

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



EFFECTOS DEL COAGULANTE/FLOCULANTE A PARTIR DE *Croton lechleri* y *Croton draconoides* (SANGRE DE GRADO) EN QUEBRADAS A ESCALA DE LABORATORIO, 2024

Tesis

**Para obtener título de
INGENIERO AMBIENTAL**

Presentado por

JHEISON GUEVARA MALUQUIS

Tingo María - Perú

2025



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N°075-2025-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 26 de mayo de 2025, a horas 8:00 a.m. en la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

“EFECTOS DEL COAGULANTE/FLOCULANTE A PARTIR DE *Croton lechleri* Y *Croton draconoides* (SANGRE DE GRADO) EN QUEBRADAS A ESCALA DE LABORATORIO,2024”

Presentado por el Bachiller: **GUEVARA MALUQUIS, JHEISON** 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, la 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, 23 de junio de 2025

Ing. MSc. ABBY SOLANGE DA CRUZ RODRIGUEZ
PRESIDENTE

Ing. MSc. SANDRA L. ZAVALA GUERRERO
MIEMBRO



Blgo. MSc. CÉSAR AUGUSTO GOZME SULCA
MIEMBRO

Dr. LUIS EDUARDO ORE-CIERTO
ASESOR



“Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana”

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 236 - 2025 - CS-RIDUNAS

El Director de la Dirección de Gestión de Investigación 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	<input checked="" type="checkbox"/>	Trabajo de Suficiencia Profesional	<input type="checkbox"/>
-------	-------------------------------------	------------------------------------	--------------------------

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE DE SIMILITUD
EFFECTOS DEL COAGULANTE/FLOCULANTE A PARTIR DE Croton lechleri y Croton draconoides (SANGRE DE GRADO) EN QUEBRADAS A ESCALA DE LABORATORIO, 2024	JHEISON GUEVARA MALUQUIS	09 % Nueve

Tingo María, 14 de julio de 2025


UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE GESTIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Dr. Tomas Menacho Mallqui
JEFE

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



INFORME DE TESIS

EFFECTOS DEL COAGULANTE/FLOCULANTE A PARTIR DE *Croton lechleri* y *Croton draconoides* (SANGRE DE GRADO) EN QUEBRADAS A ESCALA DE LABORATORIO, 2024

ÁREA DE INVESTIGACIÓN	: Ciencia y Tecnología Ambiental – PIBIOT
GRUPO DE INVESTIGACION	: Ciencia y Tecnología Ambiental
LÍNEA DE INVESTIGACIÓN	: Tecnologías para reducir la contaminación
LUGAR DE EJECUCIÓN	: Laboratorio de Calidad de Agua de la Universidad Nacional Agraria de la Selva
EJECUTOR	: Guevara Maluquis Jheison
ASESOR	: Dr. Oré Cierro, Luis Eduardo
DURACIÓN	: Fecha de inicio 17/12/2023 Fecha de término 17/07/2024
FINANCIAMIENTO	: Propio (X) FEDU () Externo ()
FEDU	: S/.00.00
Propio	: S/.5 319,60
Otros	: S/.00.00

Tingo María - Perú, abril 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	: Efectos del coagulante/floculante natural a partir de <i>Croton lechleri</i> y <i>Croton draconoides</i> (sangre de grado) en quebradas a escala de laboratorio, 2024
Objetivo general	: Evaluar los efectos del coagulante/floculante natural a partir de <i>Croton lechleri</i> y <i>Croton draconoides</i> (sangre de grado) en quebradas a escala de laboratorio, 2024.
Autor	: Guevara Maluquis, Jheison
DNI	: 76139498
Correo Electrónico	: jheison.guevara@unas.edu.pe
Asesor	: Dr. Oré Cierro, Luis Eduardo
Área de investigación	: Ciencia y Tecnología Ambiental – PIBIOT
Grupo de investigación	: Ciencia y Tecnología Ambiental
Línea(s) de investigación	: Tecnologías para reducir la contaminación
Lugar de ejecución	: Laboratorio Ecología de la Universidad Nacional Agraria de la Selva
Fecha de inicio	: 17 de diciembre del 2023
Fecha de término	: 17 de julio del 2024
Presupuesto	: S/.5 319,60
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.

ÍNDICE

I.	INTRODUCCION	1
1.1.	Objetivo General	2
1.2.	Objetivo Específico	2
II.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1.	Antecedentes	3
2.1.1.	Internacionales	3
2.1.2.	Nacionales	4
2.1.3.	Locales	5
2.2.	Contaminación del agua.....	6
2.2.1.	Agua residual Doméstica	6
2.3.	Proceso de Coagulación-floculación.....	7
2.3.1.	Coagulantes sintéticos	7
2.3.2.	Coagulantes naturales.....	8
2.4.	Parámetros fisicoquímicos del agua.....	8
2.4.1.	Turbidez	8
2.4.2.	Sólidos Suspendedos Totales (SST)	8
2.4.3.	Temperatura	8
2.4.4.	Conductividad Eléctrica	9
2.4.5.	pH.....	9
2.4.6.	Oxígeno disuelto	9
2.4.7.	DQO	9
2.4.8.	DBO ₅	10
2.5.	Especie <i>Croton draconoides</i>	10
2.5.1.	Clasificación taxonómica	10
2.5.2.	Descripción botánica	10
2.5.3.	Distribución.....	11
2.5.4.	Componentes químicos	11
2.6.	Especie <i>Croton lechleri</i>	11
2.6.1.	Clasificación taxonómica	11
2.6.2.	Descripción botánica	12
2.6.3.	Distribución geográfica	12
2.6.4.	Componentes químicos	12
III.	MATERIALES Y METODOS	14

3.1.	Lugar de ejecución	14
3.1.1.	Ubicación política de la zona de estudio	14
3.1.2.	Ubicación geográfica de la zona de estudio	14
3.2.	Material y métodos	15
3.2.1.	Materiales y equipos	15
3.3.	Metodología	15
3.3.1.	Extracción del coagulante-floculante a partir de las especies de <i>Croton lechleri</i> y <i>Croton draconoides</i> para tratar agua.....	15
3.3.2.	Análisis de las aguas de la quebrada Córdova del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva	15
3.3.3.	Efecto que produce las especies de <i>Croton lechleri</i> y <i>Croton draconoides</i> como coagulante-floculante para tratar agua de la quebrada Córdova	22
3.4.	Criterios de investigación.....	24
3.4.1.	Nivel de investigación.....	25
3.4.2.	Tipo de investigación	25
3.4.3.	Variable de investigación	25
3.4.4.	Operacionalización de variables	25
3.4.5.	Diseño de investigación	26
3.4.6.	Población y muestra	27
3.4.7.	Técnicas e instrumentos de investigación	27
3.4.8.	Análisis de datos	28
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
4.1.	Extracción del coagulante/floculante a partir de <i>Croton lechleri</i> y <i>Croton draconoides</i> (sangre de grado).....	30
4.2.	Parámetros fisicoquímicos de las aguas de las quebradas contaminadas	37
4.3.	Evaluación de los efectos del coagulante/floculante a partir de <i>Croton lechleri</i> y <i>Croton draconoides</i> (sangre de grado) en los parámetros físicos de las aguas de la quebrada Córdova	38
4.3.1.	Efectos del coagulante/floculante a partir de <i>Croton lechleri</i> e los parámetros físicos	38
4.3.2.	Efectos del coagulante/floculante a partir de <i>Croton draconoides</i> en los parámetros físicos.....	47
4.3.3.	Análisis estadístico del efecto coagulante/floculante del <i>Croton lechleri</i> y <i>Croton draconoide</i> en el agua contaminada naturalmente	55

4.3.4.	Modelo de regresión global para factores significativos.....	57
4.4.	Evaluación de los efectos del coagulante/floculante a partir de <i>Croton lechleri</i> y <i>Croton draconoides</i> (sangre de grado) en los parámetros químicos de las aguas de la quebrada Córdova	60
4.4.1.	Efectos del coagulante/floculante a partir de <i>Croton lechleri</i> en los parámetros químicos	60
4.4.2.	Efectos del coagulante/floculante a partir de <i>Croton draconoides</i> en los parámetros químicos.....	69
4.4.3.	Análisis estadístico del efecto coagulante/floculante del <i>Croton lechleri</i> y <i>Croton draconoide</i> en los parámetros químicos del agua	78
4.4.4.	Modelo de regresión global para factores significativos.....	81
4.5.	Determinación de la eficiencia del coagulante/floculante a partir de <i>Croton lechleri</i> y <i>Croton draconoides</i> (sangre de grado) en la descontaminación de las aguas de la quebrada Córdova	87
4.5.1.	Efectos del coagulante/floculante a partir de <i>Croton lechleri</i> en la eficiencia	87
4.5.2.	Efectos del coagulante/floculante a partir de <i>Croton draconoides</i> en la eficiencia	92
4.5.3.	Análisis estadístico del efecto coagulante/floculante del <i>Croton lechleri</i> y <i>Croton draconoide</i> en la eficiencia	97
4.5.4.	Modelo de regresión global para factores significativos	100
V.	CONCLUSIONES.....	107
VI.	PROPUESTAS AL FUTURO	108
VII.	REFERENCIAS.....	109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Parámetros de interés para el coagulante-floculante de <i>Croton lechleri</i> y <i>Croton draconoides</i>	20
2. Sistema de variables de investigación.....	24
3. Operacionalización de la variable de investigación.....	25
4. Diseño experimental – diseño factorial de 2X4X5 con tres repeticiones.....	26
5. Parámetros iniciales del agua de la quebrada Córdova de la UNAS.....	37
6. Efectos del coagulante/floculante a partir de <i>Croton lechleri</i> (sangre de grado) en los parámetros físicos del agua.....	38
7. Efectos del coagulante/floculante a partir de <i>Croton draconoides</i> (sangre de grado) en los parámetros físicos del agua.....	47
8. Prueba de normalidad de los parámetros físicos del agua.....	55
9. Efecto producido por los factores de investigación en los parámetros físicos del agua.....	56
10. Modelo de regresión global para el comportamiento de la turbiedad con respecto a las dosis empleadas.....	57
11. Efectos del coagulante/floculante a partir de <i>Croton lechleri</i> en los parámetros químicos.....	60
12. Efectos del coagulante/floculante a partir de <i>Croton draconoides</i> en los parámetros químicos.....	58
13. Prueba de normalidad de los parámetros químicos del agua.....	78
14. Efecto producido por los factores de investigación en parámetros químicos del agua.....	79
15. Modelo de regresión global para el comportamiento del pH con respecto a las dosis empleadas.....	81
16. Modelo de regresión global para el comportamiento de la DBO5 con respecto a las dosis empleadas.....	84
17. Efectos del coagulante/floculante a partir de <i>Croton lechleri</i> en la eficiencia de la turbiedad y demanda bioquímica de oxígeno.....	87
18. Efectos del coagulante/floculante a partir de <i>Croton draconoides</i> en la eficiencia de la turbiedad y demanda bioquímica de oxígeno.....	92
19. Prueba de normalidad de en la eficiencia de la turbiedad y el DBO5.....	97
20. Efecto producido por los factores de investigación en la eficiencia de la turbiedad y DBO5.....	98

