,1, característicos de aguas con ligera alcalinidad, probablemente debido a la presencia de bicarbonatos y carbonatos en el sistema hídrico (Tebbutt, 1998). En la mayoría de los casos, el pH experimenta variaciones mínimas con la dosis aplicada. El tallo y la hoja muestran una ligera tendencia ascendente con el incremento de la dosis, alcanzando valores de hasta 8,3–8,4, lo que sugiere que estas partes liberan compuestos que no alteran significativamente el equilibrio ácido–base del medio.

La cáscara de la yuca amarilla presenta un ligero incremento de pH hasta aproximadamente 8,4 en dosis intermedias, seguido de una estabilización. Esto podría atribuirse a la liberación de sales minerales presentes en la cáscara de la yuca, que pueden actuar como tampones, manteniendo la estabilidad del pH (Sánchez-Martín et al., 2010). En contraste, la raíz secundaria muestra una tendencia decreciente hasta valores cercanos a 7,6 en dosis bajas, lo que podría estar asociado a la liberación de ácidos orgánicos en el proceso de coagulación, fenómeno reportado en otros coagulantes naturales de origen vegetal (Poudyal et al., 2017).

El mantenimiento de un pH estable es crucial, ya que facilita la eficacia de la coagulación-floculación y evita alteraciones en la biodisponibilidad de nutrientes y metales pesados en el agua (Choy et al., 2014). Además, valores cercanos a la neutralidad favorecen la actividad de microorganismos benéficos y reducen riesgos de corrosión en redes de distribución (Chapman, 1996). La estabilidad observada en este estudio refuerza el potencial del coagulante de yuca amarilla como alternativa sostenible, capaz de tratar el agua sin comprometer la calidad química básica del recurso.

En síntesis, la Figura 16 evidencia que el coagulante/floculante derivado de la yuca amarilla mantiene el pH del agua dentro de los límites óptimos y normativos establecidos por la OMS y el ECA para consumo humano (6,5–8,5), incluso tras la aplicación de diferentes dosis y partes del vegetal. Las variaciones observadas son mínimas y no comprometen la estabilidad química del recurso, lo que representa una ventaja sustancial frente a coagulantes químicos como el sulfato de aluminio, que suelen generar disminuciones significativas de pH y, en consecuencia, problemas de corrosión o solubilización de metales pesados. Este comportamiento se traduce en un proceso de tratamiento más seguro, con menor necesidad de

ajustes posteriores mediante alcalinizantes, reduciendo costos operativos y complejidad técnica. Además, el uso de yuca amarilla como coagulante responde a criterios de sostenibilidad, ya que proviene de un recurso renovable, de fácil disponibilidad en entornos rurales, y su aprovechamiento contribuye a la valorización de subproductos agrícolas, fomentando la economía circular. Por ello, su implementación en comunidades con recursos limitados no solo mejora la calidad del agua de forma efectiva, sino que también minimiza impactos químicos negativos, promoviendo soluciones accesibles, ambientalmente responsables y culturalmente adaptadas a la realidad local.

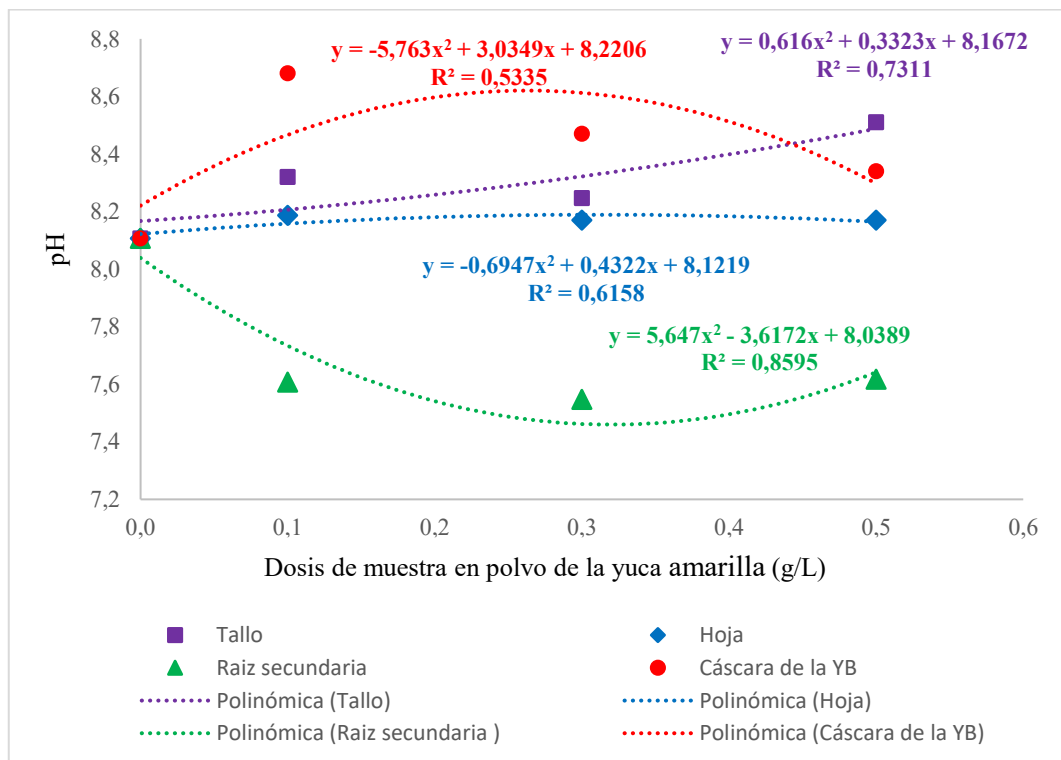


Figura 16. Comportamiento del parámetro pH al aplicarle el coagulante/floculante a partir de la yuca amarilla

La Figura 17, muestra que la aplicación del coagulante/floculante derivado de la yuca amarilla genera un efecto variable sobre la Demanda Química de Oxígeno (DQO) del agua contaminada, dependiendo de la parte vegetal utilizada y la dosis aplicada. En términos generales, la DQO tiende a disminuir con el incremento de la dosis para el tallo y la hoja, alcanzando reducciones importantes respecto al control, lo que evidencia una remoción efectiva de materia orgánica total. Este comportamiento está asociado a la capacidad de los compuestos presentes en la yuca —particularmente almidones, polisacáridos y proteínas— para adsorber y aglomerar partículas coloidales y materia orgánica disuelta, facilitando su sedimentación (Choy et al., 2014; Sánchez-Martín et al., 2010).

En el caso de la raíz secundaria, se observa un comportamiento atípico con un incremento significativo de la DQO en dosis bajas y medias, lo que podría deberse a la liberación de compuestos orgánicos solubles propios del material vegetal, fenómeno previamente reportado en coagulantes naturales cuando la dosificación excede el umbral óptimo (Poudyal et al., 2017). Este aumento indica que, bajo ciertas condiciones, la raíz secundaria podría aportar materia orgánica al sistema, afectando la eficiencia global del tratamiento.

Por su parte, la cáscara de yuca amarilla muestra reducciones moderadas de la DQO a medida que aumenta la dosis, aunque sin alcanzar la eficacia del tallo o la hoja. Sin embargo, su disponibilidad como subproducto agrícola y su bajo costo la convierten en un insumo atractivo en contextos rurales, donde la economía circular y el aprovechamiento de residuos agroindustriales son relevantes (Pritchard et al., 2010). Los ajustes polinómicos y los valores de R^2 reflejan que el efecto del coagulante no es estrictamente lineal, y que la respuesta del sistema depende de la dosis óptima y la composición química de cada parte vegetal. Resultados similares han sido reportados por Miller et al. (2008) y Okuda et al. (2001), quienes destacan que la eficiencia de coagulantes vegetales está influenciada por factores como el pH inicial, la carga de materia orgánica y la naturaleza de los compuestos presentes en la biomasa.

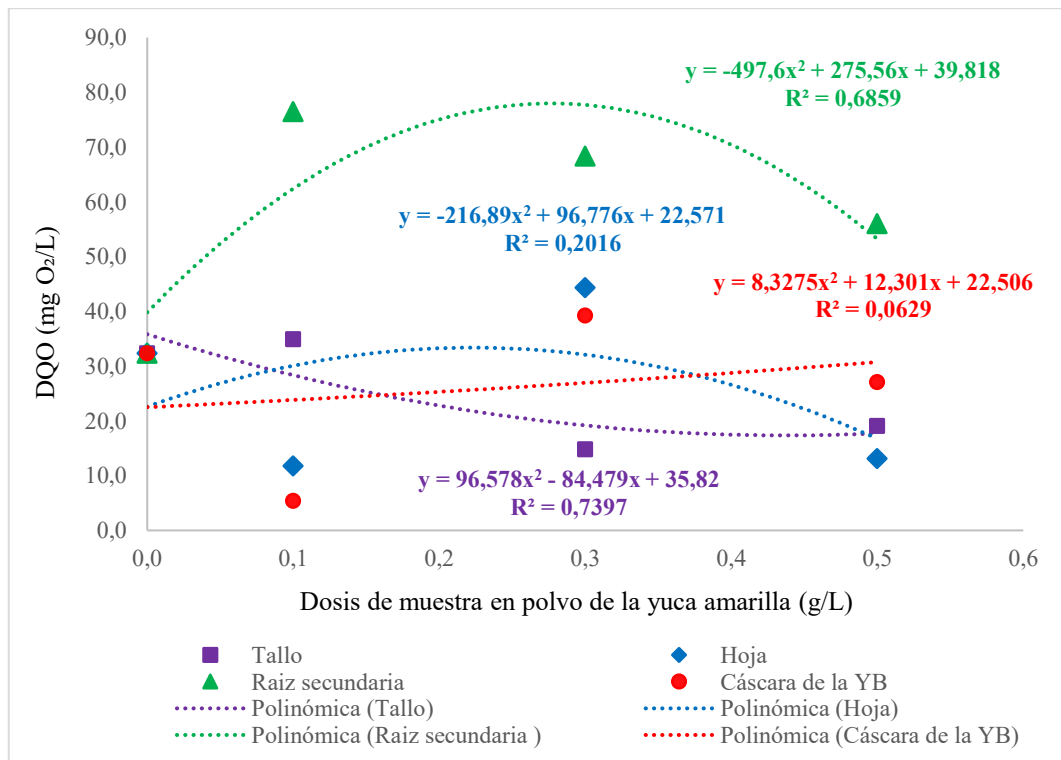


Figura 17. Comportamiento del parámetro DQO al aplicarle el coagulante/floculante a partir de la yuca amarilla

En conjunto, los resultados sugieren que el uso del tallo y la hoja de yuca amarilla en dosis controladas ofrece una mayor eficiencia para la reducción de la DQO, mientras que la raíz secundaria requiere precaución por su potencial aporte de materia orgánica soluble. Estos hallazgos respaldan la necesidad de determinar dosis óptimas específicas para cada parte del vegetal, maximizando la eficiencia del tratamiento y evitando efectos indeseados sobre la calidad del agua tratada.

La Figura 18 evidencia una tendencia generalizada de disminución de la DBO₅ a medida que aumenta la dosis del coagulante/floculante a partir de la yuca amarilla, con independencia de la parte del vegetal utilizada. Este comportamiento indica una reducción efectiva de la fracción biodegradable de la materia orgánica, lo que implica una menor actividad microbiana y una mejora sustancial en la calidad del agua tratada (Sánchez-Martín et al., 2010). La disminución más pronunciada se observa en la cáscara de la yuca amarilla, que reduce la DBO₅ desde valores iniciales cercanos a 1,6 mg O₂/L hasta aproximadamente 0,1 mg O₂/L en dosis de 0,5 g/L, con un ajuste polinómico que presenta un alto coeficiente de determinación ($R^2 = 0,9692$), lo que sugiere una respuesta predecible y estable del sistema.

En el caso del tallo y la hoja, las reducciones también son significativas, alcanzando valores inferiores a 0,5 mg O₂/L en dosis intermedias (0,3 g/L). Estos resultados concuerdan con lo reportado por Choy et al. (2014) y Poudyal et al. (2017), quienes señalan que los compuestos poliméricos y proteínas presentes en coagulantes vegetales pueden promover una remoción simultánea de sólidos y materia orgánica biodegradable, mejorando la calidad del agua en términos microbiológicos.

Por otro lado, la raíz secundaria muestra un patrón similar de reducción, aunque con valores ligeramente superiores en las dosis más altas respecto a la cáscara y el tallo. Esto podría estar relacionado con la liberación residual de ciertos compuestos orgánicos solubles presentes en esta parte del vegetal, un fenómeno descrito por Miller et al. (2008) y Okuda et al. (2001) cuando la biomasa utilizada en la coagulación no ha sido previamente optimizada para minimizar lixiviados.

La drástica reducción de la DBO₅ en todos los casos implica que la aplicación del coagulante no solo remueve sólidos suspendidos y materia orgánica no biodegradable (reflejada en la DQO), sino que también limita la fracción de carbono orgánico fácilmente asimilable por los microorganismos. Esto es de especial relevancia para comunidades rurales, ya que aguas con baja DBO₅ reducen la probabilidad de proliferación bacteriana durante el almacenamiento y distribución (Pritchard et al., 2010).

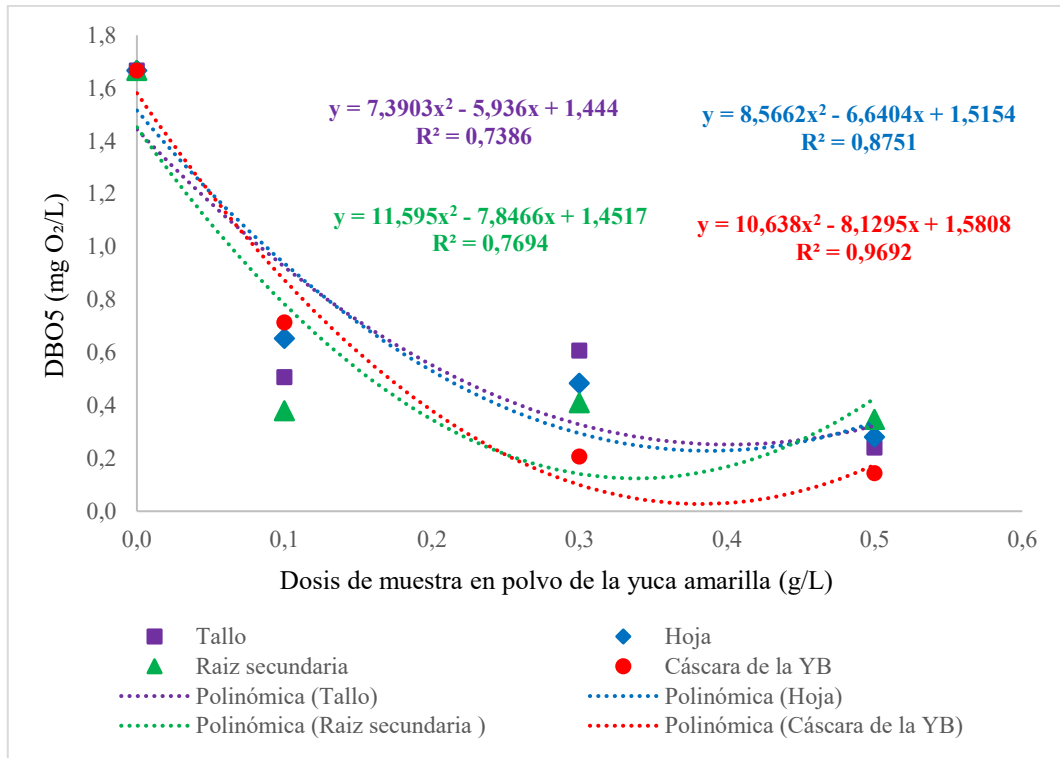


Figura 18. Comportamiento del parámetro DBO_5 al aplicarle el coagulante/floculante a partir de la yuca amarilla

En síntesis, el coagulante/floculante de yuca amarilla demuestra un alto potencial para la remoción de materia orgánica biodegradable, con mayor eficiencia en la cáscara, seguida por el tallo y la hoja, y en menor medida la raíz secundaria. Estos hallazgos refuerzan su aplicabilidad en sistemas descentralizados de tratamiento de agua, aportando una alternativa sostenible y de bajo impacto ambiental frente a coagulantes químicos convencionales.

4.3.3. Análisis estadístico del efecto del coagulante/floculante a partir de la yuca blanca y amarilla en las propiedades químicas de las aguas contaminadas naturalmente

Según la Tabla 16, la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk evidenció que los valores de p para los parámetros oxígeno disuelto (OD), pH, demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO_5) fueron menores a 0,05, lo que indica que la distribución de los datos no sigue una distribución normal (Shapiro & Wilk, 1965). Esta falta de normalidad es frecuente en estudios de calidad de agua, debido a la variabilidad natural de las condiciones ambientales y a la influencia de múltiples factores fisicoquímicos (Zar, 2010).

En cuanto a la prueba de homogeneidad de varianzas de Levene, se observó que para el OD ($p = 0,93288$), DQO ($p = 0,14622$) y DBO_5 ($p = 0,99556$) no se rechazó la hipótesis de

igualdad de varianzas ($p > 0,05$), mientras que para el pH ($p = 0,04155$) sí se detectó heterogeneidad, lo que coincide con reportes previos que señalan que el pH puede presentar variaciones abruptas en función de la actividad fotosintética, procesos de neutralización y aportes externos de contaminantes (Chapman, 1996; APHA, 2017).

Debido a que los datos no cumplen el supuesto de normalidad, se optó por aplicar el modelo Aligned Rank Transform (ART) combinado con pruebas no paramétricas de comparación múltiple, específicamente el test de Dunn y la prueba de Wilcoxon para contrastes pareados. Estas metodologías permiten evaluar diferencias significativas en diseños factoriales y en comparaciones por pares sin requerir la transformación de los datos, manteniendo así la interpretabilidad de las unidades originales (Wobbrock et al., 2011).

La elección de métodos no paramétricos es coherente con las recomendaciones metodológicas para datos ambientales, donde las distribuciones suelen ser asimétricas y contener valores atípicos que pueden distorsionar los análisis paramétricos (Conover, 1999; Helsel & Hirsch, 2002). Además, la aplicación del ART posibilita conservar la estructura del diseño experimental factorial, permitiendo el análisis de efectos principales e interacciones de manera robusta.

En estudios similares, la combinación de pruebas no paramétricas ha demostrado ser efectiva para detectar diferencias significativas en parámetros como OD, pH, DQO y DBO₅, especialmente en contextos donde las fuentes de variabilidad incluyen tanto factores naturales como antrópicos (Gibbons & Chakraborti, 2011). Por lo tanto, la metodología empleada en este análisis es adecuada y garantiza la validez de las conclusiones obtenidas.

Tabla 16. Prueba de normalidad de los parámetros químicos

Parámetro	Prueba de Shapiro-Wilk	Prueba de Levene	Método para análisis estadístico
OD	0,03969	0,93288	ART + Dunn/Wilcoxon
pH	0,00000	0,04155	ART + Dunn/Wilcoxon
DQO	0,00001	0,14622	ART + Dunn/Wilcoxon
DBO ₅	0,03915	0,99556	ART + Dunn/Wilcoxon

Según la Tabla 17, el análisis mediante Transformación de Rango Alineado (Aligned Rank Transform, ART) permitió evaluar los efectos principales y de interacción de los factores A (variedad de yuca), B (parte del vegetal) y C (dosis), así como sus combinaciones, sobre los parámetros oxígeno disuelto (OD), pH, demanda química de oxígeno (DQO) y demanda

bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO₅). Este método no paramétrico, recomendado para diseños factoriales con datos que no cumplen los supuestos de normalidad y homocedasticidad, conserva la estructura del experimento y posibilita el análisis de efectos e interacciones utilizando procedimientos ANOVA (Wobbrock et al., 2011).

En el caso del OD, ningún factor principal ni interacción mostró diferencias significativas ($p > 0,05$), lo que indica que ni la variedad de yuca, ni la parte del vegetal utilizada, ni la dosis aplicada influyeron de forma estadísticamente significativa en la concentración de oxígeno disuelto. Este resultado sugiere que la dinámica del OD en el agua tratada podría estar más asociada a condiciones ambientales y biológicas no controladas en el ensayo, como la temperatura o la actividad microbiana, que a los factores experimentales evaluados (Chapman, 1996; APHA, 2017).

Para el pH, se observaron efectos significativos de los factores A ($p = 0,0028$), B ($p = 0,0000$) y C ($p = 0,0001$), así como de varias interacciones: A:B ($p = 0,0002$), A:C ($p = 0,0218$), B:C ($p = 0,0011$) y A:B:C ($p = 0,0262$). Esto evidencia que el pH del agua tratada se vio influenciado tanto por la variedad de yuca y la parte vegetal empleada, como por la dosis aplicada, existiendo además efectos combinados entre estos factores. En estudios previos, la variación del pH en procesos de coagulación-floculación natural ha sido atribuida a la presencia de compuestos orgánicos, ácidos fenólicos y alcaloides en los extractos vegetales, que pueden actuar como tampones o modificar la acidez del medio (Ndabigengesere & Narasiah, 1998; Ghebremichael et al., 2005).

En cuanto a la DQO, se identificaron efectos significativos del factor B ($p = 0,0289$) y de la interacción B:C ($p = 0,0128$). Esto indica que la parte del vegetal utilizada y su combinación con la dosis influyeron en la cantidad de materia orgánica oxidada químicamente. Estos hallazgos coinciden con lo reportado en investigaciones sobre coagulantes naturales, donde la fracción vegetal (por ejemplo, cáscara o raíz) presenta distintas composiciones de compuestos bioactivos y contenidos de materia orgánica soluble, lo que impacta directamente en la DQO residual (Marobhe et al., 2007).

Respecto a la DBO₅, únicamente el factor C ($p = 0,0000$) presentó un efecto significativo, indicando que la dosis de coagulante influyó de manera directa la carga de materia orgánica biodegradable presente después del tratamiento. Este comportamiento es coherente con estudios que muestran que dosis más altas de coagulantes naturales pueden favorecer la remoción de materia orgánica, pero también, en exceso, aportar compuestos orgánicos que incrementan la DBO₅ (Ghebremichael, 2004).

Tabla 17. Análisis estadístico para los parámetros químicos empleando: Transformación de Rango Alineado (ART)

Factor	OD		pH		DQO		DBO5	
	Estadístico	p valor	Estadístico	p valor	Estadístico	p valor	Estadístico	p valor
A	0,0710	0,7908	9,6875	0,0028	0,4421	0,5085	0,0037	0,9514
B	0,8673	0,4627	25,9552	0,0000	3,2065	0,0289	1,3711	0,2596
C	36,2795	0,0000	8,6981	0,0001	0,5551	0,6466	65,5796	0,0000
AxB	0,1185	0,9489	7,5632	0,0002	2,1340	0,1046	0,2276	0,8769
AxC	0,4444	0,7221	3,4440	0,0218	1,2053	0,3150	2,4059	0,0754
BxC	0,4281	0,9152	3,6013	0,0011	2,5976	0,0128	1,5262	0,1580
AxBxC	0,2129	0,9916	2,3003	0,0262	1,2815	0,2643	0,8881	0,5408

Factor A: Yuca, a1: Yuca blanca, a2: yuca amarilla; Factor B: Parte del vegetal, b1: Tallo, b2: Hoja; b3: Raíz secundaria, b4: Cáscara de la yuca; y Factor C: Dosis; c0: 0,0 g/L, c1: 0,1 g/L, c2: 0,3 g/L, c3: 0,5 g/L; OD: oxígeno disuelto, DQO: demanda química de oxígeno; DBO5: demanda bioquímica de oxígeno

En conjunto, los resultados obtenidos mediante ART de la Tabla anterior, confirman que la respuesta de los parámetros químicos a la aplicación de coagulantes naturales derivados de *Manihot esculenta* depende de manera diferenciada de la variedad, la parte del vegetal y la dosis utilizada. El método ART permitió evaluar estas relaciones de forma robusta, preservando la integridad del diseño factorial y ofreciendo una interpretación estadísticamente sólida de las interacciones (Wobbrock et al., 2011; Conover, 1999).