21. Modelo de regresión global para el comportamiento de la eficiencia de la turbiedad con respecto a las dosis empleadas.....	100
22. Modelo de regresión global para el comportamiento de la eficiencia de la DBO5 con respecto a las dosis empleadas.....	103
23. Datos obtenidos en campo y laboratorio.....	119
24. Prueba de Tukey HSD (ANOVA) y prueba de Dunn (Kruskal-Wallis).....	122

ÍNDICE DE FIGURAS

Figuras	Pagina
1. Mecanismo de coagulación-floculación.....	7
2. Mapa de ubicación del lugar de ejecución.....	14
3. Esquema experimental de las especies de <i>Croton lechleri</i> y <i>Croton draconoides</i> como coagulante-floculante.....	23
4. Diseño Metodológico de la investigación para las 2 especies: <i>Croton lechleri</i> y <i>Croton draconoides</i>	26
5. Balance de materia de la producción de partículas a partir de hojas del <i>Croton lechleri</i> y <i>Croton draconoide</i>	30
6. Balance de materia de la producción de partículas a partir de la corteza del tallo del <i>Croton lechleri</i> y <i>Croton draconoides</i>	32
7. Balance de materia de la producción de partículas a partir de las raíces secundarias del <i>Croton lechleri</i> y <i>Croton draconoides</i>	34
8. Balance de materia de la recolección del látex del <i>Croton lechleri</i> y <i>Croton draconoides</i>	36
9. Comportamiento de la turbiedad (NTU) respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del <i>Croton lechleri</i>	41
10. Comportamiento de la Temperatura (°C) respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del <i>Croton lechleri</i>	43
11. Comportamiento de los sólidos disueltos totales (mg/L) respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del <i>Croton lechleri</i>	44
12. Comportamiento de la Conductividad Eléctrica (uS/cm) respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del <i>Croton lechleri</i>	46
13. Comportamiento de la turbiedad respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del <i>Croton draconoide</i> (mg/L)	49
14. Comportamiento de la Temperatura (°C) respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del <i>Croton draconoide</i>	51
15. Comportamiento de los sólidos disueltos totales (mg/L) respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del <i>Croton draconoide</i>	52
16. Comportamiento de la Conductividad eléctrica (uS/cm) respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del <i>Croton draconoide</i>	54

17. Comportamiento de la turbiedad con respecto a las dosis empleadas y especie del a1: <i>Croton lechleri</i> y a2: <i>Croton draconoides</i>	59
18. Comportamiento del oxígeno disuelto (mg/L) respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del <i>Croton lechleri</i>	62
19. Comportamiento del pH respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del <i>Croton lechleri</i>	64
20. Comportamiento de la demanda química de oxígeno (mg/L) respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del <i>Croton lechleri</i>	66
21. Comportamiento de la demanda bioquímica de oxígeno (mg/L) respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del <i>Croton lechleri</i>	68
22. Comportamiento del oxígeno disuelto (mg/L) respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del <i>Croton dracooides</i>	72
23. Comportamiento del pH respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del <i>Croton dracooides</i>	73
24. Comportamiento de la demanda química de oxígeno (mg/L) respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del <i>Croton dracooides</i>	75
25. Comportamiento de la demanda bioquímica de oxígeno (mg/L) respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del <i>Croton dracooides</i>	77
26. Comportamiento del pH con respecto a las dosis empleadas y especie del a1: <i>Croton lechleri</i> y a2: <i>Croton draconoides</i>	83
27. Comportamiento de la DBO5 con respecto a las dosis empleadas y especie del a1: <i>Croton lechleri</i> y a2: <i>Croton draconoides</i>	86
28. Comportamiento de la eficiencia en la turbiedad (%) respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del <i>Croton lechleri</i>	89
29. Comportamiento de la eficiencia en la DBO5 (%) respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del <i>Croton lechleri</i>	91
30. Comportamiento de la eficiencia de la turbiedad (%) respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del <i>Croton draconoides</i>	94
31. Comportamiento de la eficiencia de la DBO5 (%) respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del <i>Croton draconoides</i>	96
32. Comportamiento de la eficiencia de la turbiedad con respecto a las dosis empleadas y especie del a1: <i>Croton lechleri</i> y a2: <i>Croton draconoides</i>	102

33. Comportamiento de la eficiencia de la DBO5 con respecto a las dosis empleadas y especie del a1: <i>Croton lechleri</i> y a2: <i>Croton draconoides</i>	105
34. Identificación del <i>Croton lechleri</i>	131
35. Identificación del <i>Croton draconoides</i>	131
36. Secado de las muestras de corteza del tallo, hojas y raíz secundaria en estufa	132
37. Pesado después del secado de la corteza del tallo, hojas y raíz secundaria	132
38. Molido de la corteza del tallo, hojas y raíz secundaria	133
39. Pesado del material particulado de la corteza del tallo, hojas y raíz secundaria	133
40. Tamizado del material particulado de la corteza del tallo, hojas y raíz secundaria	134
41. Recolección de agua contaminada naturalmente de la quebrada Córdova	134
42. Medición de parámetros iniciales: Turbiedad, T°, STD, CR, OD, pH, DQO y DBO..	135
43. Experimentación de las muestras con el Test de jarras	135
44. Muestras de agua antes del experimento	136
45. Muestras de agua después del experimento	136

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar los efectos del coagulante/floculante natural extraído de *Croton lechleri* y *Croton draconoides* (sangre de grado) en la mejora de la calidad del agua de quebradas contaminadas, a escala de laboratorio, durante el año 2024. La investigación se desarrolló con aguas provenientes de la quebrada Córdova, caracterizadas por elevados niveles de turbidez, sólidos suspendidos y carga orgánica, especialmente durante la época de avenida. Se realizó la extracción del coagulante a partir de hojas y corteza, mediante secado, molienda y tamizado, obteniendo un producto en polvo apto para ensayos de tratamiento

Los parámetros fisicoquímicos analizados incluyeron turbidez, sólidos totales disueltos, oxígeno disuelto, pH, conductividad eléctrica, demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅). Los ensayos de jarra demostraron que la aplicación del coagulante natural permitió una remoción significativa de turbidez (superior al 90%) y una reducción sustancial de la DQO y DBO₅, con una mejora general en la calidad del agua tratada. Además, se emplearon análisis estadísticos como ANOVA, prueba de Tukey HSD, Kruskal-Wallis y prueba de Dunn, que confirmaron diferencias significativas entre tratamientos y concentraciones aplicadas.

Los resultados evidencian que ambos extractos vegetales poseen un alto potencial como coagulantes/floculantes ecológicos, constituyéndose en una alternativa viable, económica y sostenible frente a los coagulantes sintéticos tradicionales, especialmente en contextos rurales o de difícil acceso. Se recomienda su aplicación futura en sistemas de tratamiento comunitario y estudios a escala piloto para validar su eficiencia en campo real.

Palabras clave: coagulante natural, sangre de grado, turbidez, DQO, quebradas contaminadas, tratamiento de agua.

ABSTRACT

The present study aimed to evaluate the effects of the natural coagulant/flocculant derived from *Croton lechleri* and *Croton draconoides* (commonly known as sangre de grado) on the quality improvement of contaminated stream water under laboratory conditions in 2024. The experimental work was conducted using water from the Córdova stream, which showed high levels of turbidity, suspended solids, and organic load, particularly during the rainy season. The coagulant was obtained from the leaves and bark through drying, grinding, and sieving, resulting in a fine powder suitable for treatment assays.

Physicochemical parameters analyzed included turbidity, total dissolved solids, dissolved oxygen, pH, electrical conductivity, chemical oxygen demand (COD), and biochemical oxygen demand (BOD₅). Jar test experiments revealed a significant reduction in turbidity (over 90%) and substantial decreases in COD and BOD₅, indicating improved water quality. Statistical analyses (ANOVA, Tukey HSD, Kruskal-Wallis, and Dunn test) confirmed significant differences between treatments and applied concentrations.

The findings demonstrate that both plant-based extracts possess high potential as natural coagulants/flocculants, representing a viable, cost-effective, and environmentally sustainable alternative to conventional chemical coagulants, especially in rural or low-resource settings. Future application in community-level treatment systems and pilot-scale validation in field conditions is recommended.

Keywords: natural coagulant, sangre de grado, turbidity, COD, contaminated streams, water treatment

I. INTRODUCCION

La contaminación de cuerpos hídricos superficiales, especialmente de quebradas y riachuelos en zonas de selva alta, constituye una problemática ambiental creciente en el Perú, atribuida principalmente a la escorrentía pluvial no controlada, el arrastre de sólidos en suspensión, materia orgánica y contaminantes difusos que deterioran la calidad del agua (MINAM, 2020). Durante los eventos de avenida, característicos de la época de lluvias, las quebradas presentan elevados niveles de turbidez, carga orgánica y alteraciones fisicoquímicas que afectan su función ecológica y limitan su uso para consumo humano, riego o recreación (Apaza et al., 2021). Frente a esta problemática, surge la necesidad de alternativas de tratamiento accesibles, sostenibles y adaptadas a contextos rurales, que no dependan exclusivamente de productos químicos convencionales como el sulfato de aluminio, el cual ha sido vinculado a efectos adversos sobre la salud humana y el ambiente (Bratby, 2016).

En este contexto, el uso de coagulantes y floculantes naturales de origen vegetal representa una alternativa viable, económica y ecológica para mejorar la calidad del agua turbia. En particular, especies amazónicas como el *Croton lechleri* y el *Croton draconoides* conocidas localmente como sangre de grado, han sido tradicionalmente valoradas por su contenido en compuestos bioactivos como taninos, flavonoides, resinas y alcaloides, los cuales presentan propiedades astringentes, aglomerantes y antisépticas (Morales et al., 2021; Aguilar et al., 2003). Diversos estudios han demostrado el potencial de estos metabolitos en la coagulación de partículas coloidales y en la reducción de parámetros críticos como la turbidez, el DBO₅, y la DQO, posicionando a estas especies como candidatas prometedoras para el tratamiento de aguas contaminadas (Bukhari, 2019; Saritha et al., 2017).

Pese a su potencial, aún existe una brecha significativa de conocimiento científico sobre el efecto comparativo entre ambas especies y sus distintas partes (corteza, hoja, raíz y látex) bajo condiciones experimentales controladas. En ese sentido, el presente estudio se propuso evaluar los efectos del coagulante/floculante a partir de *Croton lechleri* y *Croton draconoides* sobre quebradas contaminadas de forma natural, en condiciones de laboratorio, utilizando aguas recolectadas durante eventos de avenida, lo cual permitió simular condiciones reales de alta carga contaminante y evaluar su eficiencia en la remoción de turbidez y parámetros asociados.

Por lo expuesto anteriormente se plantea la siguiente pregunta: ¿Qué efectos produce el coagulante/floculante natural a partir del *Croton lechleri* y *Croton draconoides* en quebradas a escala de laboratorio, 2024? A partir de la anterior pregunta, se plantea la siguiente hipótesis:

El coagulante/floculante a partir del *Croton lechleri* y *Croton draconoides* produce efectos significantes en quebradas a escala laboratorio, 2024.

1.1. Objetivo General

Evaluar los efectos del coagulante/floculante natural a partir de *Croton lechleri* y *Croton draconoides* (sangre de grado) en quebradas a escala de laboratorio, 2024

1.2. Objetivo Específico

- Extraer el coagulante/floculante a partir de *Croton lechleri* y *Croton draconoides* (sangre de grado).
- Analizar los parámetros físicos y químicos de las aguas de las quebradas Córdova del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva
- Evaluar los efectos del coagulante/floculante a partir de *Croton lechleri* y *Croton draconoides* (sangre de grado) en los parámetros físicos de las aguas de quebrada contaminadas.
- Evaluar los efectos del coagulante/floculante a partir de *Croton lechleri* y *Croton draconoides* (sangre de grado) en los parámetros químicos de las aguas de quebrada contaminadas.
- Determinar la eficiencia del coagulante/floculante a partir de *Croton lechleri* y *Croton draconoides* (sangre de grado) en la descontaminación de las aguas de quebrada contaminadas.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

2.1.1. Internacionales

Diversas investigaciones han explorado el uso de coagulantes naturales en el tratamiento de aguas residuales, destacando el potencial de extractos vegetales como alternativas sostenibles a los coagulantes químicos tradicionales. Sánchez-Martín, Beltrán-Heredia y Gragera-Carvajal (2010) evaluaron la mejora del proceso de floculación mediante coagulantes basados en taninos, encontrando que estos compuestos pueden ser efectivos en la clarificación del agua, ofreciendo una alternativa ecológica. Por otro lado, Quispe, Aponte y Salazar (2020) analizaron la composición fitoquímica de la corteza de *Croton lechleri* y su influencia en la calidad del agua tratada, sugiriendo que los compuestos presentes en esta planta poseen propiedades coagulantes que contribuyen a mejorar la calidad del agua. En estudios relacionados, Pritchard et al. (2010) compararon la eficacia de *Moringa oleifera* con coagulantes químicos en la purificación de agua potable, demostrando que *Moringa oleifera* puede ser una solución sostenible y efectiva para países en desarrollo. Asimismo, Okuda et al. (2001) aislaron y caracterizaron un coagulante extraído de las semillas de *Moringa oleifera* utilizando una solución salina, destacando sus propiedades coagulantes y su potencial aplicación en el tratamiento de aguas. Ndabigengesere y Narasiah (1998) evaluaron la calidad del agua tratada mediante coagulación con semillas de *Moringa oleifera*, encontrando que este método mejora significativamente la calidad del agua al reducir la turbidez y otros contaminantes. En el contexto peruano, Morales, Huamán y Sánchez (2021) investigaron la resina de *Croton lechleri* como coagulante natural, concluyendo que esta resina posee propiedades coagulantes útiles en el tratamiento de aguas residuales. Lee et al. (2014) realizaron una revisión sobre el desarrollo y la aplicación de biofloculantes y coagulantes de origen vegetal, discutiendo las eficiencias de floculación, los mecanismos involucrados y los desafíos actuales en la implementación de estos coagulantes naturales. Hernández, Pérez y Rodríguez (2016) analizaron la influencia del secado y la molienda en la composición química de plantas medicinales, resaltando cómo estos procesos pueden afectar las propiedades químicas de las plantas, lo cual es relevante para su uso en aplicaciones como coagulantes naturales. Chávez, Rojas y Vargas (2017) examinaron el efecto de coagulantes naturales en el tratamiento de aguas superficiales, demostrando que ciertos coagulantes de origen vegetal pueden ser efectivos en la reducción de la turbidez del agua. Finalmente, Cáceres et al. (1995) exploraron las propiedades farmacológicas del látex de

Croton lechleri, identificando diversas actividades biológicas que sugieren su potencial uso en aplicaciones médicas y posiblemente en el tratamiento de aguas.

Vásquez, L., Huamán, R., & Salinas, J. (2019) llevaron a cabo un estudio para evaluar la eficacia de los extractos de *Croton lechleri* como coagulante en el tratamiento de aguas residuales. La investigación se centró en determinar la capacidad de estos extractos para remover contaminantes presentes en aguas residuales, comparando su desempeño con coagulantes tradicionales. Los resultados sugieren que *Croton lechleri* posee propiedades coagulantes que podrían ser aprovechadas en procesos de tratamiento de aguas, ofreciendo una alternativa natural y potencialmente más sostenible.

Jesús y Mercedes (2019) realizaron un estudio cuyo objetivo fue evaluar la capacidad de las semillas de *Moringa oleífera* como floculante natural en la purificación de aguas crudas provenientes del río Negro, río de Oro y la quebrada Floridablanca, en Santander. En su investigación, las semillas fueron utilizadas como alternativa al uso convencional de sulfato de aluminio. Inicialmente, se llevó a cabo la caracterización de los cuerpos de agua mencionados, analizando parámetros físicos, químicos y microbiológicos. Posteriormente, se aplicaron pruebas de jarras con concentraciones que oscilaron entre 3,5 mg/L y 170 mg/L, siguiendo tiempos similares a los empleados en procesos con alúmina. La efectividad del tratamiento se verificó mediante la comparación de los análisis realizados antes y después del proceso, obteniéndose en algunos casos niveles de remoción superiores al 90%.

Villabona et al. (2020) desarrollaron una investigación enfocada en comparar la eficacia de almidones extraídos de residuos agroindustriales —específicamente de mandioca (*Manihot esculenta*), ñame (*Dioscorea alata*) y plátano (*Musa paradisiaca*)— para su aplicación en procesos de coagulación-floculación orientados a reducir la turbidez de aguas sintéticas. La extracción del almidón se realizó empleando dos métodos: uno alcalino, utilizando hidróxido de sodio (NaOH), y otro con agua desionizada. Además, se evaluó la influencia de la concentración del coagulante y de las velocidades de agitación en la eficiencia del proceso. Los resultados mostraron que el almidón de plátano, independientemente del método de extracción, alcanzó el mayor porcentaje de reducción de turbidez, con una eficiencia de hasta el 94,6%, destacándose como un potencial reemplazo de los coagulantes sintéticos tradicionales.

2.1.2. Nacionales

Contreras et al. (2015) desarrollaron una investigación con el propósito de analizar la capacidad del mucílago obtenido del nopal (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural

complementario al sulfato de aluminio en el proceso de clarificación de aguas del río Magdalena. El estudio se llevó a cabo mediante pruebas de jarras, considerando variables como la concentración y proporción de los coagulantes, el pH y la velocidad de agitación. Se evaluaron parámetros como la turbidez (NTU), el color (UPC), los sólidos disueltos totales (mg/L), el pH y la conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$). Los resultados indicaron que, al emplear una concentración del 20% de mucílago de nopal y una agitación de 200 rpm, se logró reducir la turbidez por debajo de 2 NTU, alcanzando eficiencias de remoción de entre 96% y 98%. Asimismo, se consiguió la eliminación completa del color y una reducción de los sólidos disueltos hasta valores menores a 200 mg/L. Se concluyó que el uso de coagulantes naturales no modificó de forma significativa el pH del agua tratada, aunque en algunos casos se observó un aumento en la conductividad, posiblemente atribuible al coagulante químico.

Por su parte, Rivera (2017) evaluó la eficacia de coagulantes naturales obtenidos del almidón de yuca (*Manihot esculenta*) y del agua de plátano (*Musa paradisiaca*) para la remoción de turbidez y *Escherichia coli* en aguas del riachuelo Santa, ubicado en el distrito de Perené (Chanchamayo). La investigación aplicó la prueba de jarras para determinar la eficiencia de ambos coagulantes en distintas concentraciones hasta identificar la dosis óptima. Para el almidón de yuca se ensayaron dosis de 3 a 30 mg/L, mientras que para el agua de plátano se utilizaron volúmenes entre 65 y 150 mL/L. Los resultados mostraron que el almidón de yuca logró reducciones de turbidez entre 12,36% (de 186 a 163 NTU) y de *E. coli* en un 16,67% a una dosis de 3 mg/L. En cambio, el agua de plátano logró remover el 27,42% de la turbidez y hasta un 98,89% de *E. coli* a una dosis de 130 mL/L, siendo esta última remoción estadísticamente significativa.

2.1.3. Locales

Cerna (2020) desarrolló un estudio orientado a optimizar la dosis de alúmina más eficiente para la remoción de turbidez en el agua destinada al consumo humano en la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS). Para ello, se empleó agua sintética turbia preparada con caolín, simulando las condiciones del agua natural, y se ajustaron los valores de pH inicial para identificar el rango más adecuado para una mayor eficiencia en el proceso de clarificación. Se elaboró una curva patrón que permitió cuantificar las concentraciones de caolín, estableciendo su relación con la turbidez mediante un modelo polinómico de tercer grado, con altos niveles de correlación ($R^2 = 0,996$ y $0,999$). Las muestras experimentales se acondicionaron con turbideces iniciales de 50, 200 y 400 UNT, y con pH ajustados a 8, 9 y 10. Se aplicaron dosis de alúmina entre 3 y 15 mL, utilizando una solución madre de 8000 ppm.

Los resultados indicaron que las mejores eficiencias de remoción se alcanzaron con dosis entre 3 y 9 mL, observándose además que la alúmina tiende a disminuir el pH del agua tratada. Se determinó que los valores óptimos de remoción se obtuvieron cuando el pH final osciló entre 5 y 7,22. El análisis mediante superficie de respuesta permitió identificar que, para turbideces iniciales de 45,65, 205,99 y 400,91 UNT, las dosis óptimas de alúmina fueron de 58,45, 81,72 y 112,79 ppm respectivamente, con eficiencias de remoción del 98,16%, 96,94% y 96,32%.

Por su parte, Ruiz (2022) formuló un modelo matemático basado en superficie de respuesta para optimizar la remoción de turbidez en agua a nivel de laboratorio, utilizando sábila como floculante natural. En su investigación, se simuló la turbidez con caolín, y se emplearon combinaciones de alúmina y extracto de sábila al 1% bajo diferentes condiciones iniciales de turbidez y pH. A partir de los resultados experimentales, se construyó un modelo de superficie de respuesta para optimizar la dosis del coagulante, y se validó estadísticamente con herramientas gráficas e índices matemáticos. El análisis evidenció que la turbidez inicial, el pH y la dosis del coagulante influyen de manera significativa en la eficiencia del proceso. El modelo determinó que la sábila al 1% alcanza su mayor rendimiento en concentraciones que oscilan entre 0,1 mL y 0,4 mL por cada 500 mL de agua, aunque dichas dosis varían según las condiciones iniciales del agua. Este modelo demostró ser aplicable al tratamiento de aguas superficiales en la ciudad de Tingo María.

2.2. Contaminación del agua

La contaminación del recurso hídrico implica la incorporación de diversos compuestos o agentes que alteran sus características químicas, físicas y microbiológicas, generando impactos negativos tanto en el ambiente como en la salud pública. Entre sus consecuencias más graves se encuentran la pérdida de biodiversidad acuática, el deterioro de los ecosistemas acuáticos y la propagación de enfermedades como el cólera, la hepatitis y la disentería. Asimismo, esta problemática puede extender sus efectos a otros ecosistemas debido a la disminución o agotamiento de las fuentes de agua disponibles (Salas, 2016).