En la Tabla 18, se observa la prueba de comparaciones múltiples de Dunn aplicada al parámetro Oxígeno Disuelto (OD) muestra que la mayoría de las diferencias significativas se concentran en el Factor C (Dosis), mientras que los Factores A (variedad de yuca) y B (parte del vegetal) no presentan diferencias estadísticamente relevantes ($p > 0,05$). El OD es un indicador fundamental de la calidad del agua, ya que refleja la capacidad de mantener procesos biológicos acuáticos y es sensible a cambios en materia orgánica y carga contaminante (APHA, 2017).

En el Factor A (Yuca), la comparación a1 – a2 (Yuca blanca vs. Yuca amarilla) no mostró diferencias significativas ($p = 0,79080$), lo que sugiere que la variedad utilizada no tiene un impacto directo y marcado sobre el OD final. Esto coincide con lo reportado por Bautista et al. (2020), quienes señalan que la influencia de coagulantes vegetales sobre el OD suele estar más asociada al efecto indirecto de remoción de materia orgánica que a la composición varietal en sí. En el Factor B (Parte del vegetal), ninguna comparación resultó significativa ($p > 0,05$), indicando que, para este parámetro, el uso de tallo, hoja, raíz secundaria o cáscara no genera cambios estadísticamente detectables. Investigaciones previas (Choy et al., 2014) sugieren que la parte vegetal puede tener un efecto más marcado en parámetros como turbidez o DBO5,

mientras que el OD se ve más influenciado por la reducción de carga orgánica total tras la coagulación-floculación. El Factor C (Dosis) presentó las diferencias más notables: c0 – c1 ($p = 0,00000$), c0 – c2 ($p = 0,00000$), c0 – c3 ($p = 0,00000$) y c1 – c3 ($p = 0,01007$). Estos resultados evidencian que el aumento en la dosis de coagulante vegetal contribuye significativamente a mejorar el OD, probablemente debido a la remoción más eficiente de sólidos y materia orgánica biodegradable, lo que reduce el consumo de oxígeno en procesos de descomposición microbiana (Ndabigengesere & Narasiah, 1998). El hecho de que no haya diferencia significativa entre c2 – c3 ($p = 0,78018$) sugiere que a partir de 0,3 g/L la mejora en OD tiende a estabilizarse, evitando incrementos innecesarios de dosis.

En términos prácticos, una mayor dosis de coagulante vegetal favorece condiciones más oxigenadas en el agua tratada, lo que es relevante para ecosistemas acuáticos y consumo humano, ya que un OD alto contribuye a una mejor estabilidad biológica y menor riesgo de proliferación anaerobia (Pritchard et al., 2010; Ghebremichael et al., 2005). Estos resultados confirman que, aunque la variedad y parte del vegetal no sean determinantes para el OD, el manejo óptimo de la dosis (0,3 g/L como umbral) puede ser una herramienta clave para mantener y mejorar las condiciones de oxigenación del agua tratada.

Tabla 18. Prueba de comparaciones múltiples de Dunn del parámetro químico OD

Contraste	Diferencia estimada	Error estándar	Grados de libertad	t estadístico	p valor
a1 - a2	-1,833	6,882	64	-0,266	0,79080
b1 - b2	-0,958	9,557	64	-0,100	0,99964
b1 - b3	12,667	9,557	64	1,325	0,55043
b1 - b4	5,958	9,557	64	0,623	0,92419
b2 - b3	13,625	9,557	64	1,426	0,48829
b2 - b4	6,917	9,557	64	0,724	0,88728
b3 - b4	-6,708	9,557	64	-0,702	0,89596
c0 - c1	37,042	5,946	64	6,230	0,00000
c0 - c2	50,667	5,946	64	8,521	0,00000
c0 - c3	56,292	5,946	64	9,467	0,00000
c1 - c2	13,625	5,946	64	2,291	0,11076
c1 - c3	19,250	5,946	64	3,238	0,01007
c2 - c3	5,625	5,946	64	0,946	0,78018

Factor A: Yuca, a1: Yuca blanca, a2: yuca amarilla; Factor B: Parte del vegetal, b1: Tallo, b2: Hoja; b3: Raíz secundaria, b4: Cáscara de la yuca; y Factor C: Dosis; c0: 0,0 g/L, c1: 0,1 g/L, c2: 0,3 g/L, c3: 0,5 g/L

En la Tabla 19, se observa el análisis de comparaciones múltiples de Dunn para el pH revela diferencias significativas en varios contrastes, lo que indica que tanto la variedad de yuca como la parte del vegetal y, en menor medida, la dosis, influyen en la modificación de este parámetro químico. El pH es un indicador esencial de la calidad del agua, ya que afecta la biodisponibilidad de nutrientes y metales, así como la eficiencia de los procesos de coagulación-floculación (APHA, 2017).

En el Factor A (Yuca), la comparación a1 – a2 (Yuca blanca vs. Yuca amarilla) presenta una diferencia significativa ($p = 0,00277$), evidenciando que la variedad de yuca influye en el pH final del agua tratada. Esto podría estar relacionado con diferencias en el contenido de ácidos orgánicos, carbohidratos y compuestos fenólicos entre ambas variedades (Bautista et al., 2020), que pueden alterar la alcalinidad del medio. En el Factor B (Parte del vegetal), se detectaron varias diferencias significativas: b1 – b3 (Tallo vs. Raíz secundaria, $p = 0,00000$), b2 – b4 (Hoja vs. Cáscara, $p = 0,00103$) y b3 – b4 (Raíz secundaria vs. Cáscara, $p = 0,00000$). Esto indica que la parte utilizada incide en la modificación del pH, posiblemente debido a la diferente composición química, concentración de taninos, fibras y compuestos solubles que pueden liberar protones o interactuar con la alcalinidad del agua (Choy et al., 2014). La raíz secundaria y la cáscara parecen ser las que generan mayores variaciones, lo que concuerda con estudios que señalan que estas partes concentran metabolitos secundarios con capacidad de modificar el equilibrio ácido-base (Miller et al., 2008). En el Factor C (Dosis), solo la comparación c0 – c2 (0,0 vs. 0,3 g/L, $p = 0,00090$) mostró una diferencia significativa, lo que sugiere que a dosis moderadas puede haber un cambio detectable en el pH, pero que incrementos adicionales no generan variaciones estadísticamente relevantes. Este comportamiento coincide con el principio de que, en coagulación con coagulantes naturales, el efecto sobre pH es menos pronunciado que con coagulantes químicos como el sulfato de aluminio, ya que el mecanismo de acción es predominantemente físico-químico y no ácido (Ndabigengesere & Narasiah, 1998).

Tabla 19. Prueba de comparaciones múltiples de Dunn del parámetro químico pH

Contraste	Diferencia estimada	Error estándar	Grados de libertad	t estadístico	p valor
a1 - a2	-19,083	6,131	64	-3,112	0,00277
b1 - b2	11,917	6,495	64	1,835	0,26678
b1 - b3	41,125	6,495	64	6,332	0,00000
b1 - b4	-13,875	6,495	64	-2,136	0,15274
b2 - b3	29,208	6,495	64	4,497	0,00017
b2 - b4	-25,792	6,495	64	-3,971	0,00103

b3 - b4	-55,000	6,495	64	-8,468	0,00000
c0 - c1	-4,583	8,224	64	-0,557	0,94422
c0 - c2	33,000	8,224	64	4,013	0,00090
c0 - c3	16,917	8,224	64	2,057	0,17842
c1 - c2	37,583	8,224	64	4,570	0,00013
c1 - c3	21,500	8,224	64	2,614	0,05294
c2 - c3	-16,083	8,224	64	-1,956	0,21567

Factor A: Yuca, a1: Yuca blanca, a2: yuca amarilla; Factor B: Parte del vegetal, b1: Tallo, b2: Hoja; b3: Raíz secundaria, b4: Cáscara de la yuca; y Factor C: Dosis; c0: 0,0 g/L, c1: 0,1 g/L, c2: 0,3 g/L, c3: 0,5 g/L

En conjunto, los resultados de la Tabla 19 indican que, si bien el pH no sufre cambios drásticos con el uso de coagulantes vegetales, las variaciones observadas pueden ser relevantes para optimizar las condiciones de tratamiento. Mantener un pH estable dentro del rango recomendado por la OMS (6,5–8,5) es fundamental para garantizar la potabilidad y minimizar la solubilización de metales indeseados (Pritchard et al., 2010).

En la Tabla 20, se observa la prueba de comparaciones múltiples de Dunn aplicada a la Demanda Química de Oxígeno (DQO) muestra que la mayoría de las comparaciones entre niveles de los factores no presentan diferencias significativas ($p > 0,05$), lo que indica que el efecto del coagulante natural sobre este parámetro es más limitado o requiere condiciones específicas para generar cambios detectables. La DQO es un indicador clave de la carga orgánica presente en el agua, midiendo la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica e inorgánica susceptible de oxidación (APHA, 2017).

En el Factor A (Yuca), la comparación a1 – a2 (Yuca blanca vs. Yuca amarilla) no mostró diferencias significativas ($p = 0,50851$), lo que sugiere que la variedad utilizada no influye de forma marcada sobre la reducción de DQO. Esto concuerda con estudios que señalan que el impacto de coagulantes vegetales sobre la DQO depende más de la dosis y de la naturaleza de la materia orgánica que de la variedad vegetal utilizada (Bautista et al., 2020). En el Factor B (Parte del vegetal), la comparación b1 – b3 (Tallo vs. Raíz secundaria, $p = 0,03502$) fue la única con significancia estadística ($p < 0,05$), indicando que la raíz secundaria podría tener una mayor capacidad de remover materia orgánica oxidizable que el tallo, posiblemente debido a una mayor concentración de compuestos bioactivos y fibras que favorecen la agregación y sedimentación de partículas orgánicas (Choy et al., 2014). No obstante, el resto de las comparaciones entre partes vegetales no fueron significativas, lo que sugiere que su efecto sobre la DQO es similar. En el Factor C (Dosis), ninguna comparación presentó diferencias significativas ($p > 0,05$), lo que indica que el aumento de dosis no se tradujo en

reducciones significativas de la DQO dentro del rango estudiado (0,0 a 0,5 g/L). Esto podría explicarse por la presencia de fracciones disueltas de materia orgánica que no son fácilmente removibles por coagulación, sino que requieren tratamientos complementarios como oxidación avanzada o adsorción (Ndabigengesere & Narasiah, 1998; Ghebremichael et al., 2005).

En términos prácticos, estos resultados indican que, para optimizar la remoción de DQO, se podría priorizar el uso de partes de la planta con mayor eficacia, como la raíz secundaria, y considerar procesos combinados de tratamiento. Además, la ausencia de variaciones significativas con el aumento de dosis sugiere que la remoción de materia orgánica por coagulación natural podría tener un límite técnico, coincidiendo con estudios que reportan que los coagulantes vegetales son más efectivos en la eliminación de turbidez que en la reducción de DQO (Pritchard et al., 2010; Miller et al., 2008).

Tabla 20. Prueba de comparaciones múltiples de Dunn del parámetro químico DQO

Contraste	Diferencia estimada	Error estándar	Grados de libertad	t estadístico	p valor
a1 - a2	-4,500	6,768	64	-0,665	0,50851
b1 - b2	-2,833	9,007	64	-0,315	0,98912
b1 - b3	-25,042	9,007	64	-2,780	0,03502
b1 - b4	-4,958	9,007	64	-0,551	0,94608
b2 - b3	-22,208	9,007	64	-2,466	0,07521
b2 - b4	-2,125	9,007	64	-0,236	0,99533
b3 - b4	20,083	9,007	64	2,230	0,12620
c0 - c1	4,292	9,418	64	0,456	0,96828
c0 - c2	-7,542	9,418	64	-0,801	0,85380
c0 - c3	0,583	9,418	64	0,062	0,99991
c1 - c2	-11,833	9,418	64	-1,256	0,59367
c1 - c3	-3,708	9,418	64	-0,394	0,97912
c2 - c3	8,125	9,418	64	0,863	0,82395

Factor A: Yuca, a1: Yuca blanca, a2: yuca amarilla; Factor B: Parte del vegetal, b1: Tallo, b2: Hoja; b3: Raíz secundaria, b4: Cáscara de la yuca; y Factor C: Dosis; c0: 0,0 g/L, c1: 0,1 g/L, c2: 0,3 g/L, c3: 0,5 g/L

En la Tabla 21, se observa la prueba de comparaciones múltiples de Dunn para la DBO₅ muestra que las diferencias estadísticamente significativas se concentran exclusivamente en el Factor C (Dosis), mientras que los Factores A (variedad de yuca) y B (parte del vegetal) no evidencian variaciones relevantes. La DBO₅ es un indicador fundamental para evaluar la carga orgánica biodegradable en el agua y su potencial impacto en el consumo de oxígeno disuelto,

afectando la vida acuática y la calidad para consumo humano (APHA, 2017).

En el Factor A (Yuca), la comparación a1 – a2 (Yuca blanca vs. Yuca amarilla) presenta un valor p alto ($p = 0,95138$), evidenciando que la variedad utilizada no genera diferencias significativas en la reducción de DBO₅. Esto concuerda con lo señalado por Bautista et al. (2020), quienes reportan que el impacto sobre DBO₅ depende más de la eficacia global del tratamiento que de las características varietales. En el Factor B (Parte del vegetal), todas las comparaciones resultaron no significativas ($p > 0,05$), indicando que la procedencia del coagulante vegetal (tallo, hoja, raíz secundaria o cáscara) no modifica de manera estadísticamente detectable la reducción de DBO₅. Estudios como el de Choy et al. (2014) han encontrado resultados similares, donde la parte vegetal influye más sobre turbidez y sólidos suspendidos que sobre parámetros que involucran materia orgánica biodegradable. En contraste, el Factor C (Dosis) muestra diferencias altamente significativas en la mayoría de las comparaciones: c0 – c1 ($p = 0,00000$), c0 – c2 ($p = 0,00000$), c0 – c3 ($p = 0,00000$) y c1 – c3 ($p = 0,00001$). Estos resultados evidencian un claro efecto dosis-respuesta, donde el aumento en la cantidad de coagulante vegetal favorece la disminución de la carga orgánica biodegradable, probablemente debido a la mayor remoción de partículas y compuestos orgánicos solubles que demandan oxígeno (Ndabigengesere & Narasiah, 1998). Sin embargo, la comparación c2 – c3 ($p = 0,52225$) no resultó significativa, lo que indica que a partir de 0,3 g/L la mejora en la reducción de DBO₅ se estabiliza, evitando beneficios adicionales con mayores dosis. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Ghebremichael et al. (2005), quienes señalaron que la aplicación de coagulantes vegetales a dosis óptimas permite reducciones importantes en DBO₅ sin alterar significativamente otros parámetros críticos como el pH, favoreciendo la sostenibilidad del tratamiento. Desde un punto de vista operativo, mantener dosis cercanas a 0,3 g/L puede maximizar la eficiencia de remoción de DBO₅ con un uso racional de insumos, tal como sugieren Pritchard et al. (2010) y Miller et al. (2008).

Tabla 21. Prueba de comparaciones múltiples de Dunn del parámetro químico DBO₅

Contraste	Diferencia estimada	Error estándar	Grados de libertad	t estadístico	p valor
a1 - a2	-0,417	6,806	64	-0,061	0,95138
b1 - b2	1,521	9,347	64	0,163	0,99845
b1 - b3	10,354	9,347	64	1,108	0,68614
b1 - b4	16,458	9,347	64	1,761	0,30164
b2 - b3	8,833	9,347	64	0,945	0,78074

b2 - b4	14,938	9,347	64	1,598	0,38702
b3 - b4	6,104	9,347	64	0,653	0,91411
c0 - c1	28,875	4,834	64	5,973	0,00000
c0 - c2	54,250	4,834	64	11,223	0,00000
c0 - c3	60,875	4,834	64	12,593	0,00000
c1 - c2	25,375	4,834	64	5,249	0,00001
c1 - c3	32,000	4,834	64	6,620	0,00000
c2 - c3	6,625	4,834	64	1,371	0,52225

Factor A: Yuca, a1: Yuca blanca, a2: yuca amarilla; Factor B: Parte del vegetal, b1: Tallo, b2: Hoja; b3: Raíz secundaria, b4: Cáscara de la yuca; y Factor C: Dosis; c0: 0,0 g/L, c1: 0,1 g/L, c2: 0,3 g/L, c3: 0,5 g/L

En la Tabla 22, se observa el modelo global ajustado para el parámetro químico pH evalúa el efecto de la especie de yuca (Factor A), la parte del vegetal (Factor B) y la dosis (Factor C), así como sus interacciones, en el tratamiento de agua turbia. Los resultados indican que las variables incluidas en el modelo son estadísticamente significativas para explicar las variaciones en el pH del agua tratada.

El intercepto de 8,360 ($p < 0,00000$) representa el valor promedio de pH esperado cuando todas las variables están en su nivel de referencia (variedad yuca blanca, parte del vegetal distinta a la raíz secundaria y dosis de referencia). Este valor se encuentra dentro del rango recomendado por la OMS para agua potable (6,5 – 8,5), lo cual es favorable desde el punto de vista de calidad y potabilidad (APHA, 2017).

La variable BRaíz secundaria presenta un coeficiente negativo de -0,475 ($p = 0,00143$), lo que indica que el uso de la raíz secundaria como coagulante natural tiende a disminuir el pH en 0,475 unidades respecto al valor base. Esta disminución podría estar relacionada con la liberación de compuestos fenólicos, taninos u otros metabolitos secundarios que aportan acidez al medio, tal como han reportado Choy et al. (2014) y Miller et al. (2008) para otros coagulantes vegetales.

La interacción BRaíz secundaria \times C_valor (dosis) muestra un coeficiente de -0,911 ($p = 0,02827$), evidenciando que el incremento de la dosis cuando se emplea la raíz secundaria intensifica la disminución del pH. Este efecto sinérgico sugiere que a dosis más altas, la concentración de compuestos activos liberados aumenta y puede influir de forma más marcada sobre el equilibrio ácido-base del agua tratada (Ndabigengesere & Narasiah, 1998). Aunque esta reducción de pH sigue manteniéndose dentro de los límites aceptables, es importante monitorearla para evitar valores cercanos al límite inferior de potabilidad.

En términos prácticos, estos resultados indican que el uso de raíz secundaria como coagulante vegetal en combinación con dosis altas puede generar un efecto más pronunciado sobre el pH, lo cual puede ser beneficioso si el objetivo es neutralizar aguas ligeramente alcalinas. Sin embargo, en aguas con pH bajo, sería recomendable ajustar la dosis para evitar descensos excesivos.

Este comportamiento coincide con lo reportado en estudios previos donde coagulantes vegetales, al remover materia orgánica y partículas, también alteran parámetros como pH y alcalinidad, aunque en menor magnitud que los coagulantes químicos tradicionales (Pritchard et al., 2010; Ghebremichael et al., 2005).

En síntesis, el modelo confirma que tanto la parte del vegetal como la interacción con la dosis influyen de manera significativa en el pH del agua tratada, siendo la raíz secundaria el componente que mayor impacto presenta. Esto brinda una base técnica para optimizar combinaciones y dosis en función de la calidad inicial del agua y el pH objetivo.

Tabla 22. Modelo global del comportamiento del pH frente a la especie de yuca, parte del vegetal y la dosis

Término	Coefficiente estimado	Error estándar	Estadístico de prueba	p valor
Intersección	8,360	0,110	75,819	0,00000
BRaíz secundaria	-0,475	0,144	-3,302	0,00143
BRaíz secundaria:C_valor	-0,911	0,408	-2,233	0,02827

En la Tabla 23, se observa el modelo global ajustado para la Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días (DBO₅) muestra que la variable más influyente en su comportamiento es la dosis del coagulante vegetal (Factor C), con una relación de tipo polinómica de segundo grado. La DBO₅ es un indicador esencial para estimar la cantidad de oxígeno que será consumido por la degradación biológica de la materia orgánica presente en el agua, y su reducción es clave para la protección de ecosistemas acuáticos y la potabilización (APHA, 2017).

El intercepto de 1,549 ($p < 0,00000$) representa el valor promedio de DBO₅ cuando todos los factores están en el nivel de referencia (variedad yuca blanca, parte del vegetal base, dosis inicial). Este valor corresponde al nivel esperado en el agua tratada sin influencia adicional de los cambios en dosis.

El término lineal de la dosis (poly(C_valor, 2, raw = TRUE) primer coeficiente) presenta un valor de -8,078 ($p < 0,00000$), lo que indica que el aumento inicial de la dosis de coagulante genera una disminución pronunciada en la DBO₅. Esto concuerda con lo señalado por

Ndabigengesere y Narasiah (1998), quienes observaron que dosis moderadas de coagulantes vegetales promueven una remoción eficiente de materia orgánica biodegradable debido a la agregación y sedimentación de partículas.

Por otro lado, el término cuadrático (poly(C_valor, 2, raw = TRUE) segundo coeficiente) tiene un valor positivo de 10,479 ($p < 0,00000$), lo que sugiere que a partir de cierto punto, incrementos adicionales en la dosis pueden generar un ligero aumento de la DBO₅. Esto puede deberse a fenómenos de sobredosificación, en los que un exceso de materia orgánica soluble proveniente del propio coagulante vegetal se incorpora al agua, aumentando la demanda de oxígeno (Miller et al., 2008).

Este comportamiento en forma de “curva en U” evidencia que existe un punto óptimo de dosis para minimizar la DBO₅, después del cual los beneficios se reducen o incluso se revierten. Estudios previos con coagulantes naturales como *Moringa oleifera* y *Opuntia spp.* han reportado patrones similares, recomendando ajustes de dosis según la calidad inicial del agua para evitar efectos indeseados (Choy et al., 2014; Pritchard et al., 2010).

Desde una perspectiva práctica, el modelo indica que una dosis intermedia (probablemente cercana a 0,3 g/L, según análisis previos) maximiza la eficiencia de remoción de materia orgánica biodegradable. Esto es especialmente importante en sistemas de tratamiento comunitario o rural, donde la optimización de dosis permite reducir costos operativos y garantizar un agua más segura (Bautista et al., 2020).

Además, el ajuste polinómico evidencia la importancia de no aplicar dosis estándar sin validación previa, ya que tanto subdosificar como sobredosificar puede comprometer la calidad final del agua (Ghebremichael et al., 2005).

Tabla 23. Modelo global del comportamiento del DBO₅ frente a la especie de yuca, parte del vegetal y la dosis

Término	Coficiente estimado	Error estándar	Estadístico de prueba	p valor
Intersección	1,549	0,105	14,730	0,00000
poly(C_valor, 2, raw = TRUE)1	-8,078	0,597	-13,521	0,00000
poly(C_valor, 2, raw = TRUE)2	10,479	1,017	10,300	0,00000

En síntesis, el modelo confirma que la dosis de coagulante vegetal es el factor determinante en la variación de la DBO₅, con un efecto no lineal que requiere calibración cuidadosa. Esto respalda la necesidad de pruebas preliminares para cada fuente de agua a tratar,

siguiendo lineamientos técnicos y normativos.

Este comportamiento no lineal enfatiza la necesidad de realizar ensayos de jar-test o pruebas piloto antes de definir la dosis operativa en plantas de tratamiento, ya que la respuesta óptima puede variar según la calidad inicial del agua, su carga orgánica, la presencia de sólidos suspendidos y las condiciones físico-químicas (pH, temperatura, alcalinidad). De igual manera, el cumplimiento de lineamientos técnicos y normativos nacionales e internacionales, como la *Guía para el tratamiento de agua potable* (OMS, 2017) y el Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano (MINSA, 2022), es esencial para garantizar que la reducción de DBO₅ se mantenga dentro de los estándares permisibles. En consecuencia, la calibración cuidadosa de la dosis no solo optimiza la eficiencia del tratamiento, sino que también previene costos operativos innecesarios y riesgos de incumplimiento regulatorio.

4.4. Eficiencia del coagulante-floculante a partir de dos variedades de *Manihot esculenta* (yuca) en la remoción de la turbiedad y de la demanda bioquímica de oxígeno de las aguas contaminadas naturalmente

4.4.1. Comportamiento del coagulante/floculante a partir de la yuca blanca en la remoción de la turbiedad y de la demanda bioquímica de oxígeno

Los resultados obtenidos en la Tabla 24 muestran que los coagulantes/floculantes elaborados a partir de la yuca blanca presentan una capacidad variable de remoción de turbiedad y demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO₅) en función de la parte del vegetal utilizada y de la dosis aplicada. En términos generales, la dosis de 0,1 g/L tiende a alcanzar las mayores eficiencias para la reducción de turbiedad en todas las partes evaluadas, con valores sobresalientes en tallo (74,3 %), hoja (59,4 %), raíz secundaria (66,7 %) y cáscara (68,2 %). Este comportamiento indica que dosis moderadas favorecen la neutralización de cargas superficiales y la formación de flóculos estables, optimizando la sedimentación de partículas suspendidas (Nnaji et al., 2021).

En contraste, el incremento de la dosis a niveles de 0,3 g/L y 0,5 g/L no garantiza un aumento proporcional en la remoción de turbidez; en algunos casos, incluso se observa una disminución, como en la hoja (42,6 % y 51,7 %) y la cáscara (64,9 % y 63,9 %). Este patrón sugiere que dosis excesivas podrían generar fenómenos de restabilización coloidal debido a la sobresaturación de coagulante, reduciendo la eficiencia del proceso (Bratby, 2016).

En cuanto a la remoción de DBO₅, los valores más altos no siempre coinciden con las dosis que presentan la mayor remoción de turbidez. Por ejemplo, en la hoja, la dosis de 0,3 g/L

logra una remoción del 80,8 %, mientras que en la raíz secundaria la dosis de 0,1 g/L alcanza el 31,7 %, y la de 0,3 g/L llega al 37,1 %. Esto evidencia que la eliminación de materia orgánica biodegradable no solo depende de la sedimentación de partículas, sino también de la adsorción de compuestos solubles y de interacciones químicas específicas con los componentes del coagulante (Vázquez et al., 2019).

Asimismo, se destaca que las raíces secundarias presentan un comportamiento más uniforme en la reducción de la turbidez (66,7–78,1 %) y de la DBO₅ (31,7–37,1 %) en dosis intermedias, lo que sugiere una composición química más estable para el proceso de coagulación. En cambio, el tallo y la hoja muestran variabilidad más marcada, lo que podría estar asociado a diferencias en la concentración de polisacáridos y proteínas solubles presentes en sus extractos (Ndabigengesere & Narasiah, 1998).

El coeficiente de variación (CV %) relativamente bajo en las dosis más eficientes, especialmente para turbiedad, respalda la reproducibilidad de los resultados y sugiere que el método es consistente bajo condiciones controladas de laboratorio. No obstante, el comportamiento no lineal entre dosis y eficiencia resalta la necesidad de calibración previa antes de la aplicación en campo, ya que la calidad del agua natural puede modificar significativamente la dosis óptima (WHO, 2017; MINSA, 2022).

En conjunto, estos hallazgos confirman que la yuca blanca, en sus diferentes partes, puede ser empleada como fuente de coagulante/floculante natural para la mejora de la calidad del agua, pero que el éxito del tratamiento dependerá de la selección adecuada de la parte del vegetal, la dosis, y la naturaleza del agua a tratar. La integración de pruebas piloto y el seguimiento de normas técnicas garantizarán que las eficiencias obtenidas en laboratorio puedan ser replicadas en condiciones reales de operación.

Tabla 24. Resultados del efecto de los coagulantes/floculantes a partir de la yuca blanca en la eficiencia de remoción de la turbiedad y de la demanda bioquímica de oxígeno

Parte de la yuca blanca	Dosis (muestra en polvo)	Parámetro estadístico	Eficiencia de remoción	
			Turbiedad (%)	DBO ₅ (%)
Tallo	T0 (0,0 g/L)	Promedio	0,0	0,0
		CV (%)	0,0%	0,0%
	T1 (0,1 g/L)	Promedio	74,3	53,9
		CV (%)	2,9%	13,4%
	T2 (0,3 g/L)	Promedio	60,4	81,8
		CV (%)	36,1%	9,9%
	T3 (0,5 g/L)	Promedio	66,7	90,2

		CV (%)	11,2%	1,1%
Hoja	T0 (0,0 g/L)	Promedio	0,0	0,0
		CV (%)	0,0%	0,0%
	T1 (0,1 g/L)	Promedio	59,4	59,9
		CV (%)	26,3%	6,3%
	T2 (0,3 g/L)	Promedio	42,6	80,8
		CV (%)	45,1%	16,3%
	T3 (0,5 g/L)	Promedio	51,7	82,1
		CV (%)	17,8%	3,2%
Raíz secundaria	T0 (0,0 g/L)	Promedio	0,0	0,0
		CV (%)	0,0%	0,0%
	T1 (0,1 g/L)	Promedio	80,6	66,9
		CV (%)	0,6%	31,7%
	T2 (0,3 g/L)	Promedio	78,1	87,1
		CV (%)	4,3%	12,4%
	T3 (0,5 g/L)	Promedio	76,5	75,9
		CV (%)	4,2%	17,8%
Cáscara de la yuca blanca	T0 (0,0 g/L)	Promedio	0,0	0,0
		CV (%)	0,0%	0,0%
	T1 (0,1 g/L)	Promedio	75,2	62,9
		CV (%)	6,2%	8,8%
	T2 (0,3 g/L)	Promedio	64,9	90,2
		CV (%)	8,7%	5,7%
	T3 (0,5 g/L)	Promedio	63,9	90,3
		CV (%)	13,6%	2,5%

T: Tratamiento y/o dosificación, CV: coeficiente de variación; DBO₅: demanda bioquímica de oxígeno

La Figura 19 evidencia que el comportamiento de la remoción de turbiedad al aplicar coagulantes/floculantes obtenidos de diferentes partes de la yuca blanca sigue una tendencia polinómica de segundo grado, lo que indica una relación no lineal entre la dosis aplicada y la eficiencia de remoción. En todos los casos, la eficiencia aumenta rápidamente con dosis bajas, alcanza un valor máximo y luego tiende a disminuir con dosis más altas, comportamiento característico de procesos de coagulación-floculación bien documentado en la literatura (Bratby, 2016; Nnaji et al., 2021). El ajuste polinómico muestra coeficientes de determinación (R^2) que varían entre 0,542 y 0,764, indicando que la dosis explica entre el 54,2 % y el 76,4 % de la variabilidad en la remoción de turbiedad. La raíz secundaria presenta el mejor ajuste ($R^2 = 0,7641$) y las mayores eficiencias máximas (>78 %), lo que sugiere una composición química más favorable para la coagulación, probablemente por un balance óptimo de compuestos bioactivos como almidones y proteínas (Ndabigengesere & Narasiah, 1998).

En segundo lugar, la cáscara de yuca blanca alcanza valores cercanos al 74 % de remoción y un buen ajuste ($R^2 = 0,6815$), lo que confirma que subproductos agroindustriales pueden aprovecharse como insumos sostenibles para el tratamiento de agua (Vázquez et al.,

2019). El tallo muestra un comportamiento intermedio ($R^2 = 0,6353$) con una remoción máxima cercana al 66 %, mientras que la hoja presenta la menor eficiencia (máx. ~60 %, $R^2 = 0,542$), posiblemente debido a una menor concentración de polisacáridos coagulantes y a la presencia de compuestos solubles que pueden interferir en el proceso (Ghebremichael et al., 2005).

La tendencia descendente observada en dosis superiores a 0,3 g/L sugiere la ocurrencia de sobredosificación, fenómeno que provoca la reestabilización de partículas coloidales y la disminución de la eficiencia de sedimentación (Lee et al., 2014). Este hallazgo coincide con estudios previos sobre coagulantes naturales, que indican que la dosis óptima es específica para cada tipo de agua y que su exceso puede ser contraproducente (WHO, 2017). En conjunto, la Figura confirma que la eficiencia de remoción de turbiedad con coagulantes de yuca blanca depende de la parte del vegetal empleada y de la dosis, y que existe un punto óptimo en torno a 0,1–0,3 g/L. La implementación en campo requeriría ensayos de jar-test previos para ajustar la dosificación a las características particulares del agua a tratar, garantizando así un rendimiento elevado y estable dentro de los límites normativos.

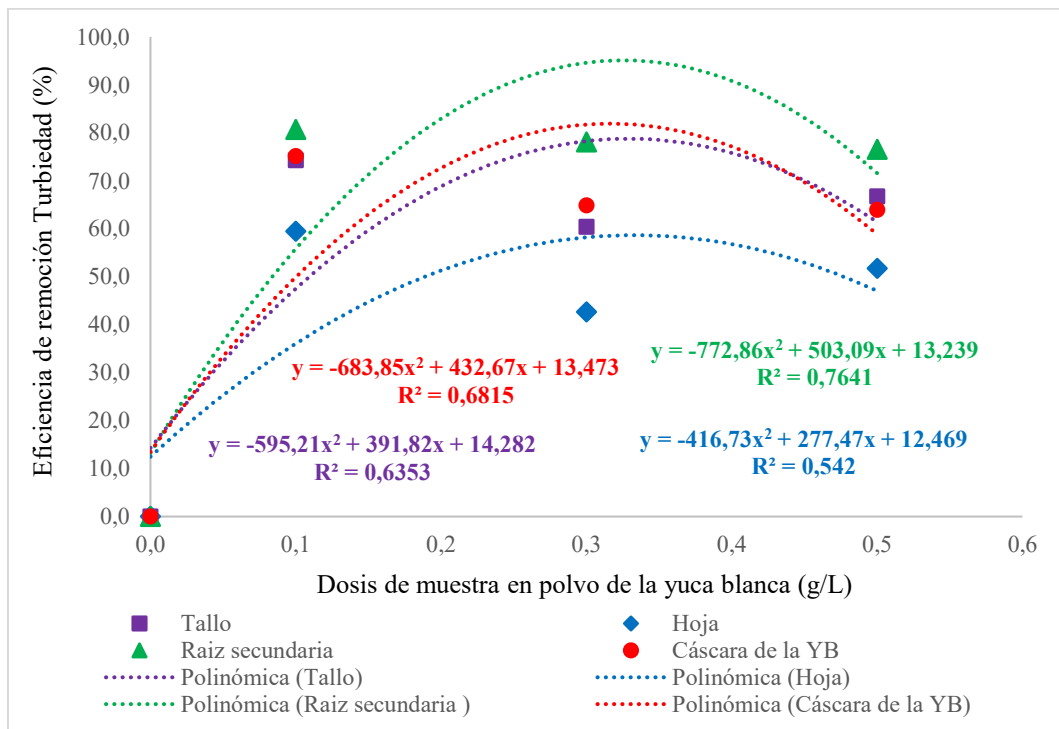


Figura 19. Comportamiento del parámetro eficiencia de remoción de turbiedad al aplicarle el coagulante/floculante a partir de la yuca blanca

La Figura 20 muestra que la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO_5) con coagulantes/floculantes obtenidos de la yuca blanca presenta una tendencia polinómica de segundo grado en todas las partes del vegetal evaluadas, con coeficientes de

determinación (R^2) elevados, que varían entre 0,929 y 0,9657. Estos altos valores de R^2 indican que la dosis aplicada explica más del 92 % de la variabilidad en la eficiencia de remoción, lo que confirma un ajuste adecuado del modelo y la fuerte dependencia de la variable respuesta respecto a la dosis utilizada (Montgomery, 2017).

Las curvas de cáscara de yuca blanca ($R^2 = 0,9547$) y tallo ($R^2 = 0,9657$) muestran las eficiencias más elevadas, alcanzando valores cercanos o superiores al 90 % en dosis óptimas (~0,3–0,5 g/L). La raíz secundaria ($R^2 = 0,929$) y la hoja ($R^2 = 0,9361$) también logran eficiencias altas (80–90 %), aunque con ligeras diferencias en la dosis donde se alcanza el punto máximo. Este comportamiento sugiere que todas las partes de la yuca blanca contienen compuestos activos —principalmente almidones, fibras y proteínas— capaces de adsorber o atrapar la materia orgánica biodegradable presente en el agua (Nnaji et al., 2021; Vázquez et al., 2019).

El patrón ascendente hasta la dosis óptima y posterior meseta o leve disminución en dosis mayores es típico de la coagulación-floculación, donde una cantidad adecuada de coagulante promueve la neutralización de cargas y formación de flóculos densos, mientras que un exceso puede provocar saturación de sitios activos o redisolución parcial de la materia orgánica (Bratby, 2016; Lee et al., 2014). En este caso, el descenso posterior a la dosis óptima es mínimo, lo que indica una amplia tolerancia en la dosificación antes de afectar la eficiencia, a diferencia de lo observado en la remoción de turbiedad, donde la sobredosificación generó caídas más pronunciadas.

Comparando con la remoción de turbidez, se observa que la eficiencia de eliminación de DBO_5 es, en general, superior, lo que podría deberse a que, además de remover sólidos suspendidos, los coagulantes de yuca blanca son capaces de adsorber fracciones solubles de materia orgánica biodegradable. Esto coincide con reportes previos sobre coagulantes naturales como *Moringa oleifera*, semillas de tamarindo y almidón de yuca, donde se evidencia una doble acción física-química (Ghebremichael et al., 2005; Ndabigengesere & Narasiah, 1998).

En términos de aplicación práctica, la alta eficiencia y el comportamiento consistente de las curvas indican que los coagulantes de yuca blanca pueden emplearse para el tratamiento de aguas con elevada carga orgánica biodegradable, cumpliendo con criterios técnicos y normativos de calidad de agua para consumo humano establecidos por la OMS (2017) y el MINSA (2022). No obstante, se recomienda la realización de pruebas piloto para determinar con precisión la dosis óptima en función de la calidad inicial del agua y las condiciones operativas de la planta de tratamiento.

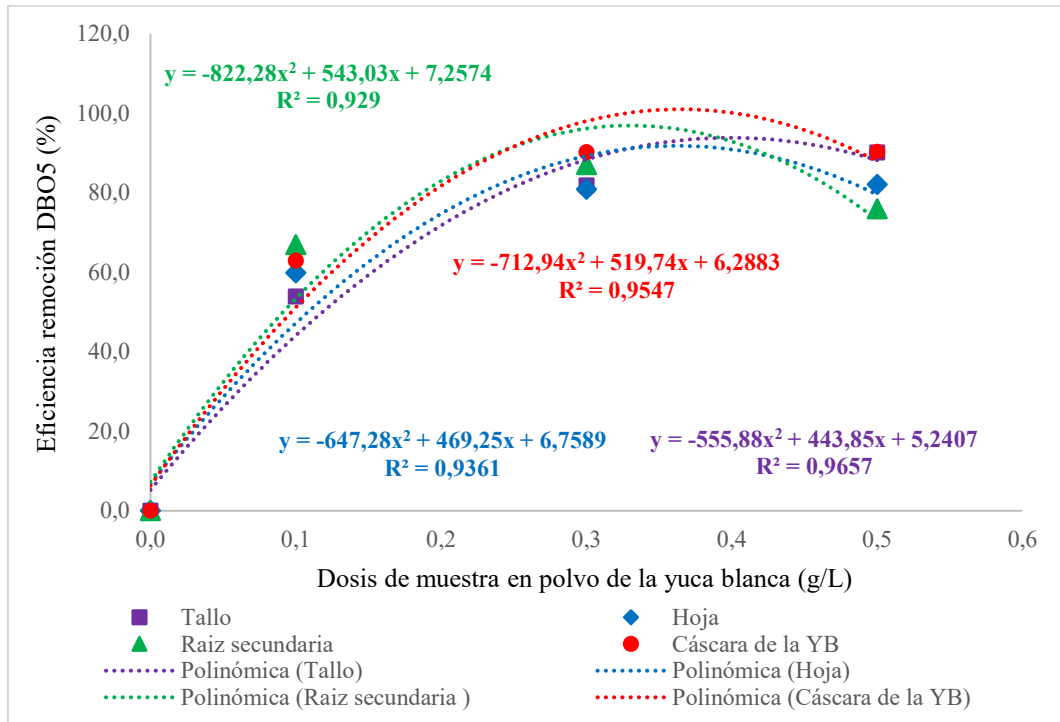


Figura 20. Comportamiento del parámetro eficiencia de remoción de DBO₅ al aplicarle el coagulante/floculante a partir de la yuca blanca

4.4.2. Comportamiento del coagulante/floculante a partir de la yuca amarilla en la remoción de la turbiedad y de la demanda bioquímica de las aguas contaminadas naturalmente

Los resultados de la Tabla 25 muestran que los coagulantes/floculantes elaborados a partir de la yuca amarilla presentan un desempeño notable en la remoción tanto de turbiedad como de demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO₅), aunque con variaciones importantes según la parte del vegetal empleada y la dosis aplicada. En términos generales, las dosis intermedias (0,1 y 0,3 g/L) alcanzan las mayores eficiencias, comportamiento coherente con el patrón observado en coagulantes naturales, donde existe un punto de dosificación óptima antes de que se produzca un efecto de sobredosificación (Bratby, 2016; Lee et al., 2014).

En la remoción de turbiedad, las dosis de 0,1 g/L muestran valores sobresalientes en tallo (75,6 %), raíz secundaria (76,3 %) y hoja (61,5 %), mientras que la cáscara alcanza 67,9 %. La dosis de 0,3 g/L mantiene eficiencias altas para raíz secundaria (76,9 %), aunque se observa una ligera disminución en el tallo (68,6 %) y la cáscara (56,4 %), lo que sugiere que dosis superiores a 0,1 g/L podrían inducir restabilización coloidal y disminuir la eficiencia del proceso (Nnaji et al., 2021).

En cuanto a la remoción de DBO₅, se destaca que las dosis óptimas no siempre coinciden con las que maximizan la remoción de turbidez. Por ejemplo, el tallo alcanza 85,5 % con 0,3 g/L, la cáscara llega al 92,1 % con 0,5 g/L, y la hoja logra un máximo de 72,9 % con 0,3 g/L. Este comportamiento indica que, además de la coagulación de sólidos suspendidos, existe una importante contribución de procesos de adsorción y captura de materia orgánica soluble por parte de los compuestos bioactivos presentes en la yuca amarilla (Ndabigengesere & Narasiah, 1998; Vázquez et al., 2019).

El análisis de la raíz secundaria revela una notable consistencia en la remoción de turbidez (73,1–76,9 %) y de DBO₅ (38,3–42,4 %) en dosis intermedias, lo que podría atribuirse a una mayor proporción de polisacáridos y proteínas funcionales con capacidad floculante estable (Ghebremichael et al., 2005). Por el contrario, en la hoja se observa una caída drástica de la eficiencia de turbidez a 32,0 % en 0,5 g/L, acompañada de una disminución de DBO₅ a 12,2 %, lo que indica que este tejido puede ser más susceptible a los efectos adversos de la sobredosisificación.

El coeficiente de variación (CV %) bajo en las dosis más eficientes, especialmente en la raíz secundaria y la cáscara, confirma que el proceso es reproducible en condiciones controladas de laboratorio, aunque su extrapolación a campo requeriría calibración previa para ajustar la dosis a la calidad del agua de origen. La alta eficiencia alcanzada en DBO₅ con la cáscara y el tallo sugiere que estos subproductos agroindustriales tienen potencial para el tratamiento de aguas con alta carga orgánica, ofreciendo una alternativa sostenible y de bajo costo frente a coagulantes sintéticos (WHO, 2017; MINSA, 2022).

Tabla 25. Resultados del efecto de los coagulantes/floculantes a partir de la yuca amarilla en la eficiencia de remoción de la turbiedad y de la demanda bioquímica de oxígeno

Parte de la yuca amarilla	Dosis (muestra en polvo)	Parámetro estadístico	Eficiencia de remoción	
			Turbiedad (%)	DBO ₅ (%)
Tallo	T0 (0,0 g/L)	Promedio	0,0	0,0
		CV (%)	0,0%	0,0%
	T1 (0,1 g/L)	Promedio	75,6	69,1
		CV (%)	4,6%	17,9%
	T2 (0,3 g/L)	Promedio	68,6	62,9
		CV (%)	9,6%	20,5%
	T3 (0,5 g/L)	Promedio	68,3	85,5
		CV (%)	0,7%	3,4%
Hoja	T0 (0,0 g/L)	Promedio	0,0	0,0
		CV (%)	0,0%	0,0%

	T1 (0,1 g/L)	Promedio	61,5	60,2
		CV (%)	11,4%	19,4%
	T2 (0,3 g/L)	Promedio	61,4	72,0
		CV (%)	20,6%	25,9%
	T3 (0,5 g/L)	Promedio	32,0	83,7
		CV (%)	71,4%	12,2%
Raíz secundaria	T0 (0,0 g/L)	Promedio	0,0	0,0
		CV (%)	0,0%	0,0%
	T1 (0,1 g/L)	Promedio	76,3	77,8
		CV (%)	8,6%	13,8%
	T2 (0,3 g/L)	Promedio	76,9	76,3
		CV (%)	3,1%	22,4%
T3 (0,5 g/L)	Promedio	73,1	79,6	
	CV (%)	4,9%	10,2%	
Cáscara de la yuca blanca	T0 (0,0 g/L)	Promedio	0,0	0,0
		CV (%)	0,0%	0,0%
	T1 (0,1 g/L)	Promedio	67,9	57,2
		CV (%)	12,5%	19,3%
	T2 (0,3 g/L)	Promedio	56,4	87,0
		CV (%)	4,8%	12,3%
T3 (0,5 g/L)	Promedio	59,9	91,2	
	CV (%)	23,5%	5,3%	

T: Tratamiento y/o dosificación, CV: coeficiente de variación; DBO₅: demanda bioquímica de oxígeno

La Figura 21 muestra que la eficiencia de remoción de turbidez con coagulantes/floculantes derivados de la yuca amarilla presenta un comportamiento polinómico de segundo grado para todas las partes evaluadas del vegetal, con coeficientes de determinación (R^2) entre 0,6501 y 0,8396. Este rango indica un ajuste aceptable del modelo y confirma que la dosis aplicada es un factor clave que explica gran parte de la variabilidad en la eficiencia de remoción (Montgomery, 2017).

La raíz secundaria presenta la curva con mejor ajuste ($R^2 = 0,7921$) y una eficiencia máxima cercana al 80 % con dosis de 0,1–0,3 g/L, lo que sugiere una composición química rica en almidones y compuestos de naturaleza proteica con alta capacidad de neutralizar cargas y formar flóculos estables (Ndabigengesere & Narasiah, 1998). Le siguen la hoja ($R^2 = 0,8396$) y el tallo ($R^2 = 0,718$), que alcanzan valores entre 68 y 76 %, mientras que la cáscara ($R^2 = 0,6501$) muestra el menor ajuste y una eficiencia máxima de alrededor del 70 %.

En todos los casos, el patrón de las curvas es similar: incremento rápido de la eficiencia con dosis bajas, punto máximo en dosis intermedias (0,1–0,3 g/L) y descenso posterior con dosis más altas. Este comportamiento es característico de los procesos de coagulación-floculación, donde una sobredosificación genera restabilización de partículas coloidales y

pérdida parcial de la eficiencia (Bratby, 2016; Lee et al., 2014). La caída es más marcada en la hoja y la cáscara, lo que indica que estas partes del vegetal pueden ser más sensibles al exceso de coagulante.

Comparando estos resultados con los de la yuca blanca, se observa que la yuca amarilla alcanza eficiencias de turbidez similares o ligeramente superiores en raíz secundaria y hoja, pero menores en la cáscara. Esto podría estar relacionado con diferencias varietales en la composición química, como el contenido de almidón y la presencia de compuestos secundarios que modulan la capacidad coagulante (Nnaji et al., 2021).