2.2.1. Agua residual Doméstica

Las aguas residuales domésticas provienen de las actividades cotidianas realizadas en el hogar, tales como la preparación de alimentos, el lavado de ropa y utensilios, así como la limpieza general (Cardona & García, 2008). Estas aguas están compuestas por una mezcla de orina, aguas grises y excretas humanas, y se caracterizan por contener elevadas concentraciones de detergentes, sustancias cloradas y materia orgánica.

2.3. Proceso de Coagulación-floculación

Las partículas coloidales presentes en el agua suelen mantenerse en suspensión debido a su carga eléctrica superficial, lo que impide su aglomeración natural. Para lograr su desestabilización es necesario neutralizar dichas cargas mediante la adición de iones con carga opuesta. Por lo general, los coloides tienen carga negativa, por lo que al incorporar un coagulante con carga positiva se facilita la reducción o eliminación de esta repulsión (Halder, 2021). Así, la función principal del coagulante es suprimir las cargas superficiales de los coloides para permitir su acercamiento.

La floculación, por su parte, complementa a la coagulación al promover la interacción entre las partículas ya desestabilizadas. Este proceso permite que las partículas se agrupen y formen flóculos de mayor tamaño, facilitando su separación del agua (Silva, 2017). Los floculantes actúan como agentes que estimulan la unión de los coloides suspendidos, generando agregados mayores que pueden ser removidos más eficientemente (Salehizadeh et al., 2018).

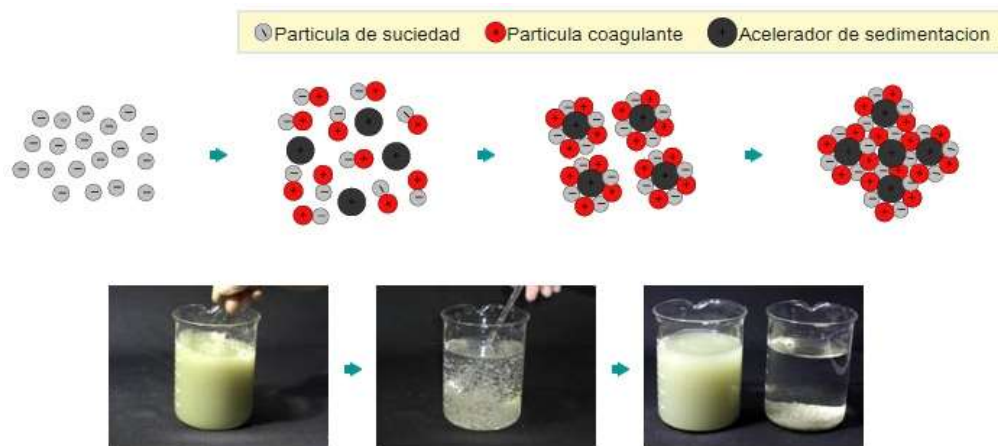


Figura 1. Mecanismo de coagulación-floculación

Fuente: Recuperado de Ángel Ibáñez (2017)

2.3.1. Coagulantes sintéticos

Los coagulantes de naturaleza sintética están comúnmente formulados a base de sales metálicas, particularmente de hierro y aluminio, que facilitan la neutralización de las cargas eléctricas presentes en las partículas coloidales del agua. A nivel global, las sales de aluminio se emplean con mayor frecuencia como agentes coagulantes. Sin embargo, el uso de polímeros sintéticos genera preocupación debido a la posible presencia de monómeros residuales, los cuales han sido asociados con efectos adversos como propiedades cancerígenas, neurotoxicidad y daños ambientales significativos (Šćiban et al., 2009; Cevallos et al., 2022).

2.3.2. Coagulantes naturales

Se denomina coagulantes naturales a aquellos derivados de extractos vegetales, obtenidos de diferentes partes de las plantas como semillas, hojas, cortezas, raíces o frutos, siendo especies como *Moringa oleifera*, *Jatropha curcas* y goma guar algunas de las más representativas (Pritchard et al., 2009). Los mecanismos de coagulación pueden clasificarse en cuatro tipos: formación de puentes poliméricos, barrido por sedimentación, compresión de la doble capa eléctrica y neutralización de cargas. En el caso de los coagulantes vegetales, los mecanismos predominantes son la formación de puentes poliméricos y la neutralización de cargas, siendo el primero considerado más eficaz en la agregación de partículas (Hariz et al., 2018).

2.4. Parámetros fisicoquímicos del agua

2.4.1. Turbidez

La turbidez se genera cuando la luz se dispersa al atravesar un líquido que contiene partículas suspendidas, incluyendo coloides. Esta propiedad óptica se relaciona directamente con la presencia de sólidos en suspensión en el agua, y se mide habitualmente mediante un turbidímetro, cuyos resultados se expresan en Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU) (Delegido et al., 2019).

2.4.2. Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Los sólidos suspendidos totales son aquellas partículas insolubles presentes en el agua, y pueden clasificarse según su comportamiento en medios estáticos o en movimiento. Mientras algunas partículas, como los coloides, logran permanecer en suspensión aún en reposo, otras requieren agitación o flujo continuo para mantenerse suspendidas. La presencia de SST está directamente relacionada con los niveles de turbidez: a mayor cantidad de sólidos, mayor será la turbidez del agua (Vargas, 2016).

2.4.3. Temperatura

La temperatura representa una magnitud física que cuantifica la energía térmica de un cuerpo, y está directamente relacionada con la velocidad del movimiento molecular de las partículas que lo componen. En el contexto del recurso hídrico, la temperatura del agua es un parámetro clave que influye en numerosos procesos fisicoquímicos y biológicos. Un aumento en la temperatura implica que las moléculas o átomos del agua se desplazan con mayor rapidez, lo que puede modificar la densidad del agua, reducir la solubilidad de gases como el oxígeno

disuelto y alterar la velocidad de las reacciones químicas. Asimismo, la temperatura incide significativamente en la actividad microbiana, ya que regula el metabolismo y la reproducción de los microorganismos presentes en cuerpos de agua naturales o tratados. Por ello, su monitoreo es esencial en el análisis de la calidad del agua para fines ecológicos, industriales o de consumo humano (Rodríguez et al., 2016).

2.4.4. Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica mide la capacidad de una solución acuosa para transportar corriente eléctrica, la cual depende de la concentración, movilidad y carga de los iones presentes, así como de la temperatura. Las soluciones que contienen sales inorgánicas suelen ser buenos conductores, mientras que las que contienen compuestos orgánicos presentan una conductividad significativamente menor. Esta propiedad se expresa en siemens por metro (S/m) (Sanabria, 2006).

2.4.5. pH

El pH es una medida que permite determinar la acidez o alcalinidad de una solución acuosa, indicando la concentración de iones hidrógeno presentes en el medio. Esta variable es fundamental para evaluar la química del agua, ya que influye en los procesos biológicos, químicos y físicos que ocurren en los sistemas acuáticos (Jiménez et al., 2000).

2.4.6. Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto se refiere a la cantidad de oxígeno gaseoso que está presente en el agua, disponible para los organismos acuáticos. Es un parámetro fundamental en la evaluación de la calidad del agua, ya que influye directamente en la respiración de peces, bacterias y otros organismos acuáticos. Niveles bajos de oxígeno disuelto pueden indicar contaminación orgánica o eutrofización, lo que compromete la vida acuática y el equilibrio del ecosistema (Delzer & McKenzie, 2003).

2.4.7. DQO

La DQO cuantifica la cantidad de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica (y parte de la inorgánica) presente en una muestra de agua mediante un agente oxidante fuerte, en condiciones controladas de laboratorio. En este método, se emplea dicromato de potasio en medio ácido, con catalizadores como sulfato de plata y agentes reductores como sulfato mercúrico. La DQO, expresada en mg/L, proporciona una medida rápida de la carga orgánica total, y es una alternativa más ágil a la DBO5 (Hernán, 2007).

2.4.8. DBO₅

La DBO₅ se refiere a la cantidad de oxígeno consumido por microorganismos aeróbicos durante la descomposición de materia orgánica en un periodo de cinco días. Este parámetro es ampliamente utilizado para evaluar la calidad del agua, ya que proporciona información sobre el nivel de contaminación orgánica y la capacidad del cuerpo de agua para sostener vida acuática (Navarro, 2007).

2.5. Especie *Croton draconoides*

2.5.1. Clasificación taxonómica

Reino	: Plantae
División	: Magnoliophyta
Clase	: Magnoliopsida
Orden	: Malpighiales
Familia	: Sterculiaceae
Género	: Croton
Especie	: <i>Croton draconoides</i>

2.5.2. Descripción botánica

Croton draconoides es una especie arbórea que alcanza alturas entre los 18 y 30 metros y presenta diámetros que varían entre 30 y 80 cm. Sus ramas emergen a partir del segundo tercio del fuste, y la corteza externa, de color marrón claro, se presenta agrietada, mientras que la interna es suave, uniforme y de un tono rosado claro. Al realizar un corte en el tronco, se observa una abundante exudación de savia roja y semitransparente. Las ramillas terminales, de sección circular y entre 2 y 4 mm de grosor, muestran una tonalidad marrón claro al secarse, y están cubiertas de tricomas estrellados, particularmente en las zonas apicales. Las hojas son simples, alternas y dispuestas en espiral, con dimensiones que oscilan entre 12–35 cm de largo y 6–15 cm de ancho, sostenidas por pecíolos de 6–18 cm que presentan una o dos glándulas rojizas cerca de la base de la lámina. Las inflorescencias se disponen en espigas terminales de 25 a 35 cm de longitud, compuestas por flores unisexuales y pequeñas, de 1–2 mm, con perianto reducido. Las flores masculinas poseen numerosos estambres, mientras que las femeninas contienen un ovario globoso y estilos filiformes de tamaño similar. El fruto es una cápsula tricarpelar, de tamaño pequeño, entre 2 y 4 mm de largo (Obando, 2015).

2.5.3. Distribución

En territorio peruano, *Croton draconoides* se encuentra principalmente en la región amazónica, especialmente en zonas situadas por debajo de los 700 metros sobre el nivel del mar. Esta especie crece en ambientes caracterizados por una alta pluviosidad constante, aunque también se adapta a áreas con estaciones secas definidas. Es una planta heliófita, de rápido crecimiento, frecuente en bosques secundarios de carácter pionero y en lugares afectados por la intervención humana. Se desarrolla en suelos con texturas variables, niveles diversos de acidez, baja fertilidad, buen drenaje y con pedregosidad de leve a moderada (Salatino, 2007).

2.5.4. Componentes químicos

El látex de especies del género *Croton*, incluyendo *C. draconoides*, contiene compuestos mayoritariamente polifenólicos, entre los que se destacan catequina, epicatequina, galocatequina, epigalocatequina y distintas proantocianidinas. Uno de los compuestos más estudiados es el SP-303, un oligómero proantocianidínico de peso molecular aproximado de 2100 Daltons, cuyas unidades básicas están conformadas por (+)-catequina, (+)-galocatequina, (-)-epicatequina y (-)-epigalocatequina, siendo las últimas dos las más abundantes. Además, se han identificado componentes minoritarios como el alcaloide taspina, el lignano dimetilcedrusina, así como diterpenos como el ácido hardwickiico, bicantriol, crolequinol, ácido crolequínico y las korberinas A y B. También se encuentran presentes fitosteroles como β -sitosterol y su derivado glicosilado, además de otros compuestos fenólicos como el 1,3,5-trimetoxibenceno, 2,4,6-trimetroxifenol, 3,4-dimetoxifenol, alcohol 3,4-dimetoxibenzílico y alcohol 4-hidroxifenético (Coy et al., 2016).