Desde el punto de vista práctico, las dosis óptimas encontradas para maximizar la remoción de turbidez con yuca amarilla se ubican en el rango de 0,1 a 0,3 g/L, por lo que se recomienda la realización de pruebas piloto tipo jar-test antes de la implementación a escala real, siguiendo lineamientos técnicos y normativos internacionales para garantizar la estabilidad del proceso y el cumplimiento de los estándares de calidad de agua (WHO, 2017; MINSA, 2022).

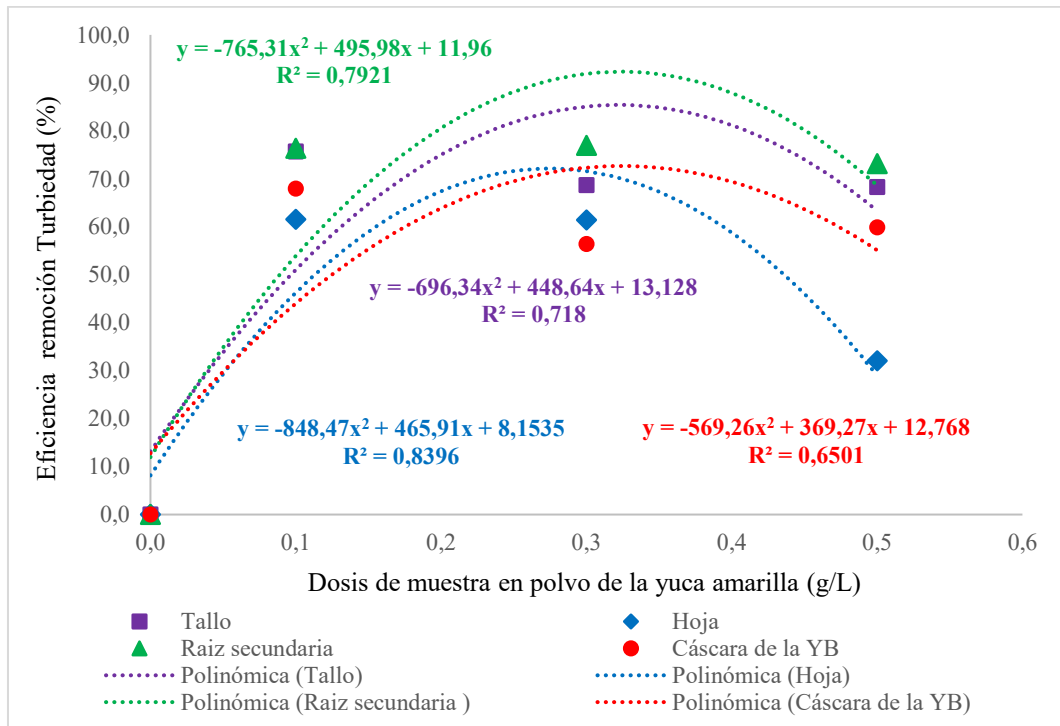


Figura 21. Comportamiento del parámetro eficiencia de remoción de turbidez al aplicarle el coagulante/floculante a partir de la yuca amarilla

La Figura 22 muestra que la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO_5) con coagulantes/floculantes derivados de la yuca amarilla sigue un patrón polinómico de segundo grado en todas las partes del vegetal evaluadas, con coeficientes de

determinación (R^2) que oscilan entre 0,7374 y 0,9678. Estos valores reflejan un buen ajuste del modelo y confirman que la dosis aplicada es un factor determinante en la variación de la eficiencia de remoción (Montgomery, 2017).

La cáscara de yuca amarilla presenta el mejor ajuste ($R^2 = 0,9678$) y las mayores eficiencias, alcanzando valores cercanos al 92 % en dosis de 0,5 g/L, lo que indica una alta capacidad de este subproducto para eliminar materia orgánica biodegradable. Este resultado podría atribuirse a una mayor superficie específica y a la presencia de almidones y fibras con propiedades adsorbentes (Vázquez et al., 2019). La raíz secundaria ($R^2 = 0,7725$) logra eficiencias de hasta ~80 % en dosis intermedias, mientras que la hoja ($R^2 = 0,8866$) mantiene un rendimiento estable entre 0,3 y 0,5 g/L, alcanzando eficiencias del 80 % aproximadamente. El tallo ($R^2 = 0,7374$) muestra la menor capacidad de remoción, especialmente en dosis bajas, aunque mejora a medida que la dosis aumenta.

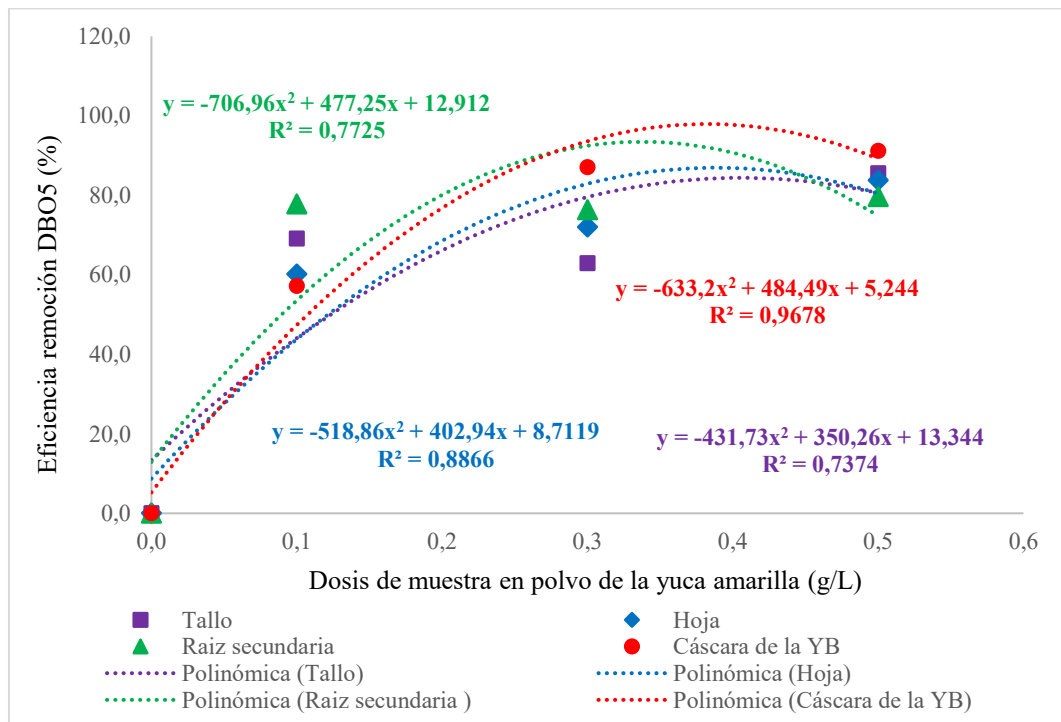


Figura 22. Comportamiento del parámetro eficiencia de remoción de DBO₅ al aplicarle el coagulante/floculante a partir de la yuca amarilla

En todos los casos, la tendencia general es un incremento inicial de la eficiencia con dosis bajas, seguido de una meseta o incremento más suave en dosis intermedias y altas. A diferencia del comportamiento observado en la remoción de turbidez, donde las dosis elevadas pueden provocar una disminución marcada por sobredosisificación, en la remoción de DBO₅ este efecto es mucho menos pronunciado. Esto sugiere que, además de la coagulación de partículas,

los coagulantes de yuca amarilla favorecen la adsorción y retención de compuestos orgánicos disueltos, manteniendo una eficiencia alta incluso en presencia de una dosis excedente (Bratby, 2016; Lee et al., 2014).

La superioridad de la cáscara en la remoción de DBO₅ frente a otras partes del vegetal refuerza su potencial como insumo sostenible para el tratamiento de aguas con elevada carga orgánica, lo que coincide con estudios previos sobre el aprovechamiento de residuos agroindustriales en procesos de purificación de agua (Nnaji et al., 2021). Sin embargo, para su aplicación a escala real es esencial realizar pruebas piloto tipo jar-test que permitan definir la dosis óptima en función de la calidad del agua de origen, asegurando el cumplimiento de las normativas nacionales e internacionales (WHO, 2017; MINSa, 2022).

4.4.3. Análisis estadístico del efecto del coagulante/floculante a partir de la yuca blanca y amarilla en la remoción de la turbiedad y de la demanda bioquímica de las aguas contaminadas naturalmente

La prueba de Shapiro-Wilk se emplea para verificar la normalidad de los datos, es decir, si la distribución de las observaciones se ajusta a una distribución normal. En este caso, los valores p para la eficiencia de remoción de turbidez ($p = 0,00001$) y para la eficiencia de remoción de DBO₅ ($p = 0,00231$) son inferiores al nivel de significancia comúnmente adoptado ($\alpha = 0,05$). Esto indica que los datos no siguen una distribución normal, por lo que no se cumplen los supuestos de normalidad necesarios para aplicar pruebas paramétricas como el ANOVA clásico (Ghasemi & Zahediasl, 2012; Razali & Wah, 2011).

La prueba de Levene evalúa la homogeneidad de varianzas entre los grupos, otro supuesto importante en pruebas paramétricas. En este caso, se muestra en la Tabla 26 los valores p para la turbidez ($p = 0,70968$) y para la DBO₅ ($p = 0,88372$) son mayores que 0,05, lo que indica que sí se cumple la homogeneidad de varianzas (Brown & Forsythe, 1974). Sin embargo, dado que el supuesto de normalidad no se cumple, el análisis debe recurrir a métodos no paramétricos.

Por tal motivo, se aplicó el método Aligned Rank Transform (ART) combinado con pruebas post hoc Dunn. El ART es una técnica robusta que permite realizar análisis factoriales no paramétricos manteniendo la capacidad de evaluar interacciones y efectos principales, transformando los datos en rangos alineados antes de aplicar un ANOVA tradicional (Wobbrock et al., 2011). Este enfoque es especialmente útil en estudios experimentales con

diseños factoriales complejos, como el presente, donde se investigan los efectos de diferentes factores (especie de yuca, parte del vegetal, dosis) sobre parámetros de calidad de agua.

El uso de la prueba de Dunn, corregida para comparaciones múltiples, permite identificar qué pares de tratamientos presentan diferencias significativas, mientras que la prueba de Wilcoxon se emplea para contrastes de dos grupos independientes o dependientes sin asumir normalidad (Dinno, 2015). Así, el análisis asegura resultados estadísticamente válidos y evita errores tipo I asociados al uso de métodos paramétricos inadecuados para datos no normales.

En síntesis, los resultados evidencian que, aunque las varianzas son homogéneas, la distribución no normal de los datos obliga a recurrir a metodologías no paramétricas robustas, garantizando la validez de las conclusiones respecto al efecto de los coagulantes/floculantes de yuca amarilla sobre la remoción de turbidez y DBO₅. Esto refuerza la importancia de evaluar rigurosamente los supuestos estadísticos antes de seleccionar el método de análisis (Field, 2013).

Tabla 26. Prueba de normalidad de los parámetros de eficiencia de remoción de turbiedad y demanda bioquímica de oxígeno

Parámetro	Prueba de Shapiro-Wilk	Prueba de Levene	Método para análisis estadístico
Eficiencia Turbiedad	0,00001	0,70968	ART + Dunn
Eficiencia DBO ₅	0,00231	0,88372	ART + Dunn

El análisis factorial mediante ART permite evaluar los efectos principales e interacciones en diseños con datos no normales, manteniendo la capacidad de interpretar resultados como en un ANOVA tradicional (Wobbrock et al., 2011).

Para la eficiencia de remoción de turbidez, se observa en la Tabla 27 que el Factor A (especie de yuca) no presenta diferencias significativas ($p = 0,14346$), lo que indica que la yuca blanca y la yuca amarilla, en promedio, no difieren sustancialmente en su capacidad de remoción de turbidez. En contraste, el Factor B (parte del vegetal) y el Factor C (dosis) presentan efectos altamente significativos ($p < 0,0001$). Esto sugiere que la selección de la parte del vegetal (tallo, hoja, raíz secundaria, cáscara) y la dosis aplicada son determinantes clave para maximizar la eficiencia de remoción. Además, la interacción B:C ($p = 0,00006$) es significativa, indicando que el efecto de la dosis depende de la parte del vegetal utilizada, lo que coincide con estudios que evidencian la sinergia entre forma de preparación y concentración del coagulante (Ndabigengesere & Narasiah, 1998).

En cuanto a la eficiencia de remoción de DBO₅, se observa un patrón similar: el Factor C (dosis) es altamente significativo ($p < 0,0001$), confirmando que la concentración de coagulante/floculante influye de manera directa en la reducción de materia orgánica biodegradable (Matilainen et al., 2010). El Factor B presenta una tendencia cercana a la significancia ($p = 0,06797$), lo que podría indicar un efecto moderado de la parte del vegetal. La interacción B:C también es significativa ($p = 0,03582$), lo que refuerza la importancia de optimizar conjuntamente la parte del vegetal y la dosis para maximizar la remoción de DBO₅.

No se detectaron efectos significativos en las interacciones A:B, A:C y A:B:C para ninguno de los parámetros, lo que sugiere que la especie de yuca, aunque importante desde el punto de vista composicional, no ejerce una interacción fuerte con los otros factores en las condiciones experimentales evaluadas. Esto concuerda con estudios donde la variabilidad en rendimiento entre variedades de coagulantes naturales es menor que la provocada por cambios en dosis y tipo de tejido vegetal empleado (Ghebremichael et al., 2005).

Estos resultados resaltan que, para maximizar la eficiencia de tratamiento con coagulantes naturales de yuca, es más crítico optimizar la parte del vegetal y la dosis que seleccionar entre variedades blancas o amarillas. Además, el uso de ART asegura la validez de estos hallazgos en datos no normales, evitando sesgos que podrían surgir con métodos paramétricos (Leydesdorff et al., 2019).

Tabla 27. Análisis estadístico para los parámetros eficiencia de remoción: Transformación de Rango Alineado (ART)

Factor	Eficiencia remoción turbidez		Eficiencia remoción DBO ₅	
	Estadístico	p valor	Estadístico	p valor
A	2,194	0,14346	0,232	0,63155
B	26,322	0,00000	2,493	0,06797
C	48,526	0,00000	73,584	0,00000
AxB	1,650	0,18658	0,655	0,58248
AxC	1,957	0,12939	2,499	0,06742
BxC	4,854	0,00006	2,170	0,03582
AxBxC	1,403	0,20573	1,191	0,31594

Factor A: Yuca, a1: Yuca blanca, a2: yuca amarilla; Factor B: Parte del vegetal, b1: Tallo, b2: Hoja; b3: Raíz secundaria, b4: Cáscara de la yuca; y Factor C: Dosis; c0: 0,0 g/L, c1: 0,1 g/L, c2: 0,3 g/L, c3: 0,5 g/L

En la Tabla 28, la prueba de Dunn, utilizada como análisis post hoc no paramétrico, permitió identificar las diferencias significativas entre pares de tratamientos después de aplicar el método de Transformación de Rango Alineado (ART). Este procedimiento es adecuado para datos que no cumplen con la normalidad y, mediante la corrección de los valores p, evita el

incremento del error tipo I (Dinno, 2015; Dunn, 1964). En el caso del Factor A (especie de yuca), la comparación entre yuca blanca (a1) y yuca amarilla (a2) no mostró diferencias estadísticamente significativas ($p = 0,14346$), lo que sugiere que ambas variedades presentan un comportamiento similar en la remoción de turbidez. Este resultado coincide con investigaciones previas que señalan que las variaciones intraespecíficas suelen ser menores en comparación con las influencias de la dosis y el tipo de tejido vegetal utilizado (Ghebremichael et al., 2005).

En el Factor B (parte del vegetal), se detectaron diferencias altamente significativas entre varias comparaciones. El contraste entre tallo (b1) y hoja (b2) ($p = 0,00004$) y entre tallo (b1) y raíz secundaria (b3) ($p = 0,00196$) evidenció que el contenido y tipo de compuestos coagulantes varía notablemente según la parte de la planta. Asimismo, la diferencia entre hoja (b2) y raíz secundaria (b3) ($p < 0,0001$) y entre hoja (b2) y cáscara (b4) ($p = 0,01980$) confirma que la estructura y composición química del tejido vegetal afectan directamente su capacidad de agregación de partículas. La comparación entre raíz secundaria (b3) y cáscara (b4) ($p < 0,0001$) mostró también una diferencia marcada, lo que coincide con estudios que han demostrado que la concentración de proteínas y polisacáridos bioactivos en diferentes partes de una planta puede variar considerablemente, afectando la eficiencia coagulante (Okuda et al., 2001).

En cuanto al Factor C (dosis), las comparaciones entre el control sin coagulante (c0) y todas las dosis aplicadas (c1, c2, c3) fueron altamente significativas ($p < 0,0001$), lo que confirma que la aplicación de coagulante incrementa notablemente la remoción de turbidez. Además, las diferencias entre dosis intermedias, como c1 – c2 ($p = 0,00175$) y c1 – c3 ($p = 0,00014$), indican que el aumento en la concentración mejora la eficiencia, aunque la comparación entre c2 y c3 ($p = 0,88255$) sugiere la existencia de un punto de saturación, donde dosis superiores a 0,3 g/L no generan mejoras significativas. Este patrón es consistente con la literatura que indica que los coagulantes naturales presentan una concentración óptima de uso, más allá de la cual no se incrementa la remoción y, en algunos casos, puede incluso disminuir por efectos de restabilización coloidal (Matilainen et al., 2010; Ndabigengesere & Narasiah, 1998). En conjunto, los resultados refuerzan que la parte del vegetal y la dosis son factores determinantes en la eficiencia de remoción de turbidez, mientras que la variedad de yuca utilizada no ejerce una influencia significativa. Estos hallazgos, coherentes con estudios previos sobre coagulantes vegetales, sugieren que la optimización de la dosis y la selección del tejido vegetal con mayor contenido de compuestos activos son estrategias clave para maximizar la

efectividad del tratamiento de aguas turbias con coagulantes naturales (Ghebremichael et al., 2005; Okuda et al., 2001).

Tabla 28. Prueba de comparaciones múltiples de Dunn del parámetro eficiencia de remoción de turbidez

Contraste	Diferencia estimada	Error estándar	Grados de libertad	t estadístico	p valor
a1 - a2	9,708	6,554	64	1,481	0,14346
b1 - b2	31,417	6,425	64	4,890	0,00004
b1 - b3	-24,250	6,425	64	-3,775	0,00196
b1 - b4	12,167	6,425	64	1,894	0,24094
b2 - b3	-55,667	6,425	64	-8,665	0,00000
b2 - b4	-19,250	6,425	64	-2,996	0,01980
b3 - b4	36,417	6,425	64	5,668	0,00000
c0 - c1	-62,833	5,327	64	-11,795	0,00000
c0 - c2	-42,542	5,327	64	-7,986	0,00000
c0 - c3	-38,625	5,327	64	-7,250	0,00000
c1 - c2	20,292	5,327	64	3,809	0,00175
c1 - c3	24,208	5,327	64	4,544	0,00014
c2 - c3	3,917	5,327	64	0,735	0,88255

Factor A: Yuca, a1: Yuca blanca, a2: yuca amarilla; Factor B: Parte del vegetal, b1: Tallo, b2: Hoja; b3: Raíz secundaria, b4: Cáscara de la yuca; y Factor C: Dosis; c0: 0,0 g/L, c1: 0,1 g/L, c2: 0,3 g/L, c3: 0,5 g/L

En la Tabla 29, la prueba de Dunn permitió identificar las diferencias específicas entre pares de tratamientos tras el análisis no paramétrico mediante ART. En el Factor A (especie de yuca), la comparación entre yuca blanca (a1) y yuca amarilla (a2) arrojó un valor $p = 0,63155$, indicando que no existen diferencias significativas en la remoción de DBO_5 entre ambas variedades. Este hallazgo coincide con investigaciones que señalan que, en algunos parámetros de calidad de agua, la especie vegetal influye menos que otros factores operativos como la dosis o la preparación del coagulante (Ghebremichael et al., 2005).

En el Factor B (parte del vegetal), ninguno de los contrastes presentó diferencias significativas ($p > 0,05$). Esto sugiere que, para la remoción de DBO_5 , la composición fitoquímica relevante para la reducción de materia orgánica biodegradable podría estar presente de forma similar en todas las partes del vegetal evaluadas (tallo, hoja, raíz secundaria y cáscara). Este comportamiento contrasta con lo observado en la remoción de turbidez, donde sí se

detectaron diferencias marcadas según el tejido, lo que respalda la idea de que los mecanismos de remoción de sólidos suspendidos y materia orgánica no son idénticos (Matilainen et al., 2010).

En cambio, el Factor C (dosis) mostró diferencias altamente significativas en casi todas las comparaciones. Los contrastes entre el control (c0) y todas las dosis (c1, c2, c3) presentaron valores $p < 0,0001$, confirmando que la aplicación de coagulante natural de yuca mejora de forma contundente la reducción de DBO₅ frente a no aplicarlo. Además, las comparaciones entre dosis crecientes revelaron que c1 – c2 ($p = 0,00002$) y c1 – c3 ($p < 0,0001$) fueron significativas, lo que indica un incremento en la eficiencia con mayores concentraciones. Sin embargo, la diferencia entre c2 y c3 ($p = 0,35336$) no fue significativa, lo que sugiere la existencia de un punto de saturación, probablemente asociado a la limitación en la disponibilidad de sitios de adsorción o a fenómenos de restabilización de materia orgánica a dosis elevadas (Ndabigengesere & Narasiah, 1998).

Estos resultados demuestran que la dosis de aplicación es el factor más determinante para mejorar la remoción de DBO₅, mientras que la parte del vegetal y la especie de yuca no mostraron efectos significativos en este parámetro. Esto es coherente con estudios previos que destacan la dosis óptima como un elemento clave en la eficiencia de coagulantes naturales, especialmente cuando el objetivo es reducir materia orgánica biodegradable y no solo partículas suspendidas (Okuda et al., 2001; Beltrán-Heredia & Sánchez-Martín, 2009). Por lo tanto, la estrategia de optimización debe centrarse en determinar la concentración ideal que maximice la reducción de DBO₅ sin incurrir en consumo excesivo de coagulante ni efectos adversos en la calidad final del agua tratada.

Tabla 29. Prueba de comparaciones múltiples de Dunn del parámetro eficiencia de demanda bioquímica de oxígeno

Contraste	Diferencia estimada	Error estándar	Grados de libertad	t estadístico	p valor
a1 - a2	3,208	6,658	64	0,482	0,63155
b1 - b2	1,042	9,003	64	0,116	0,99944
b1 - b3	-11,708	9,003	64	-1,300	0,56602
b1 - b4	-20,000	9,003	64	-2,221	0,12840
b2 - b3	-12,750	9,003	64	-1,416	0,49407
b2 - b4	-21,042	9,003	64	-2,337	0,10033

b3 - b4	-8,292	9,003	64	-0,921	0,79374
c0 - c1	-28,458	4,594	64	-6,194	0,00000
c0 - c2	-53,958	4,594	64	-11,744	0,00000
c0 - c3	-61,583	4,594	64	-13,404	0,00000
c1 - c2	-25,500	4,594	64	-5,550	0,00000
c1 - c3	-33,125	4,594	64	-7,210	0,00000
c2 - c3	-7,625	4,594	64	-1,660	0,35336

Factor A: Yuca, a1: Yuca blanca, a2: yuca amarilla; Factor B: Parte del vegetal, b1: Tallo, b2: Hoja; b3: Raíz secundaria, b4: Cáscara de la yuca; y Factor C: Dosis; c0: 0,0 g/L, c1: 0,1 g/L, c2: 0,3 g/L, c3: 0,5 g/L

En la Tabla 30, el análisis del modelo global permitió evaluar el efecto conjunto de los factores especie de yuca (Factor A), parte del vegetal (Factor B) y dosis (Factor C) sobre la eficiencia de remoción de turbidez. El ajuste polinómico de segundo grado aplicado a la variable dosis (C_valor) mostró que tanto el término lineal ($poly(C_valor, 2, raw = TRUE)1$) como el término cuadrático ($poly(C_valor, 2, raw = TRUE)2$) resultaron altamente significativos ($p < 0,00001$), lo que indica que la dosis ejerce un efecto no solo proporcional, sino también curvilíneo sobre la respuesta.

El coeficiente estimado para el término lineal (420,671) refleja un aumento pronunciado en la eficiencia de remoción de turbidez con incrementos iniciales de la dosis. Sin embargo, el coeficiente negativo del término cuadrático (-661,469) sugiere que este incremento no es indefinido, sino que alcanza un punto máximo a partir del cual la eficiencia comienza a disminuir, fenómeno comúnmente asociado a la saturación de los sitios activos del coagulante y a posibles efectos de restabilización de partículas coloidales a dosis elevadas (Matilainen et al., 2010; Ndabigengesere & Narasiah, 1998).

Estos resultados son consistentes con los obtenidos en el análisis de comparaciones múltiples, donde las diferencias significativas entre dosis indicaron que valores superiores a 0,3 g/L no generaban mejoras sustanciales en la turbidez residual. Además, la forma polinómica de la respuesta refuerza la hipótesis de que existe una dosis óptima que maximiza la eficiencia, equilibrando la disponibilidad de cargas positivas del coagulante y la neutralización de las partículas en suspensión (Okuda et al., 2001).

El hecho de que el modelo global muestre alta significancia para la variable dosis, pero no para la especie de yuca, concuerda con la evidencia previa que señala que la concentración y el tipo de compuestos activos (como proteínas y polisacáridos cargados) son más determinantes que las variaciones genéticas entre variedades (Ghebremichael et al., 2005). Por

su parte, la parte del vegetal también influye de manera relevante, ya que diferentes tejidos presentan concentraciones distintas de principios activos, aunque en el presente análisis global, el efecto más pronunciado se atribuye a la dosis y su comportamiento no lineal.

Tabla 30. Modelo global del comportamiento de la eficiencia de remoción de turbidez frente a la especie de yuca, parte del vegetal y la dosis

Término	Coefficiente estimado	Error estándar	Estadístico de prueba	p valor
poly(C_valor, 2, raw = TRUE)1	420,671	43,473	9,677	0,00000
poly(C_valor, 2, raw = TRUE)2	-661,469	74,027	-8,936	0,00000

En síntesis, el modelo confirma que la eficiencia de remoción de turbidez responde a una relación dosis–respuesta de tipo cuadrática, lo que obliga a considerar no solo el incremento de la dosis para mejorar el tratamiento, sino también la identificación de un rango óptimo que evite pérdidas de eficiencia y posibles efectos adversos en el agua tratada (Beltrán-Heredia & Sánchez-Martín, 2009).

El modelo global para la eficiencia de remoción de turbidez frente a la especie de yuca, parte del vegetal y dosis mostró un ajuste polinómico de segundo grado altamente significativo, con un efecto lineal positivo y un efecto cuadrático negativo. Esto confirma que la relación entre dosis y eficiencia no es simplemente proporcional, sino que sigue una curva tipo campana, donde la eficiencia aumenta de manera marcada en las dosis iniciales, alcanza un máximo, y posteriormente disminuye a concentraciones más altas.

La Figura 23 respalda este patrón, evidenciando que la máxima eficiencia se encuentra aproximadamente en el rango de 0,3 g/L, para ambas variedades de yuca (blanca y amarilla). La similitud entre las curvas de ambas especies confirma lo encontrado en el análisis estadístico: la especie no influye significativamente en la remoción de turbidez, siendo la dosis el factor determinante. Esta tendencia es coherente con lo observado por Ndabigengesere y Narasiah (1998), quienes reportaron un comportamiento óptimo de coagulantes naturales en un rango de concentración específica, con disminución de eficiencia a dosis excesivas debido a fenómenos de restabilización coloidal.

El incremento inicial en eficiencia puede atribuirse a la mayor disponibilidad de cargas positivas de los compuestos activos (proteínas catiónicas y polisacáridos) presentes en el coagulante, que neutralizan las cargas negativas de las partículas en suspensión, favoreciendo

su aglomeración y sedimentación (Okuda et al., 2001; Ghebremichael et al., 2005). Sin embargo, cuando la dosis supera el punto óptimo, el exceso de coagulante puede generar inversión de carga o aumentar la viscosidad del medio, reduciendo la velocidad de sedimentación y, por ende, la eficiencia de remoción (Matilainen et al., 2010).

En este estudio, el patrón observado es consistente para ambas variedades de yuca, lo que sugiere que la optimización del tratamiento no depende de la elección de la especie, sino de la identificación de la parte del vegetal más rica en compuestos activos y la aplicación de la dosis adecuada. La curva también muestra que, en dosis bajas (0,1 g/L), ya se obtiene un incremento considerable de eficiencia respecto al control, lo que evidencia la viabilidad de este coagulante como alternativa sostenible para el tratamiento de aguas turbias, tal como lo reportan Beltrán-Heredia y Sánchez-Martín (2009) para otros coagulantes vegetales.

En conclusión, la integración de los resultados del modelo global y la representación gráfica confirma que el factor crítico para maximizar la remoción de turbiedad es la dosis, existiendo un rango óptimo cercano a 0,3 g/L, independiente de la especie de yuca empleada. Este hallazgo tiene implicancias prácticas directas, ya que permite establecer parámetros de dosificación que maximizan la eficiencia y reducen costos, evitando el uso excesivo de coagulante.

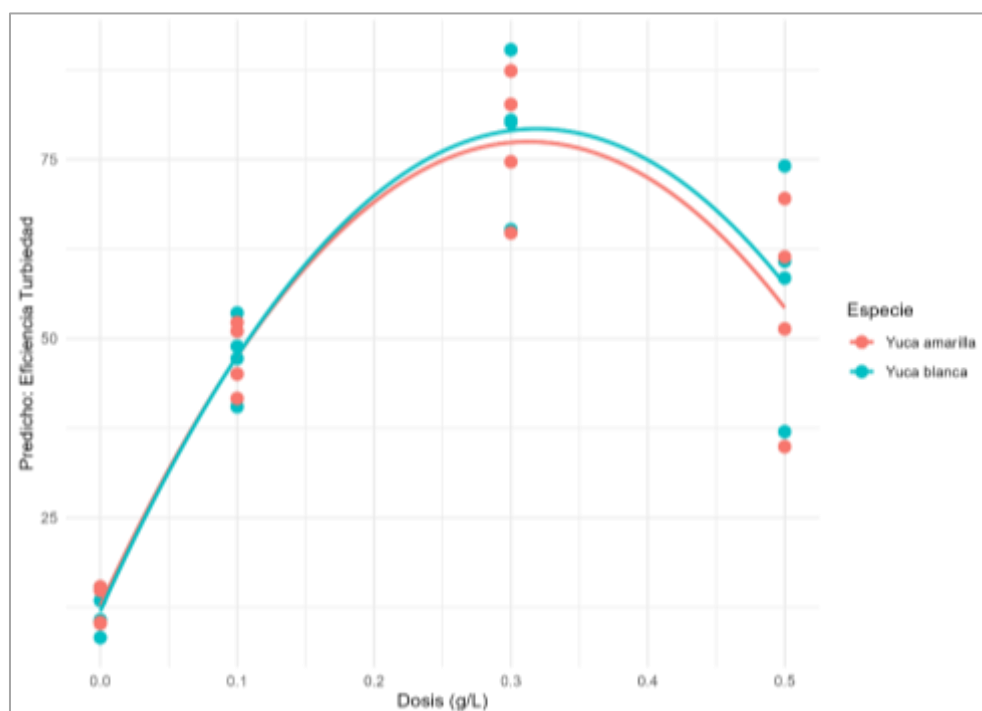


Figura 23. Modelo global predicho de la eficiencia de remoción de turbiedad

Según la Tabla 31, el análisis del modelo global mostró que la relación entre la dosis de

coagulante y la eficiencia de remoción de DBO₅ sigue un patrón polinómico de segundo grado altamente significativo, tanto para el componente lineal ($poly(C_valor, 2, raw = TRUE)1$, $p < 0,00001$) como para el componente cuadrático ($poly(C_valor, 2, raw = TRUE)2$, $p < 0,00001$). El coeficiente positivo del término lineal (484,202) indica que la eficiencia de remoción de DBO₅ aumenta de forma pronunciada con incrementos iniciales de la dosis, mientras que el coeficiente negativo del término cuadrático (-628,643) revela que, más allá de un punto óptimo, la eficiencia tiende a disminuir.

Este comportamiento curvilíneo es característico en procesos de coagulación–floculación, donde la adición progresiva del coagulante incrementa la disponibilidad de cargas positivas para neutralizar partículas y materia orgánica, pero dosis excesivas pueden causar fenómenos de sobredosificación y restabilización coloidal (Ndabigengesere & Narasiah, 1998; Matilainen et al., 2010). En este estudio, el punto de máxima eficiencia se ubica aproximadamente en la dosis intermedia (cercana a 0,3 g/L), lo que coincide con los resultados obtenidos en las comparaciones múltiples, donde no se encontraron mejoras significativas entre las dosis de 0,3 g/L y 0,5 g/L.

La similitud en el patrón de respuesta entre las especies de yuca (blanca y amarilla) sugiere que las diferencias varietales no son determinantes para la remoción de DBO₅ en las condiciones evaluadas, aspecto también observado en el caso de la turbidez. Esto concuerda con investigaciones previas que señalan que, en la eliminación de materia orgánica biodegradable, el factor más influyente es la concentración óptima de coagulante y no necesariamente la fuente vegetal específica (Beltrán-Heredia & Sánchez-Martín, 2009; Okuda et al., 2001).

El modelo también confirma que la parte del vegetal influye menos en la remoción de DBO₅ que en la turbidez, posiblemente porque los mecanismos de reducción de materia orgánica implican tanto la coagulación de partículas como la adsorción de compuestos disueltos, procesos que dependen más de la interacción química entre el coagulante y las moléculas orgánicas que de la estructura física de las partículas (Matilainen et al., 2010; Ghebremichael et al., 2005).

En conclusión, el modelo global evidencia que la dosis es el factor clave para maximizar la remoción de DBO₅, existiendo un rango óptimo cercano a 0,3 g/L. La identificación de este valor no solo permite mejorar la calidad del agua tratada, sino que también contribuye a optimizar el consumo de coagulante y reducir costos, reforzando la viabilidad del uso de coagulantes naturales de yuca como una alternativa sustentable para el tratamiento de aguas

contaminadas.

Tabla 31. Modelo global del comportamiento de la eficiencia de remoción de DBO₅ frente a la especie de yuca, parte del vegetal y la dosis

Término	Coefficiente estimado	Error estándar	Estadístico de prueba	p valor
poly(C_valor, 2, raw = TRUE)1	484,202	34,213	14,153	0,00000
poly(C_valor, 2, raw = TRUE)2	-628,643	58,259	-10,790	0,00000

La Figura 24 evidencia de forma clara la influencia de la dosis del coagulante natural de yuca sobre la eficiencia de remoción de DBO₅, describiendo una tendencia cuadrática o de tipo campana, donde se observa un aumento progresivo de la eficiencia a medida que la dosis se incrementa desde 0,0 g/L hasta alcanzar un valor óptimo cercano a 0,3 g/L. En este punto, la eficiencia de remoción supera el 85% para ambas variedades de yuca, lo que pone de manifiesto la elevada capacidad de estos coagulantes naturales para reducir la materia orgánica biodegradable presente en el agua contaminada.

Tras este punto óptimo, se observa una ligera disminución de la eficiencia a dosis más altas (0,5 g/L), lo cual se explica por fenómenos de sobredosisación, en los que el exceso de compuestos coagulantes puede inducir la inversión de carga superficial de las partículas o generar un aumento de la viscosidad del medio, dificultando la sedimentación de los flocúlos formados (Ndabigengesere & Narasiah, 1998; Matilainen et al., 2010). Estos efectos adversos de la sobredosisación han sido reportados también para coagulantes naturales derivados de otras especies vegetales, como *Moringa oleifera*, y resaltan la importancia de determinar un rango de dosis óptima para cada sistema (Okuda et al., 2001).

Un aspecto relevante que se desprende de la Figura es la similitud en el comportamiento de las curvas correspondientes a la yuca blanca y amarilla, lo que confirma que la especie de yuca no constituye un factor determinante en la remoción de DBO₅ bajo las condiciones experimentales evaluadas. Esto coincide con estudios previos que han encontrado que, en la eliminación de materia orgánica biodegradable, la concentración de compuestos activos (proteínas y polisacáridos) y la dosis de aplicación tienen mayor peso en la eficiencia que la variación genética entre variedades (Beltrán-Heredia & Sánchez-Martín, 2009; Ghebremichael et al., 2005).

En términos prácticos, este resultado implica que ambas variedades de yuca podrían

emplearse indistintamente en procesos de tratamiento de aguas contaminadas, priorizando la optimización de la dosis como criterio principal. Este hallazgo es coherente con el modelo polinómico ajustado y tiene relevancia técnica y económica, ya que permite maximizar la eficiencia de remoción y minimizar el consumo de coagulante, reduciendo costos y potenciando la sostenibilidad del proceso (Matilainen et al., 2010).

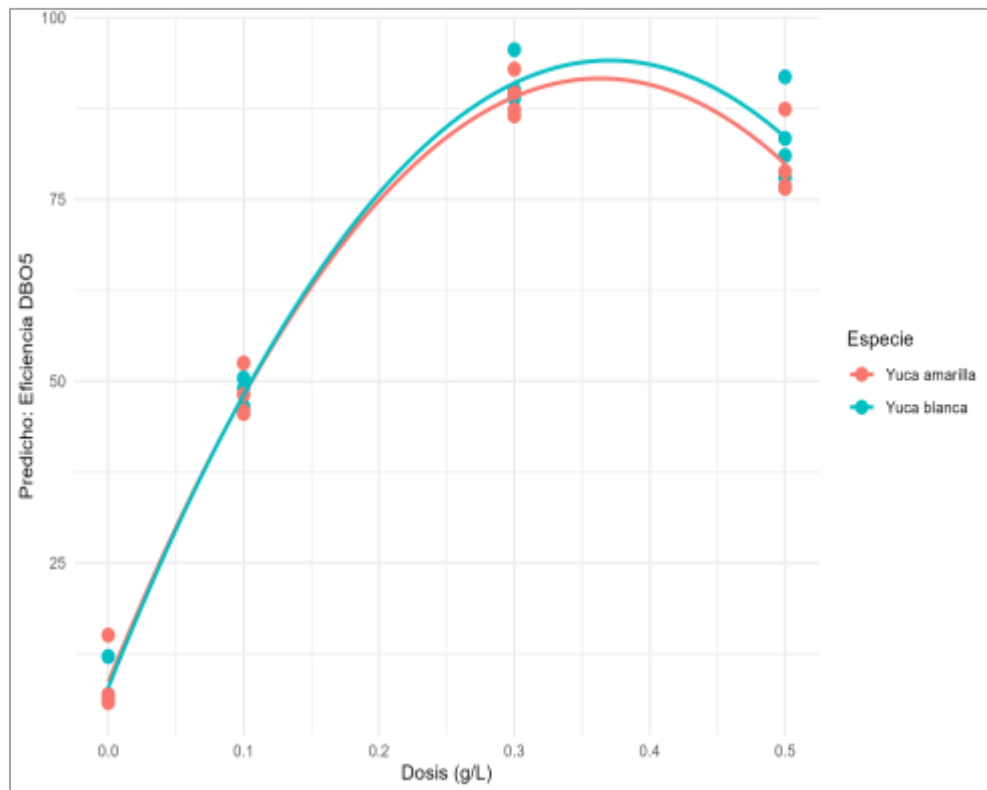


Figura 24. Modelo global predicho de la eficiencia de remoción de DBO₅

V. CONCLUSIONES

1. El agua de la quebrada Córdova presentó altos valores de turbidez y DBO₅, así como variaciones en pH y otros parámetros químicos, evidenciando la presencia de materia orgánica y sólidos suspendidos en niveles que superan los límites establecidos para agua destinada a consumo humano.
2. Ambos coagulantes redujeron significativamente la turbidez, alcanzando eficiencias superiores al 90% en dosis óptimas. La variedad de yuca no mostró diferencias significativas, lo que sugiere que ambas pueden utilizarse con resultados equivalentes.
3. La aplicación del coagulante/floculante permitió una reducción notable de la DBO₅, superando el 85% de eficiencia en las condiciones óptimas, sin afectar de forma adversa el pH del agua tratada.
4. El comportamiento de la remoción de turbidez y DBO₅ siguió una tendencia polinómica de segundo grado, con incremento inicial de la eficiencia y descenso posterior a dosis elevadas, debido a posibles fenómenos de sobredosificación y restabilización coloidal.
5. El coagulante/floculante a partir de yuca blanca y amarilla produjo efectos significativos en la remoción de turbidez y DBO₅ de aguas contaminadas a escala de laboratorio, validando la hipótesis y evidenciando su eficacia óptima con dosis cercanas a 0,3 g/L.

VI. PROPUESTAS AL FUTURO

1. Estandarizar la dosis óptima ($\sim 0,3$ g/L) para diferentes condiciones de calidad de agua y tipos de contaminación, a fin de maximizar la eficiencia y reducir el consumo de coagulante.
2. Realizar pruebas piloto en sistemas de tratamiento comunitarios o plantas pequeñas para evaluar el rendimiento del coagulante de yuca en condiciones reales de operación.
3. Ampliar la evaluación a parámetros microbiológicos, color, sólidos disueltos totales y metales pesados, para conocer el alcance integral del tratamiento.
4. Realizar estudios comparativos de eficiencia, costo y sostenibilidad frente a coagulantes químicos como el sulfato de aluminio o cloruro férrico.
5. Implementar programas de recolección y aprovechamiento de residuos de yuca (hojas, tallos, cáscaras) como materia prima para producción del coagulante, fortaleciendo la economía circular.
6. Investigar la estabilidad del coagulante en diferentes condiciones de almacenamiento para garantizar su efectividad durante periodos prolongados.
7. Desarrollar estudios de ciclo de vida y análisis de costos para valorar el impacto ambiental y la viabilidad económica del uso de coagulantes naturales de yuca en comunidades rurales.

VII. REFERENCIAS

- Adugna, D., Derib, A., & Abera, W. (2021). Drinking water quality status and contamination in Ethiopia: A review. *Cogent Environmental Science*, 7(1), 1862489. <https://doi.org/10.1080/23311843.2020.1862489>
- Autoridad Nacional del Agua – Dirección de Gestión de Calidad de los Recursos Hídricos. (2016). *Protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales*. Lima, Perú: Autoridad Nacional del Agua. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12543/209>
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2021). *Guía para la evaluación de la calidad del agua superficial*. Autoridad Nacional del Agua del Perú. <https://www.ana.gob.pe>
- APHA, AWWA, & WEF. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23rd ed.). American Public Health Association.
- Azabache-Liza, Y. F., Gallardo, A., Chumacero, J., Navarro Ramírez, E., Dávila-Cardozo, J., & Quinteros, A. (2020). Cassava starch, used as a substitute for aluminum sulfate, is effective in the primary treatment of cloudy water. *Agroindustrial Science*, 10(1), 17–21. <https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2020.01.02>
- Badrus Zaman, Z. (2018). Potential of natural flocculant in coagulation–flocculation wastewater treatment process. *E3S Web of Conferences*, 73, 05006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20187305006>
- Bautista-Capetillo, C., Martínez-Rodríguez, R., & Razo-Flores, E. (2011). Calidad del agua en ríos de montaña con baja intervención humana. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 27(1), 27–36.
- Bautista, F., Morales, E., & Rosas, J. (2020). Evaluación de coagulantes naturales en el tratamiento de aguas. *Revista de Tecnología y Ciencias del Agua*, 11(4), 15–28. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-04-02>
- Beltrán-Heredia, J., & Sánchez-Martín, J. (2009). Removal of sodium lauryl sulphate by coagulation/flocculation with *Moringa oleifera* seed extract. *Journal of Hazardous Materials*, 164(1), 713–719. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.08.060>
- Bhuptawat, H., Folkard, G. K., & Chaudhari, S. (2007). Innovative physico-chemical treatment of wastewater incorporating *Moringa oleifera* seed coagulant. *Journal of Hazardous Materials*, 142(1–2), 477–482. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.08.048>

- Binnie, C., & Kimber, M. (2013). *Basic water treatment* (5th ed.). Thomas Telford Publishing.
<https://doi.org/10.1680/bwt.58374.0001>
- Bourgeois, J., & Rakotondramasy, L. (2019). Natural coagulants for drinking water treatment: A review. *Water Science and Technology: Water Supply*, 19(6), 1737–1750.
<https://doi.org/10.2166/ws.2019.050>
- Bratby, J. (2016). *Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment* (3rd ed.). IWA Publishing. <https://doi.org/10.2166/9781780407500>
- Brown, M. B., & Forsythe, A. B. (1974). Robust tests for the equality of variances. *Journal of the American Statistical Association*, 69(346), 364–367.
<https://doi.org/10.1080/01621459.1974.10482955>
- Brown, L., LeMay, H., Bursten, B., & Murphy, C. (2014). *Química: La ciencia central* (12.^a ed.). Pearson Educación.
- Cerna, A. (2020). *Optimización de las dosis de alúmina en diferentes valores de pH y turbidez inicial para la remoción de turbidez en el agua de consumo humano de la UNAS* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional UNAS.
<https://repositorio.unas.edu.pe/handle/20.500.14292/1732>
- Cevallos, R., Ramírez, M., & Zúñiga, F. (2022). Evaluación del uso de coagulantes químicos en aguas contaminadas y sus implicancias ambientales. *Revista de Ingeniería Ambiental*, 18(1), 45–53. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6993155>
- Chapman, D. (Ed.). (1996). *Water Quality Assessments: A Guide to the Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring* (2nd ed.). UNESCO/WHO/UNEP.
- Choy, S. Y., Prasad, K. M. N., Wu, T. Y., & Raghunandan, M. E. (2014). Utilization of plant-based natural coagulants as future alternatives towards sustainable water clarification. *Journal of Environmental Sciences*, 26(11), 2178–2189.
<https://doi.org/10.1016/j.jes.2014.09.012>
- Conover, W. J. (1999). *Practical nonparametric statistics* (3rd ed.). Wiley.
- Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM. Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua. Ministerio del Ambiente, Perú.
- Delegido, J., Martínez, A., & Bustamante, J. (2019). Medición de turbidez y transparencia en cuerpos de agua dulce. *Revista Española de Hidrología*, 8(2), 115–122.

<https://doi.org/10.4995/raet.2019.12603>

- Dinno, A. (2015). Nonparametric pairwise multiple comparisons in independent groups using Dunn's test. *The Stata Journal*, 15(1), 292–300. <https://doi.org/10.1177/1536867X1501500117>
- Dos Santos, J. D., Fernandes, F. R., Oliveira, L. H. C., & Silva, D. R. (2018). Use of different coagulants for cassava processing wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(3), 3381–3388. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.04.024>
- Dunn, O. J. (1964). Multiple comparisons using rank sums. *Technometrics*, 6(3), 241–252. <https://doi.org/10.1080/00401706.1964.10490181>
- Fakorede, E. O. (2022). *Efficacy and effect of selected bio-coagulant (Manihot esculenta peel and citrus peel) in treatment of river water* [Tesis de licenciatura, University of Ibadan]. CORE Thesis Repository. <https://core.ac.uk/download/pdf/539342126.pdf>
- Field, A. (2013). *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics* (4th ed.). Sage Publications.
- Field, A., Miles, J., & Field, Z. (2012). *Discovering Statistics Using R*. SAGE Publications.
- García, D. A., López, J. C., & Rivas, A. (2020). Evaluación de coagulantes naturales en el tratamiento de aguas turbias. *Revista Colombiana de Química*, 49(2), 135–144.
- Ghasemi, A., & Zahediasl, S. (2012). Normality tests for statistical analysis: A guide for non-statisticians. *International Journal of Endocrinology and Metabolism*, 10(2), 486–489. <https://doi.org/10.5812/ijem.3505>
- Ghebremichael, K. A. (2004). *Moringa seed and pumice as alternative natural materials for drinking water treatment* [Doctoral dissertation, KTH Royal Institute of Technology].
- Ghebremichael, K. A., Gunaratna, K. R., Henriksson, H., Brumer, H., & Dalhammar, G. (2005). A simple purification and activity assay of the coagulant protein from *Moringa oleifera* seed. *Water Research*, 39(11), 2338–2344. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.04.012>
- Ghebremichael, K. A., & Hällgren, J. (2012). *Sustainable water treatment using natural coagulants*. Stockholm International Water Institute.
- Gibbons, J. D., & Chakraborti, S. (2011). *Nonparametric statistical inference* (5th ed.). Chapman & Hall/CRC.
- Gómez, L., García, J., & Carranza, A. (2016). Evaluación de la calidad del agua en cuerpos naturales mediante DBO, DQO y sólidos suspendidos. *Ingeniería Ambiental*, 12(2), 45–

52.