2.6. Especie *Croton lechleri*

2.6.1. Clasificación taxonómica

Reino	: Plantae
División	: Magnoliophyta
Clase	: Magnoliopsida
Orden	: Malpighiales
Familia	: Sterculiaceae
Género	: <i>Croton</i>
Especie	: <i>Croton lechleri</i>

2.6.2. Descripción botánica

De acuerdo con Ramírez (2003), se trata de un árbol de copa amplia, globosa y redondeada, cuya corteza tiene una tonalidad entre gris y blanco, de la cual fluye un látex característico de color rojizo similar al vino. Sus hojas son cordiformes y se disponen de manera alterna, aunque en algunos casos pueden ser opuestas o verticiladas; presentan dimensiones que oscilan entre 12 y 20 cm de largo, y entre 5 y 14 cm de ancho. En la base de cada hoja se encuentran dos glándulas, y las hojas más jóvenes exhiben una coloración ferruginosa con una textura tomentosa en ambas superficies. Las inflorescencias se presentan en la parte terminal de las ramas, organizadas en racimos laxos. Las flores son de color ámbar y poseen numerosos estambres. El fruto es una cápsula globosa y deprimida, que se abre elásticamente al madurar; mide aproximadamente 3 mm de largo por 4.5 mm de ancho y está conformado por tres monocarpas bivalvos. Las semillas son lisas, con una estructura conocida como carúncula, y contienen un endosperma rico en aceites.

2.6.3. Distribución geográfica

En el territorio peruano, esta especie se encuentra ampliamente distribuida en diferentes regiones de la Amazonía y la selva alta. Se reporta su presencia en los departamentos de Loreto (zonas como el río Napo, Indiana, río Amazonas, Padre Cocha y río Nanay), San Martín, Huánuco (incluyendo Puerto Inca, Honoria, río Pachitea y Tingo María), así como en Pasco (especialmente en Oxapampa, Villa Rica, río Palcazú y Puerto Bermúdez). También se le localiza en Junín (Satipo, río Pangoa), Cusco, Madre de Dios (Puerto Maldonado, ríos Tambopata, de las Piedras, Madre de Dios y Manú, incluso hasta la frontera con Bolivia), y Ucayali (Aguaytía, La Divisoria, carretera Marginal San Alejandro–Puerto Bermúdez y Atalaya) (Ríos, 2006).

2.6.4. Componentes químicos

El látex de *Croton lechleri*, comúnmente conocido como "sangre de grado", contiene una alta concentración de compuestos bioactivos, siendo las proantocianidinas oligoméricas su componente mayoritario, representando cerca del 90% del peso seco. Estas sustancias están formadas por unidades básicas como (+)-catequina, (-)-epicatequina, (+)-galocatequina y (-)-epigalocatequina, las cuales se ensamblan en estructuras complejas como el SP-303 (crofelemer), un oligómero con propiedades antivirales, antidiarreicas y antiinflamatorias ampliamente reconocidas (Ubillas et al., 1994)

Además de estos compuestos principales, el látex también contiene metabolitos secundarios en menores proporciones, tales como el alcaloide taspina, conocido por su capacidad cicatrizante, y diversos diterpenos, incluyendo ácido crolequínico, crolequinol, bicantriol, así como lignanos como la dimetilcedrusina. A esto se suman fitosteroles como el β -sitosterol y su glicosilado, junto con otros compuestos fenólicos, entre ellos el 1,3,5-trimetoxibenceno, 2,4,6-trimetroxifenol, 3,4-dimetoxifenol, el alcohol 3,4-dimetoxibenzílico y el alcohol 4-hidroxifenético. Todos estos elementos en conjunto contribuyen a las propiedades antimicrobianas, antioxidantes y regenerativas del látex, las cuales respaldan su uso tradicional en la medicina natural para el tratamiento de heridas, infecciones y afecciones gastrointestinales (Ubillas et al., 1994).

III. MATERIALES Y METODOS

3.1. Lugar de ejecución

La presente investigación se llevó a cabo en el Laboratorio de Calidad de Agua de la Facultad de Recursos Naturales Renovables, perteneciente 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.s.n.m.



Figura 2. Mapa de ubicación del lugar de ejecución

3.2. Material y métodos

3.2.1. Materiales y equipos

Materiales

20 matraces de 1000 ml de capacidad, pipetas de 10 ml de capacidad, tamizador, 4 valdes de capacidad de 20 L, 10 vasos precipitados de 1000 ml y 500 ml, pipetas de 10 ml, cinta negra.

Equipos

Estufa, Licuadora Oster, Trituradora manual, test de jarras PHIPPS & BIRD, medidor de turbidez y cloro HI93414-01 HANNA, multiparámetro multi 3630 IDS, multiparámetro DR900, Laptop Lenovo Computadora portátil 15, Intel Core i5-1135G7, impresora Epson EcoTank L555 y motocicletas Honda de 125cc.

Insumos

Agua destilada, *Croton lechleri* y *Croton draconoides*.

Software

ArcGIS, Microsoft Word, Microsoft Excel, RStudio, Google earth pro.

3.3. Metodología

3.3.1. Extracción del coagulante-floculante a partir de las especies de *Croton lechleri* y *Croton draconoides* para tratar agua

Para la investigación, se identificó dos especies de *Croton*: *Croton lechleri* y *Croton draconoides* en la provincia de Leoncio Prado de los cuales se extrajo los órganos de estas plantas a utilizar para la obtención del coagulante-floculante.

1) Ubicación de las plantas de *Croton lechleri* y *Croton draconoides* en la provincia de Leoncio Prado

Para la localización y registro de las especies vegetales *Croton lechleri* (conocido como sangre de grado) y *Croton draconoides* en estado silvestre dentro de la provincia de Leoncio Prado, se contó con la participación de un especialista en identificación de especies forestales de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS). Este procedimiento se desarrolló en el marco del reconocimiento botánico requerido para la recolección de material vegetal destinado a ensayos de eficiencia coagulante.

2) **Identificación de *Croton lechleri***

La planta de *Croton lechleri* fue identificada en un sector de bosque transicional en el distrito de Rupa Rupa, específicamente dentro de los límites del Bosque Reservado de la UNAS (BRUNAS). El punto fue registrado con la aplicación GPS Map Camera, obteniéndose las siguientes coordenadas geográficas:

- Latitud: -9.314678°
- Longitud: -75.996895°
- Coordenadas UTM: Zona 18L; Este: 409,152 m; Norte: 897,055 m

Durante la visita, se realizó la inspección del estado fitosanitario del individuo, y se documentó su corteza mediante imágenes georreferenciadas, a fin de garantizar la trazabilidad del muestreo botánico. El árbol se encontró en un área no perturbada, con cobertura relativamente boscosa ligeramente densa, ideal para el aprovechamiento sostenible de material vegetal.

3) **Identificación de *Croton draconoides***

Por su parte, el espécimen de *Croton draconoides* fue localizado en las inmediaciones del centro poblado de Las Palmas, también en la provincia de Leoncio Prado, a escasa distancia del río Huallaga. Las coordenadas obtenidas fueron:

- Latitud: -9.330926°
- Longitud: -75.993991°
- Coordenadas UTM: Zona 18L; Este: 409,453 m; Norte: 895,399 m

La especie fue identificada en un borde de ribera, lo que es característico de su hábitat natural en zonas húmedas de selva alta. Se registró el momento exacto de la intervención mediante fotografía georreferenciada, y se verificó que el ejemplar se encontraba en condiciones adecuadas para el muestreo experimental.

Ambas identificaciones fueron validadas por el personal técnico de la UNAS, quien empleó claves taxonómicas regionales y experiencia previa en flora amazónica. Los puntos fueron además incorporados en un mapa digital de distribución de las especies, con el fin de fortalecer futuras campañas de recolección, manejo y conservación.

4) Extracción de muestras de la corteza del tallo, hojas, raíces secundarias del *Croton lechleri* y *Croton draconoides* para la obtención de coagulante en forma de polvo o material particulado \leq a 250micras

Una vez identificados los especímenes de *Croton lechleri* y *Croton draconoides* en su hábitat natural, se procedió a la extracción controlada de material vegetal, específicamente de la corteza del tallo, hojas maduras y raíces secundarias, con el objetivo de evaluar su efectividad como coagulantes naturales en la remoción de turbiedad del agua.

La extracción se realizó de forma manual y con herramientas limpias (cuchillas de acero inoxidable y podadoras), seleccionando ejemplares saludables, sin signos de enfermedad ni contaminación. Para cada parte vegetal, se recolectaron aproximadamente 400 a 800 gramos de material fresco por especie, garantizando representatividad del contenido fitoquímico.

- Corteza del tallo: se retiraron secciones externas de entre 15 y 30 cm de longitud, sin comprometer la vitalidad del árbol. Se evitó la remoción completa del anillo perimetral para no interrumpir el flujo de savia.
- Hojas: se recolectaron únicamente hojas maduras y sanas, descartando las que presentaban manchas, perforaciones o signos de senescencia.
- Raíces secundarias: se extrajeron con cuidado del subsuelo superficial (< 30 cm de profundidad), procurando no dañar las raíces principales ni el sistema radicular total.

El material vegetal fue colocado en bolsas de papel transpirable y transportado al laboratorio en menos de 2 horas, evitando la exposición a la luz solar directa. Una vez en el laboratorio, se procedió a su limpieza con agua destilada para eliminar impurezas externas como tierra, hongos o residuos orgánicos, y luego se dejó secar al ambiente durante 24 horas.

Posteriormente, el material fue sometido a deshidratación en estufa a 50–70 °C durante 72 horas o hasta alcanzar peso constante, evitando temperaturas superiores que pudieran alterar los compuestos bioactivos (como taninos, flavonoides o mucílagos). El material seco fue triturado inicialmente con un molino de cuchillas y luego tamizado mediante una malla metálica estándar No. 60, equivalente a partículas de tamaño \leq 250 micras (μm).

El polvo obtenido fue almacenado en frascos de vidrio ámbar con tapa hermética, previamente rotulados según especie y parte utilizada (por ejemplo: “CL-Corteza” para *Croton lechleri*, corteza del tallo). Los frascos se conservaron en condiciones de humedad controlada (< 50%) y temperatura ambiente (20–25 °C), hasta su utilización en los ensayos de

coagulación/floculación. Este procedimiento permitió garantizar la integridad de los compuestos funcionales del coagulante vegetal y su aplicabilidad en condiciones experimentales estandarizadas.

5) Extracción de muestras del látex del *Croton lechleri* y *Croton draconoides* y su tamizado en tamices \leq a 250 micras para su conservación

La recolección de látex natural se realizó en ejemplares previamente identificados de *Croton lechleri* y *Croton draconoides*, localizados en la provincia de Leoncio Prado. El procedimiento fue ejecutado siguiendo criterios de ética ambiental y buenas prácticas forestales no maderables, garantizando la mínima afectación fisiológica de los árboles.