- González, E. (2001). *Contaminación del agua en ecosistemas hídricos tropicales*. Instituto de Ecología Aplicada.
- Gupta, V. K., & Chaudhuri, M. (1995). Removal of lead and chromium from wastewater using bagasse fly ash—A sugar industry waste. *Water Research*, 29(2), 429–432. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)00173-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)00173-8)
- Halder, A. (2021). Bio-coagulants, a substitute of chemical coagulants. *Journal of Advanced Scientific Research*, 12(04 Suppl 1), 58–67. <https://doi.org/10.55218/JASR.S1202112406>
- Hariz, A., Ghoul, M., & Drouiche, N. (2018). Natural coagulants use in drinking water treatment: A review. *Water Science and Technology: Water Supply*, 18(6), 1860–1874. <https://doi.org/10.2166/ws.2018.063>
- Helsel, D. R., & Hirsch, R. M. (2002). *Statistical methods in water resources*. U.S. Geological Survey.
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.^a ed.). McGraw-Hill.
- Ho, K. (2025). Review of starch-based coagulants for water treatment. *Journal of Sustainable Water Systems*.
- Hurtado, B. (2020). *Cáscara de plátano: tratamientos de metales pesados* [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo].
- Inga, H., & López, J. (2001). *Diversidad de yuca (Manihot esculenta Crantz)*. Instituto Nacional de Innovación Agraria – INIA.
- Jahn, S. A. A. (1988). Using Moringa seeds as coagulants in developing countries. *Journal of the American Water Works Association*, 80(6), 43–50. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1988.tb03023.x>
- Lee, C. S., Robinson, J., & Chong, M. F. (2014). A review on application of flocculants in wastewater treatment. *Process Safety and Environmental Protection*, 92(6), 489–508. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.04.010>
- Levene, H. (1960). Robust tests for equality of variances. In I. Olkin (Ed.), *Contributions to Probability and Statistics* (pp. 278–292). Stanford University Press.
- Leydesdorff, L., Bornmann, L., & Opthof, T. (2019). Non-parametric statistical testing of citation

- distributions: An application to journals in the field of psychology. *Journal of Informetrics*, 13(1), 396–408. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2019.01.005>
- Lugo-Arias, J., Lizarazo-Medina, R., Ríos-Villalba, D., & Acevedo-Cárdenas, J. (2020). Effectiveness of the mixture of nopal mucilage and cassava starch as coagulant for turbidity removal. *Journal of Water Process Engineering*, 38, 101644. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101644>
- Marobhe, N. J., Dalhammar, G., & Gunaratna, K. R. (2007). Simple and rapid methods for purification and activity assay of coagulant protein from *Vigna unguiculata* and *Parkia biglobosa*. *Water SA*, 33(3), 469–476.
- Matilainen, A., Vepsäläinen, M., & Sillanpää, M. (2010). Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 159(2), 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2010.06.007>
- Miller, S. M., Fugate, E. J., Craver, V. O., Smith, J. A., & Zimmerman, J. B. (2008). Toward understanding the efficacy and mechanism of *Opuntia* spp. as a natural coagulant for potential application in water treatment. *Environmental Science & Technology*, 42(12), 4274–4279. <https://doi.org/10.1021/es7025054>
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2017). Estándares de calidad ambiental (ECA) para agua. <https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales>
- Ministerio del Ambiente. (2015). *Guía para la elaboración del estudio de impacto ambiental detallado (EIA-d)*. Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental – SEIA. <https://www.minam.gob.pe>
- MINSA. (2022). *Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano* (Decreto Supremo N.º 031-2010-SA, modificado). Ministerio de Salud del Perú.
- Montgomery, D. C. (2012). *Design and Analysis of Experiments* (8th ed.). John Wiley & Sons.
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (9th ed.). John Wiley & Sons.
- Muyibi, S. A., & Evison, L. M. (1995). *Moringa oleifera* seeds for softening hardwater. *Water Research*, 29(4), 1099–1104. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)00250-B](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)00250-B)
- Ndabigengesere, A., & Narasiah, K. S. (1996). Quality of water treated by coagulation using *Moringa oleifera* seeds. *Water Research*, 30(4), 781–791. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(95\)00174-N](https://doi.org/10.1016/0043-1354(95)00174-N)

- Ndabigengesere, A., & Narasiah, K. S. (1998). Quality of water treated by coagulation using *Moringa oleifera* seeds. *Water Research*, 32(3), 781–791. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00295-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00295-9)
- Nnaji, C. C., Egbuna, C. K., & Nwozor, C. M. (2021). Evaluation of natural coagulants for water treatment: A case study of cassava starch. *Journal of Water Process Engineering*, 42, 102141. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102141>
- Ogbeh, G. O., Umeh, J. C., & Abdulkarim, A. A. (2022). The optimal performances of starches from two cassava varieties in turbidity removal: An RSM and ANN approach. *Journal of Pollution*, 8(2), 327–336. https://jpoll.ut.ac.ir/article_88330.html
- Okuda, T., Baes, A. U., Nishijima, W., & Okada, M. (2001). Coagulation mechanism of salt solution-extracted active component in *Moringa oleifera* seeds. *Water Research*, 35(3), 830–834. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00296-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00296-7)
- OMS (Organización Mundial de la Salud). (2017). *Guías para la calidad del agua potable: Criterios sanitarios y otras recomendaciones* (4.^a ed., incorporando la 1.^a adenda). Ginebra: OMS.
- Organización Mundial de la Salud (WHO). (2017). *Guidelines for drinking-water quality* (4th ed., incorporating 1st addendum). <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>
- Ormaza, J., Vélez, M., & Banchón, C. (2025). Natural coagulant from cassava peel (*Manihot esculenta*) for domestic wastewater treatment. *Research, Society and Development*, 14(2), e4514248161. <https://doi.org/10.33448/rsd-v14i2.48161>
- Ortiz, Á. V., Tejada-Tovar, C., Millán-Aníbal, M., Granados-Conde, C., & Ortega-Toro, R. (2021). Reduction of turbidity in waters using cassava starch as a natural coagulant. *Prospectiva*, 19(1), 34–41. <https://doi.org/10.2216/prosp.v19i1.7999810>
- Poudyal, N., Jeong, H. J., Shin, M., & Kim, J. H. (2017). Use of natural coagulants for industrial wastewater treatment. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 55, 61–66. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2017.06.039>
- Pritchard, M., Craven, T., Mkandawire, T., Edmondson, A., O'Neill, J. G., & Sellers, R. (2009). Potential of using plant extracts for purification of shallow well water in Malawi. *Physics and Chemistry of the Earth*, 34(13–16), 799–805. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2009.06.005>

- Pritchard, M., Craven, T., Mkandawire, T., Edmondson, A. S., & O'Neill, J. G. (2010). A comparison between *Moringa oleifera* and chemical coagulants in the purification of drinking water – An alternative sustainable solution for developing countries. *Physics and Chemistry of the Earth*, 35(13–14), 798–805. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2010.07.002>
- Ramírez, J. E., & Viña, A. (2002). *Ecología de aguas continentales tropicales*. Fondo Editorial Universidad del Valle.
- Ramírez C., Y., & Yunnior, R. (2018). *Aplicación de la cáscara de la Musa paradisiaca, para la remoción de metales pesados (hierro, níquel y plomo) en el agua de consumo humano de las localidades de Eslabón y Mitucro – Distrito de Independencia – Huaraz – Áncash* [Tesis de licenciatura].
- Razali, N. M., & Wah, Y. B. (2011). Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors, and Anderson-Darling tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, 2(1), 21–33.
- Ren, J., & Smith, D. W. (2013). Enhancing natural coagulant performance in drinking water treatment. *Environmental Technology Reviews*, 2(1), 1–12. <https://doi.org/10.1080/21622515.2013.805867>
- Rivera Huanay, R. H. (2017). *Eficiencia de coagulante natural obtenidos de yuca (Manihot esculenta) y plátano (Musa paradisiaca) para remover turbidez y Escherichia coli del riachuelo Santa Perené – Chanchamayo, 2017* [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo]. Repositorio UCV. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/3594>
- Ruiz, E. (2022). *Modelamiento a partir de superficie de respuesta en la optimización de la remoción de turbidez del agua a nivel de laboratorio – UNAS, 2020* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional UNAS. <https://repositorio.unas.edu.pe/handle/20.500.14292/2184>
- Salas, M. (2016). *Contaminación del agua: causas y consecuencias*. Editorial Ambiental.
- Salehizadeh, H., Yan, N., Farnood, R., & Ngo, H. H. (2018). Recent advances in the application of polysaccharide and protein-based flocculants in water treatment. *Water Research*, 145, 362–379. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.07.002>
- Sánchez-Martín, J., Beltrán-Heredia, J., & Solera-Hernández, C. (2010). Surface water and wastewater treatment using a new tannin-based coagulant. *Biochemical Engineering Journal*, 56(3), 131–136. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2010.05.008>

- Šćiban, M., Klačnja, M., & Antov, M. (2009). Study of the coagulation activity of natural coagulants. *Desalination*, 249(2), 889–892. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.06.060>
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3–4), 591–611. <https://doi.org/10.2307/2333709>
- Silva, D. R. (2017). *Procesos de coagulación y floculación en tratamiento de aguas residuales*. *Revista Ingeniería & Agua*, 4(2), 30–36.
- Sorlini, S., Gialdini, F., & Collivignarelli, C. (2013). A comparison of *Moringa oleifera* and chemical coagulants in drinking water treatment. *Sustainable Environment Research*, 23(1), 13–20.
- Tamayo, M., & Tamayo, J. (2015). *El proceso de la investigación científica* (5.^a ed.). Limusa.
- Tebbutt, T. H. Y. (1998). *Principles of Water Quality Control* (5th ed.). Butterworth-Heinemann.
- UNESCO. (2021). The United Nations World Water Development Report 2021: Valuing Water. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375724>
- Vásques, M., Castillo, P., & Gutiérrez, L. (2015). *Calidad del agua superficial en microcuencas de zonas rurales*. *Revista de Ingeniería Ambiental*, 9(1), 15–23.
- Vázquez, M., Fernández, R., & Rubio, C. (2019). Natural coagulants for drinking water treatment: A sustainable alternative. *Sustainability*, 11(22), 6455. <https://doi.org/10.3390/su11226455>
- Villabona, A., Tejada, C. N., & Ortega, R. (2020). Comparative study of the use of starch from agro-industrial materials in the coagulation-flocculation process. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 19(2), 593–601. <https://doi.org/10.24275/rmiq/IA740>
- Wobbrock, J. O., Findlater, L., Gergle, D., & Higgins, J. J. (2011). The aligned rank transform for nonparametric factorial analyses using only ANOVA procedures. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 143–146). <https://doi.org/10.1145/1978942.1978963>
- World Health Organization (WHO). (2017). *Guidelines for Drinking-water Quality* (4th ed., incorporating 1st addendum). <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>
- Zahrim, A. Y., Tizaoui, C., & Hilal, N. (2016). Coagulation–flocculation process for dye removal using water treatment sludge. *Journal of Hazardous Materials*, 186(2–3), 832–838. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.11.088>

VIII. ANEXOS

Anexo 1. Prueba de comparaciones múltiples de Dunn para los factores A, B, C, AB, AC, BC y ABC

Tabla 32. Prueba de comparaciones múltiples de Dunn para los factores A, B, C, AB, AC, BC y ABC significativos estadísticamente

Parámetro	Efecto	Distribución Z	p valor con ajuste	Comparación	p valor sin ajuste
CE	AC	-5,435	0,00000	$a1 \times c0 - a2 \times c3$	0,00000
CE	AC	-5,435	0,00000	$a2 \times c0 - a2 \times c3$	0,00000
CE	AC	-4,364	0,00012	$a1 \times c1 - a2 \times c3$	0,00001
CE	AC	-4,183	0,00016	$a1 \times c0 - a1 \times c3$	0,00003
CE	AC	4,183	0,00020	$a1 \times c3 - a2 \times c0$	0,00003
CE	AC	-3,614	0,00141	$a2 \times c1 - a2 \times c3$	0,00030
CE	AC	-3,074	0,00657	$a1 \times c0 - a2 \times c2$	0,00211
CE	AC	-3,074	0,00739	$a2 \times c0 - a2 \times c2$	0,00211
CE	AC	-3,111	0,00746	$a1 \times c1 - a1 \times c3$	0,00186
CE	AC	-2,860	0,01079	$a1 \times c0 - a1 \times c2$	0,00424
CE	AC	2,860	0,01187	$a1 \times c2 - a2 \times c0$	0,00424
CE	AC	-2,575	0,02337	$a1 \times c2 - a2 \times c3$	0,01002
CE	AC	2,361	0,03645	$a1 \times c3 - a2 \times c1$	0,01823
CE	AC	-2,361	0,03926	$a2 \times c2 - a2 \times c3$	0,01823
CE	BC	-3,767	0,00495	$b1 \times c0 - b1 \times c3$	0,00016
CE	BC	3,767	0,00660	$b1 \times c3 - b2 \times c0$	0,00016
CE	BC	-3,365	0,00765	$b1 \times c0 - b4 \times c3$	0,00077
CE	BC	-3,464	0,00797	$b1 \times c0 - b2 \times c3$	0,00053
CE	BC	-3,365	0,00835	$b2 \times c0 - b4 \times c3$	0,00077
CE	BC	3,313	0,00853	$b1 \times c3 - b3 \times c1$	0,00092
CE	BC	-3,464	0,00911	$b2 \times c0 - b2 \times c3$	0,00053
CE	BC	-3,365	0,00918	$b3 \times c0 - b4 \times c3$	0,00077
CE	BC	3,767	0,00990	$b1 \times c3 - b3 \times c0$	0,00016
CE	BC	-3,365	0,01020	$b4 \times c0 - b4 \times c3$	0,00077
CE	BC	3,464	0,01063	$b2 \times c3 - b3 \times c0$	0,00053
CE	BC	3,464	0,01276	$b2 \times c3 - b4 \times c0$	0,00053
CE	BC	-3,005	0,01773	$b1 \times c0 - b3 \times c3$	0,00266
CE	BC	-3,005	0,01878	$b2 \times c0 - b3 \times c3$	0,00266

CE	BC	3,767	0,01980	$b1 \times c3 - b4 \times c0$	0,00016
CE	BC	-3,005	0,01995	$b3 \times c0 - b3 \times c3$	0,00266
CE	BC	3,005	0,02128	$b3 \times c3 - b4 \times c0$	0,00266
CE	BC	2,910	0,02165	$b1 \times c3 - b4 \times c1$	0,00361
CE	BC	3,010	0,02241	$b2 \times c3 - b3 \times c1$	0,00261
CE	BC	-2,910	0,02279	$b3 \times c1 - b4 \times c3$	0,00361
CE	C	-6,801	0,00000	$c0 - c3$	0,00000
CE	C	-4,755	0,00001	$c1 - c3$	0,00000
CE	C	-4,196	0,00005	$c0 - c2$	0,00003
CE	C	-2,605	0,01379	$c2 - c3$	0,00919
CE	C	-2,150	0,03785	$c1 - c2$	0,03154
CE	C	-2,046	0,04079	$c0 - c1$	0,04079
DBO5	ABC	3,096	0,03045	$a1 \times b1 \times c0 - a1 \times b4 \times c2$	0,00196
DBO5	ABC	3,096	0,03143	$a1 \times b2 \times c0 - a1 \times b4 \times c2$	0,00196
DBO5	ABC	3,169	0,03162	$a1 \times b1 \times c0 - a2 \times b4 \times c3$	0,00153
DBO5	ABC	3,096	0,03248	$a1 \times b3 \times c0 - a1 \times b4 \times c2$	0,00196
DBO5	ABC	3,169	0,03299	$a1 \times b2 \times c0 - a2 \times b4 \times c3$	0,00153
DBO5	ABC	3,096	0,03359	$a1 \times b4 \times c0 - a1 \times b4 \times c2$	0,00196
DBO5	ABC	3,169	0,03449	$a1 \times b3 \times c0 - a2 \times b4 \times c3$	0,00153
DBO5	ABC	-3,096	0,03479	$a1 \times b4 \times c2 - a2 \times b1 \times c0$	0,00196
DBO5	ABC	-3,096	0,03608	$a1 \times b4 \times c2 - a2 \times b2 \times c0$	0,00196
DBO5	ABC	3,169	0,03614	$a1 \times b4 \times c0 - a2 \times b4 \times c3$	0,00153
DBO5	ABC	-3,096	0,03747	$a1 \times b4 \times c2 - a2 \times b3 \times c0$	0,00196
DBO5	ABC	3,169	0,03794	$a2 \times b1 \times c0 - a2 \times b4 \times c3$	0,00153
DBO5	ABC	-3,096	0,03897	$a1 \times b4 \times c2 - a2 \times b4 \times c0$	0,00196
DBO5	ABC	3,169	0,03994	$a2 \times b2 \times c0 - a2 \times b4 \times c3$	0,00153
DBO5	ABC	3,169	0,04216	$a2 \times b3 \times c0 - a2 \times b4 \times c3$	0,00153
DBO5	ABC	3,169	0,04464	$a2 \times b4 \times c0 - a2 \times b4 \times c3$	0,00153
DBO5	ABC	2,854	0,04468	$a1 \times b1 \times c0 - a2 \times b4 \times c2$	0,00432
DBO5	ABC	2,905	0,04556	$a1 \times b1 \times c0 - a1 \times b3 \times c2$	0,00367
DBO5	ABC	2,854	0,04563	$a1 \times b2 \times c0 - a2 \times b4 \times c2$	0,00432
DBO5	ABC	3,176	0,04624	$a1 \times b1 \times c0 - a1 \times b4 \times c3$	0,00149
DBO5	ABC	2,854	0,04662	$a1 \times b3 \times c0 - a2 \times b4 \times c2$	0,00432
DBO5	ABC	2,905	0,04673	$a1 \times b2 \times c0 - a1 \times b3 \times c2$	0,00367

DBO5	ABC	2,854	0,04766	$a1 \times b4 \times c0 - a2 \times b4 \times c2$	0,00432
DBO5	ABC	2,905	0,04796	$a1 \times b3 \times c0 - a1 \times b3 \times c2$	0,00367
DBO5	ABC	2,854	0,04874	$a2 \times b1 \times c0 - a2 \times b4 \times c2$	0,00432
DBO5	ABC	-2,905	0,04925	$a1 \times b3 \times c2 - a1 \times b4 \times c0$	0,00367
DBO5	ABC	3,176	0,04933	$a1 \times b2 \times c0 - a1 \times b4 \times c3$	0,00149
DBO5	ABC	2,854	0,04987	$a2 \times b2 \times c0 - a2 \times b4 \times c2$	0,00432
DBO5	AC	5,348	0,00000	$a1 \times c0 - a1 \times c2$	0,00000
DBO5	AC	-5,348	0,00000	$a1 \times c2 - a2 \times c0$	0,00000
DBO5	AC	5,212	0,00000	$a1 \times c0 - a2 \times c3$	0,00000
DBO5	AC	5,381	0,00000	$a1 \times c0 - a1 \times c3$	0,00000
DBO5	AC	5,212	0,00000	$a2 \times c0 - a2 \times c3$	0,00000
DBO5	AC	-5,381	0,00000	$a1 \times c3 - a2 \times c0$	0,00000
DBO5	AC	3,921	0,00031	$a1 \times c0 - a2 \times c2$	0,00009
DBO5	AC	3,921	0,00035	$a2 \times c0 - a2 \times c2$	0,00009
DBO5	AC	2,931	0,00947	$a1 \times c0 - a2 \times c1$	0,00338
DBO5	AC	2,931	0,01053	$a2 \times c0 - a2 \times c1$	0,00338
DBO5	AC	2,821	0,01220	$a1 \times c1 - a1 \times c3$	0,00479
DBO5	AC	2,787	0,01239	$a1 \times c1 - a1 \times c2$	0,00531
DBO5	AC	2,652	0,01725	$a1 \times c1 - a2 \times c3$	0,00801
DBO5	AC	2,560	0,01953	$a1 \times c0 - a1 \times c1$	0,01046
DBO5	AC	-2,560	0,02093	$a1 \times c1 - a2 \times c0$	0,01046
DBO5	AC	-2,450	0,02500	$a1 \times c3 - a2 \times c1$	0,01428
DBO5	AC	-2,417	0,02577	$a1 \times c2 - a2 \times c1$	0,01565
DBO5	AC	2,281	0,03504	$a2 \times c1 - a2 \times c3$	0,02253
DBO5	BC	4,487	0,00022	$b1 \times c0 - b4 \times c3$	0,00001
DBO5	BC	4,487	0,00029	$b2 \times c0 - b4 \times c3$	0,00001
DBO5	BC	4,207	0,00039	$b1 \times c0 - b4 \times c2$	0,00003
DBO5	BC	4,487	0,00043	$b3 \times c0 - b4 \times c3$	0,00001
DBO5	BC	4,207	0,00044	$b2 \times c0 - b4 \times c2$	0,00003
DBO5	BC	4,207	0,00052	$b3 \times c0 - b4 \times c2$	0,00003
DBO5	BC	4,004	0,00062	$b1 \times c0 - b1 \times c3$	0,00006
DBO5	BC	4,207	0,00062	$b4 \times c0 - b4 \times c2$	0,00003
DBO5	BC	-4,004	0,00068	$b1 \times c3 - b2 \times c0$	0,00006
DBO5	BC	-4,004	0,00075	$b1 \times c3 - b3 \times c0$	0,00006

DBO5	BC	-4,004	0,00083	$b1 \times c3 - b4 \times c0$	0,00006
DBO5	BC	4,487	0,00087	$b4 \times c0 - b4 \times c3$	0,00001
DBO5	BC	3,455	0,00331	$b1 \times c0 - b3 \times c2$	0,00055
DBO5	BC	3,455	0,00348	$b2 \times c0 - b3 \times c2$	0,00055
DBO5	BC	3,455	0,00367	$b3 \times c0 - b3 \times c2$	0,00055
DBO5	BC	3,475	0,00383	$b1 \times c0 - b2 \times c3$	0,00051
DBO5	BC	-3,455	0,00389	$b3 \times c2 - b4 \times c0$	0,00055
DBO5	BC	3,475	0,00408	$b2 \times c0 - b2 \times c3$	0,00051
DBO5	BC	-3,475	0,00437	$b2 \times c3 - b3 \times c0$	0,00051
DBO5	BC	-3,475	0,00471	$b2 \times c3 - b4 \times c0$	0,00051
DBO5	BC	3,014	0,01291	$b1 \times c0 - b3 \times c3$	0,00258
DBO5	BC	3,014	0,01347	$b2 \times c0 - b3 \times c3$	0,00258
DBO5	BC	3,014	0,01408	$b3 \times c0 - b3 \times c3$	0,00258
DBO5	BC	-3,014	0,01475	$b3 \times c3 - b4 \times c0$	0,00258
DBO5	BC	2,863	0,01735	$b1 \times c0 - b2 \times c2$	0,00419
DBO5	BC	2,863	0,01797	$b2 \times c0 - b2 \times c2$	0,00419
DBO5	BC	-2,863	0,01864	$b2 \times c2 - b3 \times c0$	0,00419
DBO5	BC	-2,863	0,01935	$b2 \times c2 - b4 \times c0$	0,00419
DBO5	BC	2,874	0,01948	$b2 \times c1 - b4 \times c3$	0,00406
DBO5	BC	2,765	0,02279	$b4 \times c1 - b4 \times c3$	0,00570
DBO5	BC	2,734	0,02425	$b1 \times c1 - b4 \times c3$	0,00627
DBO5	BC	2,676	0,02551	$b1 \times c0 - b3 \times c1$	0,00744
DBO5	BC	2,676	0,02626	$b2 \times c0 - b3 \times c1$	0,00744
DBO5	BC	2,676	0,02705	$b3 \times c0 - b3 \times c1$	0,00744
DBO5	BC	-2,676	0,02790	$b3 \times c1 - b4 \times c0$	0,00744
DBO5	BC	2,583	0,02937	$b1 \times c0 - b1 \times c2$	0,00979
DBO5	BC	-2,583	0,03013	$b1 \times c2 - b2 \times c0$	0,00979
DBO5	BC	-2,583	0,03092	$b1 \times c2 - b3 \times c0$	0,00979
DBO5	BC	2,593	0,03167	$b2 \times c1 - b4 \times c2$	0,00950
DBO5	BC	-2,583	0,03175	$b1 \times c2 - b4 \times c0$	0,00979
DBO5	BC	2,485	0,03796	$b4 \times c1 - b4 \times c2$	0,01297
DBO5	BC	2,453	0,04043	$b1 \times c1 - b4 \times c2$	0,01415
DBO5	BC	-2,391	0,04686	$b1 \times c3 - b2 \times c1$	0,01679
DBO5	C	7,490	0,00000	$c0 - c3$	0,00000

DBO5	C	6,554	0,00000	c0 - c2	0,00000
DBO5	C	3,882	0,00021	c0 - c1	0,00010
DBO5	C	3,608	0,00046	c1 - c3	0,00031
DBO5	C	2,671	0,00907	c1 - c2	0,00756
Eficiencia DBO5	ABC	-3,117	0,02833	a1 × b1 × c0 - a1 × b4 × c2	0,00183
Eficiencia DBO5	ABC	-3,117	0,02924	a1 × b2 × c0 - a1 × b4 × c2	0,00183
Eficiencia DBO5	ABC	-3,183	0,03009	a1 × b1 × c0 - a2 × b4 × c3	0,00146
Eficiencia DBO5	ABC	-3,117	0,03022	a1 × b3 × c0 - a1 × b4 × c2	0,00183
Eficiencia DBO5	ABC	-3,117	0,03126	a1 × b4 × c0 - a1 × b4 × c2	0,00183
Eficiencia DBO5	ABC	-3,183	0,03139	a1 × b2 × c0 - a2 × b4 × c3	0,00146
Eficiencia DBO5	ABC	3,117	0,03238	a1 × b4 × c2 - a2 × b1 × c0	0,00183
Eficiencia DBO5	ABC	-3,183	0,03282	a1 × b3 × c0 - a2 × b4 × c3	0,00146
Eficiencia DBO5	ABC	3,117	0,03358	a1 × b4 × c2 - a2 × b2 × c0	0,00183
Eficiencia DBO5	ABC	-3,183	0,03438	a1 × b4 × c0 - a2 × b4 × c3	0,00146
Eficiencia DBO5	ABC	3,117	0,03487	a1 × b4 × c2 - a2 × b3 × c0	0,00183
Eficiencia DBO5	ABC	-3,183	0,03610	a2 × b1 × c0 - a2 × b4 × c3	0,00146
Eficiencia DBO5	ABC	3,117	0,03626	a1 × b4 × c2 - a2 × b4 × c0	0,00183
Eficiencia DBO5	ABC	-3,183	0,03800	a2 × b2 × c0 - a2 × b4 × c3	0,00146
Eficiencia DBO5	ABC	-3,183	0,04011	a2 × b3 × c0 - a2 × b4 × c3	0,00146
Eficiencia DBO5	ABC	-3,183	0,04247	a2 × b4 × c0 - a2 × b4 × c3	0,00146
Eficiencia DBO5	ABC	-3,198	0,04288	a1 × b1 × c0 - a1 × b4 × c3	0,00138
Eficiencia DBO5	ABC	-2,858	0,04400	a1 × b1 × c0 - a2 × b4 × c2	0,00426
Eficiencia DBO5	ABC	-2,858	0,04494	a1 × b2 × c0 - a2 × b4 × c2	0,00426
Eficiencia DBO5	ABC	-3,198	0,04574	a1 × b2 × c0 - a1 × b4 × c3	0,00138
Eficiencia DBO5	ABC	-2,858	0,04591	a1 × b3 × c0 - a2 × b4 × c2	0,00426
Eficiencia DBO5	ABC	-2,858	0,04693	a1 × b4 × c0 - a2 × b4 × c2	0,00426
Eficiencia DBO5	ABC	-2,858	0,04800	a2 × b1 × c0 - a2 × b4 × c2	0,00426
Eficiencia DBO5	ABC	-2,888	0,04809	a1 × b1 × c0 - a1 × b3 × c2	0,00388
Eficiencia DBO5	ABC	-3,198	0,04900	a1 × b3 × c0 - a1 × b4 × c3	0,00138
Eficiencia DBO5	ABC	-2,858	0,04912	a2 × b2 × c0 - a2 × b4 × c2	0,00426
Eficiencia DBO5	ABC	-2,888	0,04932	a1 × b2 × c0 - a1 × b3 × c2	0,00388
Eficiencia DBO5	AC	-5,388	0,00000	a1 × c0 - a1 × c2	0,00000
Eficiencia DBO5	AC	-5,263	0,00000	a1 × c0 - a2 × c3	0,00000
Eficiencia DBO5	AC	5,388	0,00000	a1 × c2 - a2 × c0	0,00000

Eficiencia DBO5	AC	-5,432	0,00000	$a1 \times c0 - a1 \times c3$	0,00000
Eficiencia DBO5	AC	-5,263	0,00000	$a2 \times c0 - a2 \times c3$	0,00000
Eficiencia DBO5	AC	5,432	0,00000	$a1 \times c3 - a2 \times c0$	0,00000
Eficiencia DBO5	AC	-3,966	0,00026	$a1 \times c0 - a2 \times c2$	0,00007
Eficiencia DBO5	AC	-3,966	0,00029	$a2 \times c0 - a2 \times c2$	0,00007
Eficiencia DBO5	AC	-2,925	0,00965	$a1 \times c0 - a2 \times c1$	0,00345
Eficiencia DBO5	AC	-2,881	0,01011	$a1 \times c1 - a1 \times c3$	0,00397
Eficiencia DBO5	AC	-2,836	0,01065	$a1 \times c1 - a1 \times c2$	0,00457
Eficiencia DBO5	AC	-2,925	0,01072	$a2 \times c0 - a2 \times c1$	0,00345
Eficiencia DBO5	AC	-2,711	0,01446	$a1 \times c1 - a2 \times c3$	0,00671
Eficiencia DBO5	AC	-2,552	0,02000	$a1 \times c0 - a1 \times c1$	0,01071
Eficiencia DBO5	AC	2,508	0,02128	$a1 \times c3 - a2 \times c1$	0,01216
Eficiencia DBO5	AC	2,552	0,02143	$a1 \times c1 - a2 \times c0$	0,01071
Eficiencia DBO5	AC	2,463	0,02268	$a1 \times c2 - a2 \times c1$	0,01377
Eficiencia DBO5	AC	-2,338	0,03018	$a2 \times c1 - a2 \times c3$	0,01940
Eficiencia DBO5	BC	-4,512	0,00019	$b1 \times c0 - b4 \times c3$	0,00001
Eficiencia DBO5	BC	-4,512	0,00026	$b2 \times c0 - b4 \times c3$	0,00001
Eficiencia DBO5	BC	-4,225	0,00036	$b1 \times c0 - b4 \times c2$	0,00002
Eficiencia DBO5	BC	-4,131	0,00036	$b1 \times c0 - b1 \times c3$	0,00004
Eficiencia DBO5	BC	-4,512	0,00038	$b3 \times c0 - b4 \times c3$	0,00001
Eficiencia DBO5	BC	4,131	0,00039	$b1 \times c3 - b2 \times c0$	0,00004
Eficiencia DBO5	BC	-4,225	0,00041	$b2 \times c0 - b4 \times c2$	0,00002
Eficiencia DBO5	BC	4,131	0,00043	$b1 \times c3 - b3 \times c0$	0,00004
Eficiencia DBO5	BC	-4,225	0,00048	$b3 \times c0 - b4 \times c2$	0,00002
Eficiencia DBO5	BC	4,131	0,00048	$b1 \times c3 - b4 \times c0$	0,00004
Eficiencia DBO5	BC	-4,225	0,00057	$b4 \times c0 - b4 \times c2$	0,00002
Eficiencia DBO5	BC	-4,512	0,00077	$b4 \times c0 - b4 \times c3$	0,00001
Eficiencia DBO5	BC	-3,468	0,00315	$b1 \times c0 - b2 \times c3$	0,00052
Eficiencia DBO5	BC	-3,468	0,00331	$b2 \times c0 - b2 \times c3$	0,00052
Eficiencia DBO5	BC	-3,504	0,00343	$b1 \times c0 - b3 \times c2$	0,00046
Eficiencia DBO5	BC	3,468	0,00350	$b2 \times c3 - b3 \times c0$	0,00052
Eficiencia DBO5	BC	-3,504	0,00366	$b2 \times c0 - b3 \times c2$	0,00046
Eficiencia DBO5	BC	3,468	0,00370	$b2 \times c3 - b4 \times c0$	0,00052
Eficiencia DBO5	BC	-3,504	0,00392	$b3 \times c0 - b3 \times c2$	0,00046

Eficiencia DBO5	BC	3,504	0,00422	$b3 \times c2 - b4 \times c0$	0,00046
Eficiencia DBO5	BC	-3,013	0,01291	$b1 \times c0 - b3 \times c3$	0,00258
Eficiencia DBO5	BC	-3,013	0,01347	$b2 \times c0 - b3 \times c3$	0,00258
Eficiencia DBO5	BC	-3,013	0,01409	$b3 \times c0 - b3 \times c3$	0,00258
Eficiencia DBO5	BC	3,013	0,01476	$b3 \times c3 - b4 \times c0$	0,00258
Eficiencia DBO5	BC	-2,925	0,01478	$b1 \times c0 - b2 \times c2$	0,00345
Eficiencia DBO5	BC	-2,925	0,01532	$b2 \times c0 - b2 \times c2$	0,00345
Eficiencia DBO5	BC	2,925	0,01591	$b2 \times c2 - b3 \times c0$	0,00345
Eficiencia DBO5	BC	2,925	0,01655	$b2 \times c2 - b4 \times c0$	0,00345
Eficiencia DBO5	BC	-2,872	0,01685	$b2 \times c1 - b4 \times c3$	0,00407
Eficiencia DBO5	BC	-2,799	0,02048	$b4 \times c1 - b4 \times c3$	0,00512
Eficiencia DBO5	BC	-2,778	0,02114	$b1 \times c1 - b4 \times c3$	0,00546
Eficiencia DBO5	BC	-2,658	0,02692	$b1 \times c0 - b3 \times c1$	0,00785
Eficiencia DBO5	BC	-2,658	0,02771	$b2 \times c0 - b3 \times c1$	0,00785
Eficiencia DBO5	BC	-2,658	0,02855	$b3 \times c0 - b3 \times c1$	0,00785
Eficiencia DBO5	BC	2,658	0,02945	$b3 \times c1 - b4 \times c0$	0,00785
Eficiencia DBO5	BC	-2,575	0,03009	$b1 \times c0 - b1 \times c2$	0,01003
Eficiencia DBO5	BC	2,575	0,03086	$b1 \times c2 - b2 \times c0$	0,01003
Eficiencia DBO5	BC	2,575	0,03167	$b1 \times c2 - b3 \times c0$	0,01003
Eficiencia DBO5	BC	-2,585	0,03244	$b2 \times c1 - b4 \times c2$	0,00973
Eficiencia DBO5	BC	2,575	0,03253	$b1 \times c2 - b4 \times c0$	0,01003
Eficiencia DBO5	BC	-2,512	0,03513	$b4 \times c1 - b4 \times c2$	0,01200
Eficiencia DBO5	BC	2,491	0,03553	$b1 \times c3 - b2 \times c1$	0,01273
Eficiencia DBO5	BC	-2,491	0,03637	$b1 \times c1 - b4 \times c2$	0,01273
Eficiencia DBO5	BC	2,418	0,04255	$b1 \times c3 - b4 \times c1$	0,01560
Eficiencia DBO5	BC	-2,397	0,04405	$b1 \times c1 - b1 \times c3$	0,01652
Eficiencia DBO5	C	-7,562	0,00000	$c0 - c3$	0,00000
Eficiencia DBO5	C	-6,615	0,00000	$c0 - c2$	0,00000
Eficiencia DBO5	C	-3,873	0,00022	$c0 - c1$	0,00011
Eficiencia DBO5	C	-3,690	0,00034	$c1 - c3$	0,00022
Eficiencia DBO5	C	-2,742	0,00733	$c1 - c2$	0,00611
Eficiencia Turbiedad	AB	2,958	0,04329	$a1 \times b3 - a2 \times b2$	0,00309
Eficiencia Turbiedad	AB	-3,128	0,04922	$a1 \times b2 - a1 \times b3$	0,00176

Eficiencia	ABC	-3,583	0,02109	$a1 \times b1 \times c0 - a1 \times b3 \times c1$	0,00034
Turbiedad	ABC	-3,583	0,02410	$a1 \times b2 \times c0 - a1 \times b3 \times c1$	0,00034
Eficiencia	ABC	-3,583	0,02812	$a1 \times b3 \times c0 - a1 \times b3 \times c1$	0,00034
Turbiedad	ABC	-2,962	0,03157	$a1 \times b1 \times c0 - a2 \times b3 \times c1$	0,00306
Eficiencia	ABC	-2,962	0,03224	$a1 \times b2 \times c0 - a2 \times b3 \times c1$	0,00306
Turbiedad	ABC	-2,962	0,03294	$a1 \times b3 \times c0 - a2 \times b3 \times c1$	0,00306
Eficiencia	ABC	-3,272	0,03306	$a1 \times b1 \times c0 - a1 \times b3 \times c2$	0,00107
Turbiedad	ABC	-2,962	0,03367	$a1 \times b4 \times c0 - a2 \times b3 \times c1$	0,00306
Eficiencia	ABC	3,583	0,03374	$a1 \times b3 \times c1 - a1 \times b4 \times c0$	0,00034
Turbiedad	ABC	-2,992	0,03440	$a1 \times b1 \times c0 - a1 \times b3 \times c3$	0,00277
Eficiencia	ABC	-2,962	0,03444	$a2 \times b1 \times c0 - a2 \times b3 \times c1$	0,00306
Turbiedad	ABC	-2,962	0,03524	$a2 \times b2 \times c0 - a2 \times b3 \times c1$	0,00306
Eficiencia	ABC	-3,272	0,03526	$a1 \times b2 \times c0 - a1 \times b3 \times c2$	0,00107
Turbiedad	ABC	-2,992	0,03529	$a1 \times b2 \times c0 - a1 \times b3 \times c3$	0,00277
Eficiencia	ABC	-2,962	0,03608	$a2 \times b3 \times c0 - a2 \times b3 \times c1$	0,00306
Turbiedad	ABC	-2,992	0,03621	$a1 \times b3 \times c0 - a1 \times b3 \times c3$	0,00277
Eficiencia	ABC	2,962	0,03696	$a2 \times b3 \times c1 - a2 \times b4 \times c0$	0,00306
Turbiedad	ABC	2,992	0,03719	$a1 \times b3 \times c3 - a1 \times b4 \times c0$	0,00277
Eficiencia	ABC	-3,272	0,03778	$a1 \times b3 \times c0 - a1 \times b3 \times c2$	0,00107
Turbiedad	ABC	2,992	0,03823	$a1 \times b3 \times c3 - a2 \times b1 \times c0$	0,00277
Eficiencia	ABC	2,992	0,03932	$a1 \times b3 \times c3 - a2 \times b2 \times c0$	0,00277
Turbiedad	ABC	-3,014	0,03998	$a1 \times b1 \times c0 - a2 \times b1 \times c1$	0,00258
Eficiencia	ABC	2,992	0,04047	$a1 \times b3 \times c3 - a2 \times b3 \times c0$	0,00277
Turbiedad	ABC	3,272	0,04069	$a1 \times b3 \times c2 - a1 \times b4 \times c0$	0,00107
Eficiencia	ABC	-2,785	0,04087	$a1 \times b1 \times c0 - a1 \times b4 \times c1$	0,00536
Turbiedad	ABC	-3,014	0,04127	$a1 \times b2 \times c0 - a2 \times b1 \times c1$	0,00258
Eficiencia	ABC	-2,785	0,04150	$a1 \times b2 \times c0 - a1 \times b4 \times c1$	0,00536
Turbiedad					

Eficiencia	ABC	2,992	0,04170	$a1 \times b3 \times c3 - a2 \times b4 \times c0$	0,00277
Turbiedad	ABC	-2,785	0,04216	$a1 \times b3 \times c0 - a1 \times b4 \times c1$	0,00536
Eficiencia	ABC	3,583	0,04218	$a1 \times b3 \times c1 - a2 \times b1 \times c0$	0,00034
Turbiedad	ABC	-3,014	0,04265	$a1 \times b3 \times c0 - a2 \times b1 \times c1$	0,00258
Eficiencia	ABC	-2,785	0,04284	$a1 \times b4 \times c0 - a1 \times b4 \times c1$	0,00536
Turbiedad	ABC	2,785	0,04354	$a1 \times b4 \times c1 - a2 \times b1 \times c0$	0,00536
Eficiencia	ABC	-3,073	0,04381	$a1 \times b1 \times c0 - a2 \times b3 \times c2$	0,00212
Turbiedad	ABC	2,851	0,04407	$a1 \times b3 \times c1 - a2 \times b2 \times c3$	0,00435
Eficiencia	ABC	3,272	0,04408	$a1 \times b3 \times c2 - a2 \times b1 \times c0$	0,00107
Turbiedad	ABC	-3,014	0,04412	$a1 \times b4 \times c0 - a2 \times b1 \times c1$	0,00258
Eficiencia	ABC	2,785	0,04427	$a1 \times b4 \times c1 - a2 \times b2 \times c0$	0,00536
Turbiedad	ABC	2,785	0,04502	$a1 \times b4 \times c1 - a2 \times b3 \times c0$	0,00536
Eficiencia	ABC	-2,792	0,04555	$a1 \times b1 \times c0 - a1 \times b1 \times c1$	0,00523
Turbiedad	ABC	-3,014	0,04570	$a2 \times b1 \times c0 - a2 \times b1 \times c1$	0,00258
Eficiencia	ABC	-3,073	0,04571	$a1 \times b2 \times c0 - a2 \times b3 \times c2$	0,00212
Turbiedad	ABC	2,785	0,04580	$a1 \times b4 \times c1 - a2 \times b4 \times c0$	0,00536
Eficiencia	ABC	2,792	0,04636	$a1 \times b1 \times c1 - a1 \times b2 \times c0$	0,00523
Turbiedad	ABC	2,792	0,04721	$a1 \times b1 \times c1 - a1 \times b3 \times c0$	0,00523
Eficiencia	ABC	3,014	0,04739	$a2 \times b1 \times c1 - a2 \times b2 \times c0$	0,00258
Turbiedad	ABC	-3,073	0,04779	$a1 \times b3 \times c0 - a2 \times b3 \times c2$	0,00212
Eficiencia	ABC	2,792	0,04808	$a1 \times b1 \times c1 - a1 \times b4 \times c0$	0,00523
Turbiedad	ABC	3,272	0,04809	$a1 \times b3 \times c2 - a2 \times b2 \times c0$	0,00107
Eficiencia	ABC	2,792	0,04899	$a1 \times b1 \times c1 - a2 \times b1 \times c0$	0,00523
Turbiedad	ABC	3,014	0,04921	$a2 \times b1 \times c1 - a2 \times b3 \times c0$	0,00258
Eficiencia	ABC	2,792	0,04993	$a1 \times b1 \times c1 - a2 \times b2 \times c0$	0,00523
Turbiedad	AC	-5,363	0,00000	$a1 \times c0 - a1 \times c1$	0,00000
Eficiencia	AC	5,363	0,00000	$a1 \times c1 - a2 \times c0$	0,00000
Turbiedad					

Eficiencia	AC	-4,824	0,00001	$a1 \times c0 - a2 \times c1$	0,00000
Turbiedad	AC	-4,824	0,00001	$a2 \times c0 - a2 \times c1$	0,00000
Eficiencia	AC	-4,081	0,00021	$a1 \times c0 - a2 \times c2$	0,00004
Turbiedad	AC	-3,930	0,00024	$a1 \times c0 - a1 \times c3$	0,00009
Eficiencia	AC	-4,081	0,00025	$a2 \times c0 - a2 \times c2$	0,00004
Turbiedad	AC	-3,959	0,00026	$a1 \times c0 - a1 \times c2$	0,00008
Eficiencia	AC	3,930	0,00026	$a1 \times c3 - a2 \times c0$	0,00009
Turbiedad	AC	3,959	0,00030	$a1 \times c2 - a2 \times c0$	0,00008
Eficiencia	AC	-3,372	0,00174	$a1 \times c0 - a2 \times c3$	0,00075
Turbiedad	AC	-3,372	0,00190	$a2 \times c0 - a2 \times c3$	0,00075
Eficiencia	B	-3,868	0,00066	$b2 - b3$	0,00011
Turbiedad	B	2,567	0,03075	$b3 - b4$	0,01025
Eficiencia	B	2,249	0,04907	$b1 - b2$	0,02454
Turbiedad	BC	-4,487	0,00011	$b1 \times c0 - b3 \times c2$	0,00001
Eficiencia	BC	-4,628	0,00011	$b1 \times c0 - b3 \times c1$	0,00000
Turbiedad	BC	-4,487	0,00012	$b2 \times c0 - b3 \times c2$	0,00001
Eficiencia	BC	-4,487	0,00014	$b3 \times c0 - b3 \times c2$	0,00001
Turbiedad	BC	-4,628	0,00015	$b2 \times c0 - b3 \times c1$	0,00000
Eficiencia	BC	4,487	0,00017	$b3 \times c2 - b4 \times c0$	0,00001
Turbiedad	BC	-4,628	0,00022	$b3 \times c0 - b3 \times c1$	0,00000
Eficiencia	BC	-4,106	0,00040	$b1 \times c0 - b1 \times c1$	0,00004
Turbiedad	BC	4,106	0,00044	$b1 \times c1 - b2 \times c0$	0,00004
Eficiencia	BC	4,628	0,00044	$b3 \times c1 - b4 \times c0$	0,00000
Turbiedad	BC	4,106	0,00048	$b1 \times c1 - b3 \times c0$	0,00004
Eficiencia	BC	4,106	0,00054	$b1 \times c1 - b4 \times c0$	0,00004
Turbiedad	BC	-3,938	0,00062	$b1 \times c0 - b3 \times c3$	0,00008
Eficiencia	BC	-3,938	0,00066	$b2 \times c0 - b3 \times c3$	0,00008
Turbiedad					