Para la obtención del látex, se realizaron incisiones longitudinales superficiales en el tallo principal de cada especie utilizando cuchillas de acero quirúrgico esterilizadas. Las incisiones no superaron los 5 mm de profundidad ni se aplicaron en más del 25% de la circunferencia del fuste, a fin de no comprometer el transporte vascular del vegetal. La secreción exudada se recolectó directamente en recipientes de vidrio estéril y ámbar, evitando el contacto con contaminantes externos o con la corteza.

En total, se obtuvieron entre 190 y 250 mL de látex fresco por individuo, el cual fue recolectado en campo durante las primeras horas de la mañana (6:00–8:00 a.m.) para garantizar su fluidez y composición óptima. Luego fue transportado inmediatamente al laboratorio en neveras portátiles a temperatura ambiente controlada (20–25 °C), sin aplicar ningún tipo de preservante químico.

En el laboratorio, el látex fue dejado reposar durante 30 minutos para permitir la decantación de posibles impurezas naturales. Posteriormente, se ha tamizado con malla estándar N.º 60 (\leq 250 μ m), al igual que el material vegetal procesado previamente. El látex fue almacenado en frascos de vidrio color ámbar, con cierre hermético y rotulado correspondiente por especie (ej. "CL-Látex" para *Croton lechleri*). Los frascos se mantuvieron en ambiente seco (< 50% H.R.) y temperatura constante para preservar su actividad coagulante. Este procedimiento garantizó la obtención de látex en forma líquida y en tamaño adecuado para su uso experimental en procesos de remoción de turbidez, conservando sus propiedades químicas naturales (taninos, alcaloides, compuestos fenólicos, etc.).

3.3.2. Análisis de las aguas de la quebrada Córdoba del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva

1) Identificación del agua de la quebrada Córdoba a muestrear en el BRUNAS

Para la identificación del punto de muestreo en la quebrada Córdoba, ubicada dentro del ámbito del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (BRUNAS), se llevó a cabo un reconocimiento en campo aplicando criterios técnicos, hidrológicos y de accesibilidad. En primer lugar, se revisaron mapas topográficos e hidrológicos del área, utilizando herramientas de sistemas de información geográfica (SIG), así como datos cartográficos proporcionados por la propia Universidad Nacional Agraria de la Selva y el Instituto Geográfico Nacional (IGN).

Posteriormente, se realizó una visita de inspección durante la temporada de avenida, con la finalidad de identificar un tramo representativo de la quebrada que mantuviera flujo superficial constante y que no se viera afectado por descargas puntuales ni por actividades antrópicas cercanas. Se validó en campo la accesibilidad del lugar, la estabilidad del cauce y la cobertura vegetal circundante, criterios necesarios para asegurar condiciones apropiadas de muestreo. Durante la visita, se empleó un receptor GPS portátil (modelo Garmin® 64s) para registrar las coordenadas UTM exactas del sitio seleccionado. Se priorizó un punto ubicado aguas arriba del tramo medio, con adecuada oxigenación y profundidad media, lo cual permitió garantizar que las muestras recolectadas fueran representativas de la calidad del agua de la quebrada en condiciones naturales. Finalmente, el punto fue codificado como “QCórdoba-BRUNAS-PM01”, se elaboró un croquis con referencias espaciales y se documentaron fotográficamente las condiciones ambientales presentes.

2) Recolección de muestra de agua

Una vez identificado y georreferenciado el punto de muestreo en la quebrada Córdoba (QCórdoba-BRUNAS-PM01), ubicado en el Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (BRUNAS), se procedió a realizar la recolección de muestras de agua durante condiciones de avenida. Este criterio fue fundamental debido a que el objetivo experimental consistía en evaluar la eficiencia de remoción de turbiedad mediante coagulantes/floculantes naturales.

La recolección se llevó a cabo tras eventos de precipitación intensa, que ocasionaron un aumento significativo en el caudal de la quebrada y una evidente suspensión de sólidos en el agua, fenómeno característico de los procesos de escorrentía superficial en zonas de alta

pendiente y vegetación densa. Para ello, se monitoreó previamente el comportamiento hidrológico del cauce y se definieron ventanas de muestreo coincidentes con las primeras horas posteriores a la lluvia, cuando el nivel de turbidez es mayor.

Las muestras fueron recolectadas manualmente, utilizando bidones plásticos limpios de 20 litros (de grado alimentario), previamente lavados con agua destilada y enjuagados con la misma agua de la quebrada antes de su llenado final. El procedimiento se realizó desde el centro del cauce activo, evitando la recolección de agua superficial estancada o lateral. Se tomó especial cuidado en evitar el ingreso de sedimentos de fondo y se emplearon guantes de nitrilo para evitar contaminación cruzada.

Las muestras fueron rotuladas con el código del punto, fecha y hora de recolección, y se transportaron al laboratorio de la Universidad Nacional Agraria de la Selva en un lapso no mayor a 2 horas. Durante el traslado se protegieron de la luz solar directa y de variaciones térmicas, utilizando conservadoras portátiles. Una vez en el laboratorio, las muestras fueron almacenadas a temperatura ambiente (20–25 °C) y fueron utilizadas dentro de las 12 horas posteriores a su recolección para garantizar la estabilidad de los parámetros fisicoquímicos, especialmente la turbidez inicial.

Este procedimiento permitió asegurar la representatividad, homogeneidad y calidad de las muestras turbias naturales, necesarias para los ensayos de laboratorio en coagulantes vegetales, garantizando que las condiciones de análisis simularan adecuadamente escenarios reales de tratamiento de agua superficial.

3) Medición de parámetros iniciales

Los parámetros iniciales fueron medidos antes de la aplicación de los coagulante-floculante a partir de *Croton lechleri* y *Croton draconoides*; los parámetros escogidos y sus métodos de evaluación se observan en la siguiente Tabla.

Tabla 1. Parámetros de interés para el coagulante-floculante de *Croton lechleri* y *Croton draconoides*

Parámetros	Indicadores	Método de Evaluación
Físicos	Turbiedad	Turbidímetro
	Conductividad eléctrica	Directo (Multiparámetro)
	Sólidos totales suspendidos	Método instrumental
	Temperatura	Método instrumental

	Oxígeno disuelto	Directo (Multiparámetro)
Químicos	pH	Directo (multiparámetro)
	DQO	Colorimetría
	DBO ₅	DBO ₅ = (OD inicial – OD final)

Medición de turbiedad

La turbidez fue determinada mediante medición directa utilizando un turbidímetro del laboratorio de Calidad de Agua. Este equipo funciona midiendo la cantidad de luz dispersada por las partículas suspendidas en una muestra de agua, lo cual permite evaluar su grado de claridad u opacidad. Los valores obtenidos fueron registrados en Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU), conforme a los estándares establecidos para este tipo de análisis.

Medición de temperatura

La temperatura del agua fue determinada utilizando el equipo multiparámetro Multi 3630 IDS, perteneciente al laboratorio de Calidad de Agua. La medición se realizó mediante un sensor específico incorporado en el electrodo del equipo, registrando los valores en grados Celsius (°C) de forma directa y precisa.

Medición de Sólidos totales disueltos

La concentración de sólidos totales disueltos fue determinada utilizando el equipo multiparámetro Multi 3630 IDS del laboratorio de Calidad de Agua, equipado con un sensor de conductividad. La medición se realizó de manera indirecta, a través del registro de la conductividad eléctrica del agua y la posterior conversión automática a STD mediante un factor preestablecido por el equipo, expresado en miligramos por litro (mg/L).

Medición de conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica del agua fue determinada de forma directa utilizando el equipo multiparámetro Multi 3630 IDS, perteneciente al laboratorio de Calidad de Agua. Esta medición evalúa la capacidad del agua para conducir corriente eléctrica, la cual depende principalmente de la presencia y concentración de iones disueltos. Los valores obtenidos fueron registrados automáticamente por el equipo y expresados en microsiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

Medición de oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto fue medido directamente utilizando el multiparámetro multi 3630 IDS del laboratorio de calidad de agua. La lectura se realizó de manera directa del multiparámetro el cual nos dio los valores de OD en mg/L.

Medición de pH

La determinación del pH se realizó mediante medición directa utilizando el multiparámetro Multi 3630 IDS del laboratorio de Calidad de Agua. Este equipo permite registrar los valores de pH de manera precisa e inmediata, los cuales fueron anotados como datos adimensionales, al tratarse de una escala logarítmica que expresa la concentración de iones hidrógeno (H^+) en la muestra analizada.

Medición de DQO

La evaluación de la DQO se llevó a cabo mediante el método colorimétrico, empleando dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) como agente oxidante. Para preservar las muestras, estas fueron acidificadas con ácido sulfúrico (H_2SO_4) inmediatamente después del muestreo. Posteriormente, se llevó a cabo la reacción oxidativa y se midió la intensidad del color generado utilizando un espectrocolorímetro. Los resultados obtenidos fueron expresados en miligramos de oxígeno por litro ($mg\ O_2/L$), indicando la cantidad de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica e inorgánica presente en la muestra.

Medición de DBO₅

La medición de la DBO₅ se basó en el método por diferencia de oxígeno disuelto. Inicialmente, se determinó el valor del oxígeno disuelto (OD) en la muestra de agua; luego, esta fue incubada durante cinco días a temperatura constante. Al finalizar el periodo de incubación, se midió nuevamente el OD y la diferencia entre ambas mediciones permitió calcular el valor de la DBO₅. Este parámetro se expresa en miligramos de oxígeno por litro ($mg\ O_2/L$) y representa la cantidad de oxígeno consumido por los microorganismos aeróbicos durante la degradación de materia orgánica biodegradable.

3.3.3. Efecto que produce las especies de *Croton lechleri* y *Croton draconoides* como coagulante-floculante para tratar agua de la quebrada Córdova

1) Test de Jarras

El agua recolectada de la quebrada previamente identificada fue distribuida en cuatro jarras de ensayo por cada órgano vegetal evaluado (corteza del tallo, hojas, raíces secundarias

y látex). A cada una de estas muestras se le añadió el coagulante/floculante en polvo correspondiente a cada órgano y especie de *Croton lechleri* y *Croton draconoides*, empleando cuatro concentraciones distintas: 0,5 mg/L, 1,0 mg/L, 1,5 mg/L y 2,0 mg/L. El procedimiento experimental siguió un protocolo tipo jar test, aplicando inicialmente una mezcla rápida a 200 rpm durante 1 minuto, seguida de una mezcla lenta a 45 rpm durante 15 minutos. Concluida la agitación, se permitió la sedimentación estática durante 15 minutos. Finalmente, se procedió a la caracterización de los parámetros físicos y químicos del agua tratada, con el fin de evaluar la eficiencia de remoción de cada tratamiento.