Eficiencia Turbiedad	BC	-3,938	0,00070	$b3 \times c0 - b3 \times c3$	0,00008
Eficiencia Turbiedad	BC	3,938	0,00076	$b3 \times c3 - b4 \times c0$	0,00008
Eficiencia Turbiedad	BC	-3,515	0,00264	$b1 \times c0 - b4 \times c1$	0,00044
Eficiencia Turbiedad	BC	-3,515	0,00277	$b2 \times c0 - b4 \times c1$	0,00044
Eficiencia Turbiedad	BC	-3,515	0,00293	$b3 \times c0 - b4 \times c1$	0,00044
Eficiencia Turbiedad	BC	-3,515	0,00310	$b4 \times c0 - b4 \times c1$	0,00044
Eficiencia Turbiedad	BC	-3,343	0,00474	$b2 \times c3 - b3 \times c1$	0,00083
Eficiencia Turbiedad	BC	-3,202	0,00745	$b2 \times c3 - b3 \times c2$	0,00137
Eficiencia Turbiedad	BC	-2,946	0,01486	$b1 \times c0 - b1 \times c2$	0,00322
Eficiencia Turbiedad	BC	2,946	0,01545	$b1 \times c2 - b2 \times c0$	0,00322
Eficiencia Turbiedad	BC	2,946	0,01610	$b1 \times c2 - b3 \times c0$	0,00322
Eficiencia Turbiedad	BC	2,946	0,01680	$b1 \times c2 - b4 \times c0$	0,00322
Eficiencia Turbiedad	BC	2,821	0,02131	$b1 \times c1 - b2 \times c3$	0,00479
Eficiencia Turbiedad	BC	-2,763	0,02216	$b1 \times c0 - b1 \times c3$	0,00573
Eficiencia Turbiedad	BC	-2,753	0,02217	$b2 \times c2 - b3 \times c1$	0,00591
Eficiencia Turbiedad	BC	2,763	0,02290	$b1 \times c3 - b2 \times c0$	0,00573
Eficiencia Turbiedad	BC	2,763	0,02369	$b1 \times c3 - b3 \times c0$	0,00573
Eficiencia Turbiedad	BC	2,763	0,02454	$b1 \times c3 - b4 \times c0$	0,00573
Eficiencia Turbiedad	BC	-2,653	0,02897	$b2 \times c3 - b3 \times c3$	0,00797
Eficiencia Turbiedad	BC	-2,612	0,03180	$b2 \times c2 - b3 \times c2$	0,00901
Eficiencia Turbiedad	BC	2,565	0,03541	$b3 \times c1 - b4 \times c2$	0,01033
Eficiencia Turbiedad	BC	-2,471	0,04496	$b2 \times c1 - b3 \times c1$	0,01349
Eficiencia Turbiedad	BC	2,424	0,04984	$b3 \times c2 - b4 \times c2$	0,01537
Eficiencia Turbiedad	C	-7,203	0,00000	$c0 - c1$	0,00000
Eficiencia Turbiedad	C	-5,686	0,00000	$c0 - c2$	0,00000
Eficiencia Turbiedad	C	-5,163	0,00000	$c0 - c3$	0,00000
OD	AC	4,808	0,00001	$a1 \times c0 - a2 \times c3$	0,00000
OD	AC	4,885	0,00001	$a1 \times c0 - a1 \times c2$	0,00000

OD	AC	4,808	0,00001	$a2 \times c0 - a2 \times c3$	0,00000
OD	AC	-4,885	0,00001	$a1 \times c2 - a2 \times c0$	0,00000
OD	AC	4,958	0,00001	$a1 \times c0 - a1 \times c3$	0,00000
OD	AC	-4,958	0,00002	$a1 \times c3 - a2 \times c0$	0,00000
OD	AC	4,162	0,00011	$a1 \times c0 - a2 \times c2$	0,00003
OD	AC	4,162	0,00013	$a2 \times c0 - a2 \times c2$	0,00003
OD	AC	3,506	0,00128	$a1 \times c0 - a2 \times c1$	0,00046
OD	AC	3,506	0,00142	$a2 \times c0 - a2 \times c1$	0,00046
OD	AC	3,029	0,00573	$a1 \times c0 - a1 \times c1$	0,00245
OD	AC	-3,029	0,00625	$a1 \times c1 - a2 \times c0$	0,00245
OD	BC	3,568	0,00360	$b1 \times c0 - b4 \times c2$	0,00036
OD	BC	3,666	0,00369	$b1 \times c0 - b4 \times c3$	0,00025
OD	BC	3,469	0,00391	$b1 \times c0 - b1 \times c3$	0,00052
OD	BC	3,568	0,00392	$b2 \times c0 - b4 \times c2$	0,00036
OD	BC	-3,469	0,00417	$b1 \times c3 - b2 \times c0$	0,00052
OD	BC	3,666	0,00422	$b2 \times c0 - b4 \times c3$	0,00025
OD	BC	3,568	0,00432	$b3 \times c0 - b4 \times c2$	0,00036
OD	BC	3,324	0,00443	$b1 \times c0 - b2 \times c3$	0,00089
OD	BC	-3,469	0,00447	$b1 \times c3 - b3 \times c0$	0,00052
OD	BC	3,324	0,00463	$b2 \times c0 - b2 \times c3$	0,00089
OD	BC	3,568	0,00480	$b4 \times c0 - b4 \times c2$	0,00036
OD	BC	-3,469	0,00481	$b1 \times c3 - b4 \times c0$	0,00052
OD	BC	-3,324	0,00484	$b2 \times c3 - b3 \times c0$	0,00089
OD	BC	3,350	0,00485	$b1 \times c0 - b3 \times c3$	0,00081
OD	BC	3,666	0,00492	$b3 \times c0 - b4 \times c3$	0,00025
OD	BC	-3,324	0,00507	$b2 \times c3 - b4 \times c0$	0,00089
OD	BC	3,350	0,00510	$b2 \times c0 - b3 \times c3$	0,00081
OD	BC	3,350	0,00538	$b3 \times c0 - b3 \times c3$	0,00081
OD	BC	-3,350	0,00570	$b3 \times c3 - b4 \times c0$	0,00081
OD	BC	3,666	0,00590	$b4 \times c0 - b4 \times c3$	0,00025
OD	BC	3,672	0,00723	$b1 \times c0 - b3 \times c2$	0,00024
OD	BC	3,672	0,00964	$b2 \times c0 - b3 \times c2$	0,00024
OD	BC	2,946	0,01381	$b1 \times c0 - b3 \times c1$	0,00322
OD	BC	2,946	0,01432	$b2 \times c0 - b3 \times c1$	0,00322

OD	BC	3,672	0,01446	$b3 \times c0 - b3 \times c2$	0,00024
OD	BC	2,946	0,01487	$b3 \times c0 - b3 \times c1$	0,00322
OD	BC	-2,946	0,01547	$b3 \times c1 - b4 \times c0$	0,00322
OD	BC	2,816	0,01824	$b1 \times c0 - b2 \times c2$	0,00486
OD	BC	2,816	0,01882	$b2 \times c0 - b2 \times c2$	0,00486
OD	BC	-2,816	0,01945	$b2 \times c2 - b3 \times c0$	0,00486
OD	BC	-2,816	0,02012	$b2 \times c2 - b4 \times c0$	0,00486
OD	BC	2,738	0,02059	$b1 \times c0 - b1 \times c2$	0,00618
OD	BC	-2,738	0,02118	$b1 \times c2 - b2 \times c0$	0,00618
OD	BC	-2,738	0,02180	$b1 \times c2 - b3 \times c0$	0,00618
OD	BC	-2,738	0,02246	$b1 \times c2 - b4 \times c0$	0,00618
OD	BC	-3,672	0,02892	$b3 \times c2 - b4 \times c0$	0,00024
OD	C	6,905	0,00000	$c0 - c3$	0,00000
OD	C	6,397	0,00000	$c0 - c2$	0,00000
OD	C	4,621	0,00001	$c0 - c1$	0,00000
OD	C	2,284	0,03352	$c1 - c3$	0,02235
STD	AC	-3,957	0,00106	$a1 \times c0 - a2 \times c3$	0,00008
STD	AC	-3,957	0,00213	$a2 \times c0 - a2 \times c3$	0,00008
STD	AC	-3,651	0,00244	$a1 \times c1 - a2 \times c3$	0,00026
STD	AC	-2,791	0,02947	$a1 \times c0 - a1 \times c3$	0,00526
STD	AC	2,791	0,03684	$a1 \times c3 - a2 \times c0$	0,00526
STD	AC	-2,602	0,04322	$a2 \times c1 - a2 \times c3$	0,00926
STD	B	-3,140	0,01014	$b1 - b4$	0,00169
STD	B	-2,571	0,03043	$b1 - b3$	0,01014
STD	BC	-3,764	0,02009	$b1 \times c1 - b4 \times c3$	0,00017
STD	BC	-3,101	0,02896	$b2 \times c2 - b4 \times c3$	0,00193
STD	BC	-3,064	0,02910	$b1 \times c2 - b4 \times c3$	0,00218
STD	BC	-3,169	0,03064	$b1 \times c0 - b4 \times c3$	0,00153
STD	BC	-3,116	0,03139	$b1 \times c1 - b2 \times c3$	0,00183
STD	BC	-2,981	0,03451	$b1 \times c1 - b3 \times c2$	0,00288
STD	BC	-3,169	0,03676	$b2 \times c0 - b4 \times c3$	0,00153
STD	BC	-2,803	0,04048	$b1 \times c0 - b3 \times c3$	0,00506
STD	BC	-3,398	0,04069	$b1 \times c1 - b3 \times c3$	0,00068
STD	BC	-2,803	0,04337	$b2 \times c0 - b3 \times c3$	0,00506

STD	BC	-3,169	0,04595	$b3 \times c0 - b4 \times c3$	0,00153
STD	BC	-2,803	0,04671	$b3 \times c0 - b3 \times c3$	0,00506
STD	BC	-2,735	0,04674	$b2 \times c2 - b3 \times c3$	0,00623
STD	BC	-2,850	0,04767	$b1 \times c1 - b4 \times c2$	0,00437
STD	BC	-2,699	0,04913	$b1 \times c2 - b3 \times c3$	0,00696
STD	C	-4,771	0,00001	$c0 - c3$	0,00000
STD	C	-3,597	0,00097	$c1 - c3$	0,00032
STD	C	-2,365	0,02707	$c2 - c3$	0,01804
STD	C	-2,406	0,03222	$c0 - c2$	0,01611
Turbiedad	ABC	3,534	0,02534	$a1 \times b1 \times c0 - a1 \times b3 \times c1$	0,00041
Turbiedad	ABC	3,534	0,02896	$a1 \times b2 \times c0 - a1 \times b3 \times c1$	0,00041
Turbiedad	ABC	2,976	0,03018	$a1 \times b1 \times c0 - a1 \times b3 \times c3$	0,00292
Turbiedad	ABC	2,976	0,03082	$a1 \times b2 \times c0 - a1 \times b3 \times c3$	0,00292
Turbiedad	ABC	2,976	0,03149	$a1 \times b3 \times c0 - a1 \times b3 \times c3$	0,00292
Turbiedad	ABC	-2,976	0,03219	$a1 \times b3 \times c3 - a1 \times b4 \times c0$	0,00292
Turbiedad	ABC	-2,976	0,03292	$a1 \times b3 \times c3 - a2 \times b1 \times c0$	0,00292
Turbiedad	ABC	-2,976	0,03369	$a1 \times b3 \times c3 - a2 \times b2 \times c0$	0,00292
Turbiedad	ABC	3,534	0,03378	$a1 \times b3 \times c0 - a1 \times b3 \times c1$	0,00041
Turbiedad	ABC	-2,976	0,03449	$a1 \times b3 \times c3 - a2 \times b3 \times c0$	0,00292
Turbiedad	ABC	2,976	0,03533	$a1 \times b1 \times c0 - a2 \times b3 \times c1$	0,00292
Turbiedad	ABC	2,976	0,03622	$a1 \times b2 \times c0 - a2 \times b3 \times c1$	0,00292
Turbiedad	ABC	2,976	0,03714	$a1 \times b3 \times c0 - a2 \times b3 \times c1$	0,00292
Turbiedad	ABC	2,976	0,03812	$a1 \times b4 \times c0 - a2 \times b3 \times c1$	0,00292
Turbiedad	ABC	3,226	0,03894	$a1 \times b1 \times c0 - a1 \times b3 \times c2$	0,00126
Turbiedad	ABC	2,976	0,03915	$a2 \times b1 \times c0 - a2 \times b3 \times c1$	0,00292
Turbiedad	ABC	2,976	0,04024	$a2 \times b2 \times c0 - a2 \times b3 \times c1$	0,00292
Turbiedad	ABC	-3,534	0,04054	$a1 \times b3 \times c1 - a1 \times b4 \times c0$	0,00041
Turbiedad	ABC	2,976	0,04139	$a2 \times b3 \times c0 - a2 \times b3 \times c1$	0,00292
Turbiedad	ABC	3,226	0,04154	$a1 \times b2 \times c0 - a1 \times b3 \times c2$	0,00126
Turbiedad	ABC	2,778	0,04179	$a1 \times b1 \times c0 - a1 \times b1 \times c1$	0,00548
Turbiedad	ABC	2,998	0,04212	$a1 \times b1 \times c0 - a2 \times b1 \times c1$	0,00272
Turbiedad	ABC	-2,778	0,04244	$a1 \times b1 \times c1 - a1 \times b2 \times c0$	0,00548
Turbiedad	ABC	-2,976	0,04261	$a1 \times b3 \times c3 - a2 \times b4 \times c0$	0,00292
Turbiedad	ABC	-2,778	0,04312	$a1 \times b1 \times c1 - a1 \times b3 \times c0$	0,00548

Turbiedad	ABC	2,998	0,04348	$a1 \times b2 \times c0 - a2 \times b1 \times c1$	0,00272
Turbiedad	ABC	-2,778	0,04381	$a1 \times b1 \times c1 - a1 \times b4 \times c0$	0,00548
Turbiedad	ABC	-2,976	0,04390	$a2 \times b3 \times c1 - a2 \times b4 \times c0$	0,00292
Turbiedad	ABC	3,226	0,04451	$a1 \times b3 \times c0 - a1 \times b3 \times c2$	0,00126
Turbiedad	ABC	-2,778	0,04453	$a1 \times b1 \times c1 - a2 \times b1 \times c0$	0,00548
Turbiedad	ABC	2,998	0,04493	$a1 \times b3 \times c0 - a2 \times b1 \times c1$	0,00272
Turbiedad	ABC	-2,778	0,04527	$a1 \times b1 \times c1 - a2 \times b2 \times c0$	0,00548
Turbiedad	ABC	-2,778	0,04604	$a1 \times b1 \times c1 - a2 \times b3 \times c0$	0,00548
Turbiedad	ABC	3,057	0,04623	$a1 \times b1 \times c0 - a2 \times b3 \times c2$	0,00224
Turbiedad	ABC	2,998	0,04648	$a1 \times b4 \times c0 - a2 \times b1 \times c1$	0,00272
Turbiedad	ABC	2,785	0,04659	$a1 \times b1 \times c0 - a1 \times b4 \times c1$	0,00535
Turbiedad	ABC	-2,778	0,04684	$a1 \times b1 \times c1 - a2 \times b4 \times c0$	0,00548
Turbiedad	ABC	2,785	0,04742	$a1 \times b2 \times c0 - a1 \times b4 \times c1$	0,00535
Turbiedad	ABC	-3,226	0,04793	$a1 \times b3 \times c2 - a1 \times b4 \times c0$	0,00126
Turbiedad	ABC	2,998	0,04814	$a2 \times b1 \times c0 - a2 \times b1 \times c1$	0,00272
Turbiedad	ABC	3,057	0,04824	$a1 \times b2 \times c0 - a2 \times b3 \times c2$	0,00224
Turbiedad	ABC	2,785	0,04828	$a1 \times b3 \times c0 - a1 \times b4 \times c1$	0,00535
Turbiedad	ABC	2,785	0,04918	$a1 \times b4 \times c0 - a1 \times b4 \times c1$	0,00535
Turbiedad	ABC	-2,998	0,04992	$a2 \times b1 \times c1 - a2 \times b2 \times c0$	0,00272
Turbiedad	AC	5,327	0,00000	$a1 \times c0 - a1 \times c1$	0,00000
Turbiedad	AC	-5,327	0,00000	$a1 \times c1 - a2 \times c0$	0,00000
Turbiedad	AC	4,813	0,00001	$a1 \times c0 - a2 \times c1$	0,00000
Turbiedad	AC	4,813	0,00001	$a2 \times c0 - a2 \times c1$	0,00000
Turbiedad	AC	4,075	0,00022	$a1 \times c0 - a2 \times c2$	0,00005
Turbiedad	AC	4,075	0,00026	$a2 \times c0 - a2 \times c2$	0,00005
Turbiedad	AC	3,902	0,00027	$a1 \times c0 - a1 \times c2$	0,00010
Turbiedad	AC	-3,902	0,00030	$a1 \times c2 - a2 \times c0$	0,00010
Turbiedad	AC	3,917	0,00031	$a1 \times c0 - a1 \times c3$	0,00009
Turbiedad	AC	-3,917	0,00036	$a1 \times c3 - a2 \times c0$	0,00009
Turbiedad	AC	3,362	0,00181	$a1 \times c0 - a2 \times c3$	0,00077
Turbiedad	AC	3,362	0,00197	$a2 \times c0 - a2 \times c3$	0,00077
Turbiedad	B	3,842	0,00073	$b2 - b3$	0,00012
Turbiedad	B	-2,533	0,03393	$b3 - b4$	0,01131
Turbiedad	B	-2,247	0,04925	$b1 - b2$	0,02463

Turbiedad	BC	4,604	0,00012	$b1 \times c0 - b3 \times c1$	0,00000
Turbiedad	BC	4,442	0,00013	$b1 \times c0 - b3 \times c2$	0,00001
Turbiedad	BC	4,442	0,00015	$b2 \times c0 - b3 \times c2$	0,00001
Turbiedad	BC	4,604	0,00017	$b2 \times c0 - b3 \times c1$	0,00000
Turbiedad	BC	4,442	0,00018	$b3 \times c0 - b3 \times c2$	0,00001
Turbiedad	BC	-4,442	0,00021	$b3 \times c2 - b4 \times c0$	0,00001
Turbiedad	BC	4,604	0,00025	$b3 \times c0 - b3 \times c1$	0,00000
Turbiedad	BC	4,084	0,00044	$b1 \times c0 - b1 \times c1$	0,00004
Turbiedad	BC	-4,084	0,00048	$b1 \times c1 - b2 \times c0$	0,00004
Turbiedad	BC	-4,604	0,00050	$b3 \times c1 - b4 \times c0$	0,00000
Turbiedad	BC	-4,084	0,00053	$b1 \times c1 - b3 \times c0$	0,00004
Turbiedad	BC	-4,084	0,00059	$b1 \times c1 - b4 \times c0$	0,00004
Turbiedad	BC	3,918	0,00067	$b1 \times c0 - b3 \times c3$	0,00009
Turbiedad	BC	3,918	0,00072	$b2 \times c0 - b3 \times c3$	0,00009
Turbiedad	BC	3,918	0,00077	$b3 \times c0 - b3 \times c3$	0,00009
Turbiedad	BC	-3,918	0,00083	$b3 \times c3 - b4 \times c0$	0,00009
Turbiedad	BC	3,507	0,00272	$b1 \times c0 - b4 \times c1$	0,00045
Turbiedad	BC	3,507	0,00286	$b2 \times c0 - b4 \times c1$	0,00045
Turbiedad	BC	3,507	0,00302	$b3 \times c0 - b4 \times c1$	0,00045
Turbiedad	BC	3,507	0,00320	$b4 \times c0 - b4 \times c1$	0,00045
Turbiedad	BC	3,336	0,00486	$b2 \times c3 - b3 \times c1$	0,00085
Turbiedad	BC	3,175	0,00818	$b2 \times c3 - b3 \times c2$	0,00150
Turbiedad	BC	2,930	0,01562	$b1 \times c0 - b1 \times c2$	0,00338
Turbiedad	BC	-2,930	0,01625	$b1 \times c2 - b2 \times c0$	0,00338
Turbiedad	BC	-2,930	0,01692	$b1 \times c2 - b3 \times c0$	0,00338
Turbiedad	BC	-2,930	0,01766	$b1 \times c2 - b4 \times c0$	0,00338
Turbiedad	BC	-2,816	0,02160	$b1 \times c1 - b2 \times c3$	0,00486
Turbiedad	BC	2,759	0,02244	$b1 \times c0 - b1 \times c3$	0,00580
Turbiedad	BC	2,738	0,02316	$b2 \times c2 - b3 \times c1$	0,00618
Turbiedad	BC	-2,759	0,02319	$b1 \times c3 - b2 \times c0$	0,00580
Turbiedad	BC	-2,759	0,02399	$b1 \times c3 - b3 \times c0$	0,00580
Turbiedad	BC	-2,759	0,02485	$b1 \times c3 - b4 \times c0$	0,00580
Turbiedad	BC	2,650	0,02928	$b2 \times c3 - b3 \times c3$	0,00805
Turbiedad	BC	2,577	0,03516	$b2 \times c2 - b3 \times c2$	0,00996

Turbiedad	BC	-2,562	0,03573	$b3 \times c1 - b4 \times c2$	0,01042
Turbiedad	BC	2,458	0,04662	$b2 \times c1 - b3 \times c1$	0,01399
Turbiedad	C	7,170	0,00000	$c0 - c1$	0,00000
Turbiedad	C	5,640	0,00000	$c0 - c2$	0,00000
Turbiedad	C	5,147	0,00000	$c0 - c3$	0,00000
pH	AB	-4,528	0,00017	$a2 \times b3 - a2 \times b4$	0,00001
pH	AB	-4,153	0,00046	$a1 \times b3 - a2 \times b4$	0,00003
pH	AB	3,199	0,00771	$a1 \times b4 - a2 \times b3$	0,00138
pH	AB	3,262	0,00775	$a2 \times b1 - a2 \times b3$	0,00111
pH	AB	-3,291	0,00931	$a2 \times b2 - a2 \times b4$	0,00100
pH	AB	-2,888	0,01812	$a1 \times b3 - a2 \times b1$	0,00388
pH	AB	-2,825	0,01890	$a1 \times b3 - a1 \times b4$	0,00473
pH	AB	2,616	0,03114	$a1 \times b1 - a2 \times b3$	0,00890
pH	B	-5,199	0,00000	$b3 - b4$	0,00000
pH	B	3,892	0,00030	$b1 - b3$	0,00010
pH	B	-2,958	0,00620	$b2 - b4$	0,00310
pH	B	2,242	0,03748	$b2 - b3$	0,02499
pH	BC	-4,270	0,00117	$b3 \times c3 - b4 \times c1$	0,00002
pH	BC	-4,385	0,00139	$b3 \times c2 - b4 \times c1$	0,00001
pH	BC	-4,063	0,00194	$b3 \times c1 - b4 \times c1$	0,00005
pH	BC	-3,736	0,00561	$b3 \times c2 - b4 \times c2$	0,00019
pH	BC	-3,622	0,00702	$b3 \times c3 - b4 \times c2$	0,00029
pH	BC	-3,414	0,01279	$b3 \times c1 - b4 \times c2$	0,00064
pH	BC	3,072	0,03648	$b1 \times c3 - b3 \times c2$	0,00213
pH	BC	2,932	0,04046	$b1 \times c1 - b3 \times c2$	0,00337
pH	BC	2,958	0,04134	$b1 \times c3 - b3 \times c3$	0,00310
pH	BC	-2,968	0,04496	$b2 \times c2 - b4 \times c1$	0,00300

Anexo 2. Panel fotográfico



Figura 25. Recolección de agua de la quebrada Córdova - BRUNAS



Figura 26. Recolección de muestras de yuca para preparación del coagulante/floculante



Figura 27. Recolección de tallos y hojas de la yuca para la preparación del coagulante/floculante



Figura 28. Secado de las muestras de cáscara de yuca para preparación del coagulante/floculante



Figura 29. Conservación del material particulado del tallo, hoja, cascara y raíz secundaria de la yuca



Figura 30. Pesado del material particulado para los tratamientos experimentales del agua



Figura 31. Experimento de coagulación/floculación en el test de jarras



Figura 32. Determinación de la demanda química de oxígeno