Figura 3. Esquema experimental de las especies de *Croton lechleri* y *Croton draconoides* como coagulante-floculante

2) Determinación de eficiencia de remoción de las dos especies de *Croton*

Para determinar la eficiencia de remoción del coagulante-floculante a base de *Croton lechleri* y *Croton draconoides*, se determinó el porcentaje de remoción de cada proporción por cada parámetro escogido; para ello, se utilizó la siguiente ecuación:

$$ER(\%) = \left[\frac{M_0 - M_f}{M_0} \right] * 100 \quad (1)$$

Donde:

ER : Eficiencia de remoción

M_0 : Medición inicial del parámetro

M_f : Medición final parámetro

3.4. Criterios de investigación

3.4.1. Nivel de investigación

De acuerdo con Hernández (2014) el nivel de esta investigación es explicativo y/o experimental ya que se busca determinar el efecto que tiene la aplicación de coagulantes/floculantes elaborados a partir de dos especies de *Croton* en las aguas de quebradas contaminadas naturalmente mediante el análisis de los parámetros físicos, químicos e inorgánicos de ésta para lo cual es necesario la manipulación de la variable independiente en este caso los coagulantes/floculantes ya que se probara en efecto de estos a diferentes concentraciones, de diferentes partes de las plantas y de dos diferentes especies.

3.4.2. Tipo de investigación

De acuerdo con Garcés (2000) el tipo es aplicativa ya que esta investigación se dirige a su aplicación inmediata y no al desarrollo de teoría científica buscando determinar el efecto de los coagulantes/floculantes elaborados a partir de dos especies de *Croton* en las aguas de quebradas contaminadas naturalmente y de esta manera evaluar si podrían ser utilizados posteriormente como productos coagulantes para el tratamiento de aguas contaminadas.

3.4.3. Variable de investigación

Tabla 2. Sistema de variables de investigación

SISTEMA DE VARIABLES	Indicadores
Variable Independiente (X): Coagulantes/Floculantes a partir <i>Croton lechleri</i> y <i>Croton draconoides</i>	Peso de látex
	Peso de raíz
	Peso de cáscara del tallo
	Peso de hojas
Variable Dependiente (Y): Aguas de quebradas contaminadas naturalmente	Turbiedad
	Temperatura
	Solidos disueltos totales
	Conductividad eléctrica
	Oxígeno disuelto
	pH
	DQO
DBO ₅	

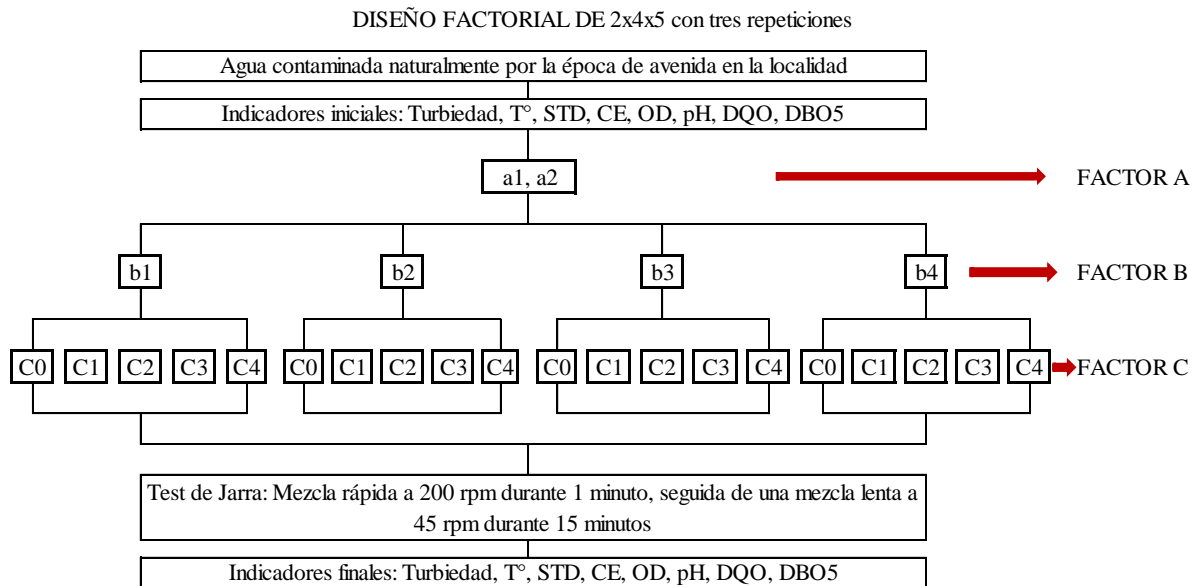
3.4.4. Operacionalización de variables

Tabla 3. Operacionalización de la variable de investigación

Variable	Definición Conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores
X: Coagulantes/Floculantes a partir <i>Croton lechleri</i> y <i>Croton draconoides</i>	Procesos para separar y eliminar los sólidos suspendidos en el agua y el tratamiento de aguas residuales mediante la neutralización de cargas de las partículas coloidales (Halder, 2021).	Extracción de coagulantes-floculantes naturales a partir del látex, raíz, hojas, cáscara del tallo	<i>Croton lechleri</i>	Peso de látex Peso de raíz Peso de cáscara del tallo Peso de hojas
			<i>Croton draconoides</i>	Peso de látex Peso de raíz Peso de cáscara del tallo Peso de hojas
Y: Aguas de quebradas contaminadas naturalmente	Aquellas aguas provenientes de quebradas contaminadas naturalmente generalmente con alta cantidad de solidos suspendidos producto de la lluvia	Se medirán los parámetros elegidos antes y después de la aplicación del coagulante-floculante para determinar el efecto que produce en el agua contaminada	Parámetros Físico Parámetros Químicos	Turbiedad Temperatura Solidos disueltos totales Conductividad eléctrica Oxígeno disuelto pH DQO DBO ₅

3.4.5. Diseño de investigación

Considerando la manipulación de las variables independientes, el diseño es experimental de tipo factorial (Hernández et al., 2014), donde se tendrá 03 factores: Factor A (a1: *Croton lechleri*, a2: *Croton draconoides*), Factor B (b1: Corteza del tallo, b2 Hoja de la especie, b3: Raíz secundaria, b4: Látex de la especie), Factor C (c0: Testigo, 0,0 mg/L, c1: 0,5 mg/L, c2: 1,0 mg/L, c3: 1,5 mg/L, c4: 2,0 mg/L) con tres repeticiones.



Leyenda: Factor A (a1: *Croton lechleri*, a2: *Croton draconoides*), Factor B (b1: Corteza del tallo, b2 Hoja de la especie, b3: Raíz secundaria, b4: Látex de la especie), Factor C (c0: Testigo, 0,0 mg/L, c1: 0,5 mg/L, c2: 1,0 mg/L, c3: 1,5 mg/L, c4: 2,0 mg/L)

Figura 4. Diseño Metodológico de la investigación para las 2 especies: *Croton lechleri* y *Croton draconoides*

Tabla 4. Diseño experimental – diseño factorial de 2X4X5 con tres repeticiones

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

3.4.6. Población y muestra

La población en el presente trabajo de investigación son las aguas de la quebrada Córdoba, contaminadas naturalmente, y está ubicada en el Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, y se está considerando como una población infinita.

Para la selección de las muestras se empleó un muestreo no probabilístico por conveniencia, considerando la accesibilidad del sitio y la representatividad de las condiciones naturales del recurso hídrico. Las muestras de agua fueron tomadas directamente de la quebrada Córdoba, ubicada en el Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (BRUNAS), durante la época de avenida, cuando las intensas precipitaciones provocan una mayor escorrentía superficial y, en consecuencia, una carga natural elevada de sólidos en suspensión y turbidez, condiciones ideales para evaluar la eficiencia de remoción mediante coagulantes naturales.

3.4.7. Técnicas e instrumentos de investigación

1) Técnica de investigación

La técnica de investigación empleada en el presente estudio fue la observación experimental, orientada al análisis de los efectos de la aplicación de coagulantes/floculantes vegetales obtenidos de *Croton lechleri* y *Croton draconoides* sobre la calidad del agua turbia recolectada de la quebrada Córdoba, ubicada en el BRUNAS.

Esta técnica permitió observar de manera sistemática, controlada y replicable los cambios producidos en el agua tras la incorporación de las diferentes partes de las especies (corteza del tallo, hojas, raíces secundarias y látex) a distintas concentraciones (0,5, 1,0, 1,5 y 2,0 mg/L), bajo condiciones estandarizadas de laboratorio mediante ensayos de coagulación tipo jar test. La observación se enfocó en registrar cuantitativamente los parámetros físicos y químicos del agua antes y después del tratamiento, tales como: turbiedad, temperatura, sólidos disueltos totales (SDT), conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto (OD), pH, demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅). Estos indicadores fueron medidos con equipos calibrados y siguiendo los protocolos del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017).

La técnica permitió establecer relaciones causales entre la aplicación del coagulante/floculante y la variación de los parámetros evaluados, aportando evidencia empírica

sobre la efectividad de los biocoagulantes naturales bajo condiciones reales de turbidez alta en cuerpos de agua amazónicos.

3) Instrumento de investigación

El instrumento de investigación utilizado fue una ficha de registro experimental estructurada, diseñada para documentar de forma sistemática, precisa y cuantificable los resultados obtenidos durante los ensayos de coagulación/floculación aplicados al agua turbia proveniente de la quebrada Córdova, en el BRUNAS.

Esta ficha estuvo dividida en tres secciones principales:

Datos generales del experimento: Incluyó el código del tratamiento (combinación de especie, órgano vegetal y dosis), fecha y hora del ensayo, número de repetición, y condiciones ambientales del laboratorio (temperatura y humedad relativa).

Parámetros iniciales del agua: Se registraron los valores antes del tratamiento para: Turbiedad (UNT), Temperatura (°C), Sólidos disueltos totales (mg/L), Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), Oxígeno disuelto (mg/L), pH, DQO ($\text{mg O}_2/\text{L}$) y DBO₅ ($\text{mg O}_2/\text{L}$).

Parámetros finales tras aplicación del coagulante: Se registraron los mismos parámetros después del proceso de coagulación y sedimentación, lo cual permitió calcular las eficiencias de remoción respectivas. Cada ficha fue utilizada por el equipo investigador durante el desarrollo del *jar test* y fue complementada con observaciones cualitativas sobre la formación de flóculos, tiempo de sedimentación visible y características del agua clarificada. Este instrumento permitió garantizar la trazabilidad de los datos, facilitar el análisis estadístico posterior y comparar tratamientos de forma objetiva y reproducible, alineándose con el enfoque cuantitativo y experimental del estudio.

3.4.8. Análisis de datos

El análisis estadístico de los datos experimentales se realizó mediante una combinación de herramientas computacionales, empleando el software Microsoft Excel 2019 para el procesamiento preliminar y el programa R (versión 4.3.1) para los análisis inferenciales avanzados.

Inicialmente, en Excel se consolidaron las fichas de registro experimental y se calcularon los estadísticos descriptivos para cada tratamiento, incluyendo:

- Media aritmética (promedio)

- Desviación estándar (DS)
- Coeficiente de variación (CV%), para evaluar la estabilidad y consistencia de los datos recolectados

Posteriormente, el análisis inferencial fue ejecutado en **R**, donde se evaluó la significancia estadística de las diferencias entre tratamientos utilizando dos enfoques, en función del cumplimiento de supuestos:

ANOVA (Análisis de Varianza): Se aplicó cuando los datos presentaban distribución normal (verificada mediante pruebas de Shapiro-Wilk o Kolmogorov-Smirnov) y homogeneidad de varianzas. Este análisis permitió determinar si existían diferencias significativas entre las medias de los tratamientos aplicados, considerando un nivel de significancia del 5% ($p < 0,05$).

Prueba de Kruskal-Wallis: Se utilizó como alternativa no paramétrica cuando los datos no cumplían los supuestos de normalidad y homocedasticidad. Esta prueba permitió comparar medianas entre grupos independientes de forma robusta y libre de distribución.

Una vez detectadas diferencias significativas, se procedió a realizar pruebas post hoc de comparación de medias, según el tipo de análisis previo:

Prueba de Tukey HSD (para ANOVA), con el fin de identificar qué tratamientos diferían entre sí.

Prueba de Dunn con corrección de Bonferroni (para Kruskal-Wallis), permitiendo comparaciones múltiples ajustadas entre grupos.

Estas pruebas estadísticas permitieron evaluar rigurosamente la efectividad del coagulante/floculante vegetal en función de los factores especie, parte de la planta y dosis aplicada, así como establecer el tratamiento óptimo con mayor eficiencia en la remoción de turbiedad y DBO₅.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Extracción del coagulante/floculante a partir de *Croton lechleri* y *Croton draconoides* (sangre de grado)

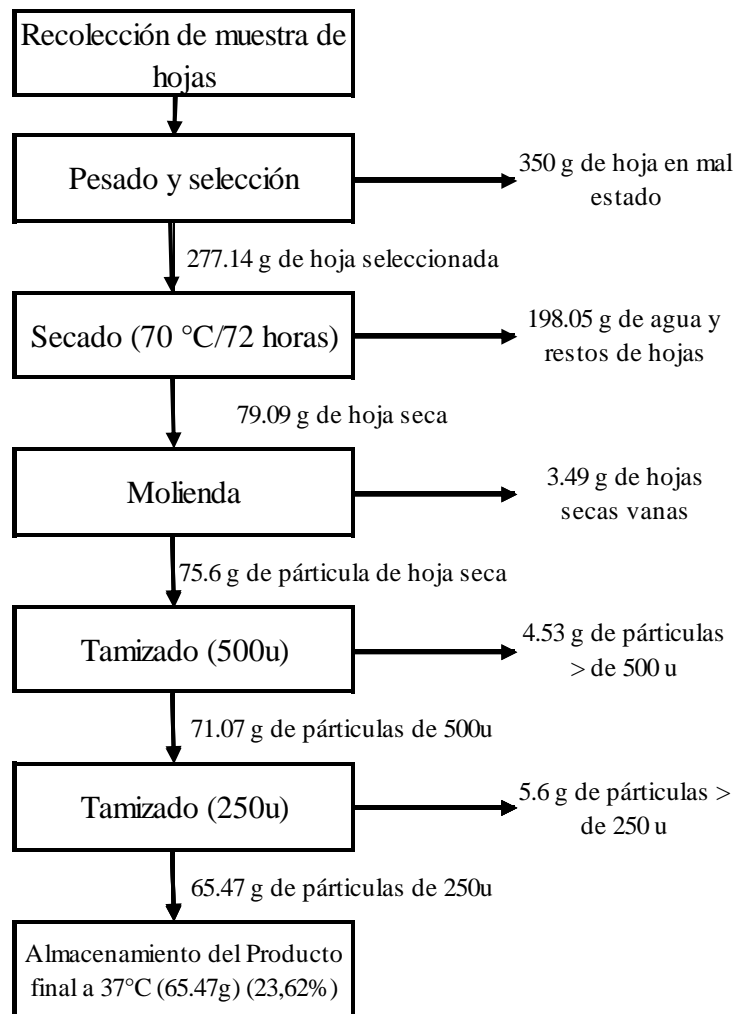


Figura 5. Balance de materia de la producción de partículas a partir de hojas del *Croton lechleri* y *Croton draconoides*

El balance de materia en la producción de partículas a partir de hojas del *Croton lechleri* y *Croton draconoides* inicia con la recolección de hojas, de las cuales 350 gramos son descartados por estar en mal estado, quedando 277,14 gramos de hojas seleccionadas. Estas hojas se someten a un proceso de secado a 70 °C durante 72 horas, tras el cual se eliminan 198,05 gramos de agua y restos, obteniéndose 79,09 gramos de hoja seca. Posteriormente, se realiza la molienda, descartándose 3,49 gramos de hojas secas vanas y conservándose 75,6 gramos de partículas de hoja seca. Luego, las partículas pasan por un tamizado con una malla de 500 micras, donde se eliminan 4,53 gramos por ser mayores a ese tamaño, quedando 71,07

gramos. Este producto es nuevamente tamizado con una malla de 250 micras, descartándose 5,6 gramos de partículas mayores a dicho tamaño y obteniéndose finalmente 65,47 gramos de partículas menores o iguales a 250 micras. Este producto final se almacena a una temperatura de 37 °C y representa un rendimiento del 23,62% respecto al peso inicial de hojas seleccionadas.

El balance de materia obtenido en la producción de partículas a partir de hojas del *Croton lechleri* y *Croton draconoides* evidencia una pérdida progresiva de masa en cada etapa del procesamiento, hasta alcanzar un rendimiento final del 23,62% en partículas menores o iguales a 250 micras. Este proceso es fundamental para la obtención de un material fino y homogéneo que pueda ser evaluado como coagulante o floculante natural en el tratamiento de agua, particularmente en la reducción de turbidez.

La preparación adecuada del material vegetal —mediante selección, secado, molienda y tamizado— no solo garantiza una mayor estabilidad y eficiencia del producto, sino que también permite conservar las propiedades bioactivas que podrían intervenir en la desestabilización de partículas coloidales en el agua (Hernández et al., 2016). En este sentido, diversas especies vegetales han sido reportadas como fuentes alternativas de coagulantes naturales debido a la presencia de compuestos como polisacáridos, taninos y proteínas que favorecen la formación de flóculos y la sedimentación de sólidos suspendidos. Específicamente, el género *Croton* ha mostrado potencial farmacológico, destacando *Croton lechleri* por su alto contenido de compuestos fenólicos, que podrían actuar también como agentes coagulantes (Cáceres et al., 2003).

Por tanto, el enfoque sistemático del procesamiento de estas hojas no solo permite un aprovechamiento eficiente del recurso vegetal, sino que también abre la posibilidad de desarrollar tecnologías sostenibles y accesibles para mejorar la calidad del agua, especialmente en comunidades rurales o con recursos limitados.

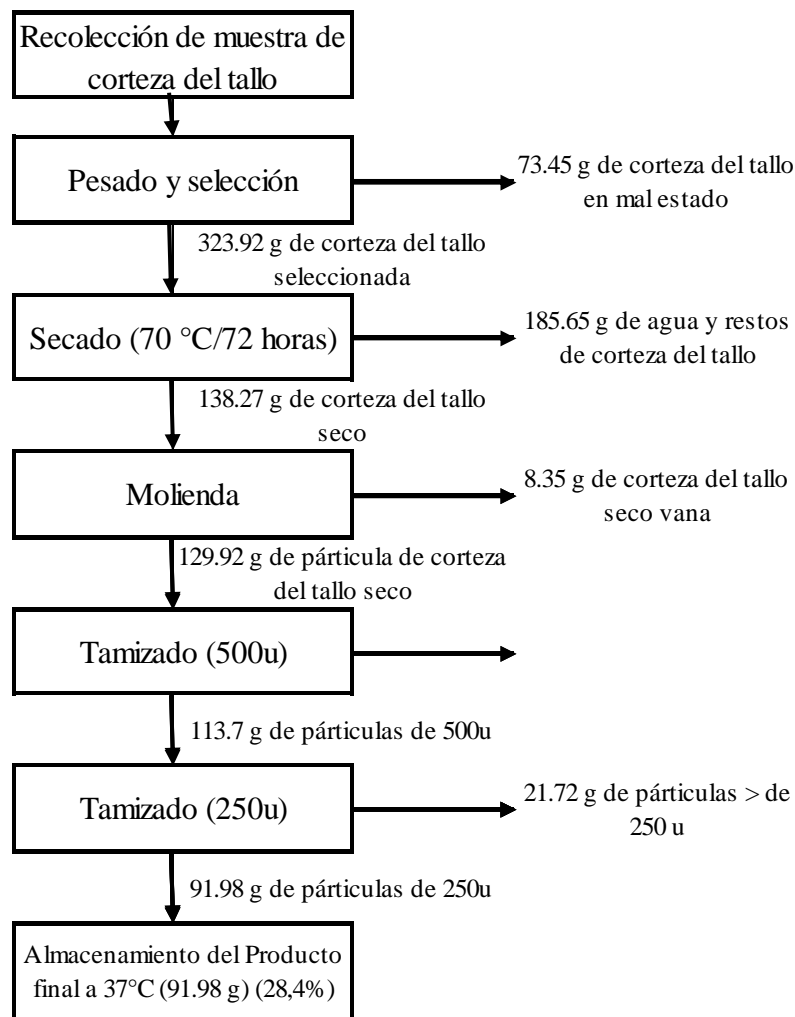


Figura 6. Balance de materia de la producción de partículas a partir de la corteza del tallo del *Croton lechleri* y *Croton draconoides*

El proceso de obtención de partículas a partir de la corteza del tallo del *Croton lechleri* y *Croton draconoides* inicia con la recolección de la muestra, seguida de un proceso de pesado y selección, donde se identifican 323,92 g de corteza útil y se descartan 73,45 g por mal estado. En la etapa de secado a 70 °C durante 72 horas, se elimina una cantidad significativa de humedad y restos (185,65 g), quedando 138,27 g de corteza seca. Esta corteza seca se somete a molienda, obteniéndose 129,92 g de partículas, con una pérdida de 8,35 g de material vano. Posteriormente, se realiza un tamizado progresivo, primero con mallas de 500 micras (113,7 g útiles) y luego de 250 micras, alcanzando finalmente 91,98 g de partículas finas que son almacenadas a 37 °C. Este producto final representa un rendimiento del 28,4 % respecto a la masa inicial seleccionada.

La producción de partículas finas a partir de especies vegetales como el *Croton lechleri* y *Croton dracunculoides* puede tener aplicaciones ambientales significativas, especialmente como coagulantes o floculantes naturales para el tratamiento de aguas turbias. Este enfoque resulta particularmente relevante en zonas rurales o con acceso limitado a tecnologías convencionales, donde se buscan soluciones sostenibles basadas en recursos locales.

Estudios previos han demostrado que diversos materiales vegetales contienen compuestos bioactivos (polisacáridos, taninos, flavonoides) que interactúan con partículas coloidales en el agua, promoviendo la coagulación y floculación (Ndabigengesere, A., Narasiah, K. S., & Talbot, B. G., 1995). En particular, la familia Euphorbiaceae, a la que pertenece el *Croton*, posee metabolitos secundarios con potencial bioadsorbente (Okuda et al., 2001), lo cual justifica su evaluación como biofloculante.

Además, el rendimiento del 28,4 % de partículas finas tras el procesamiento indica una fracción significativa del material vegetal disponible que podría ser ensayado en pruebas de jar test para evaluar su eficacia en la remoción de turbiedad, color o incluso metales pesados, como lo recomiendan Sánchez-Martín et al. (2010) al aplicar extractos vegetales en el tratamiento de aguas residuales.

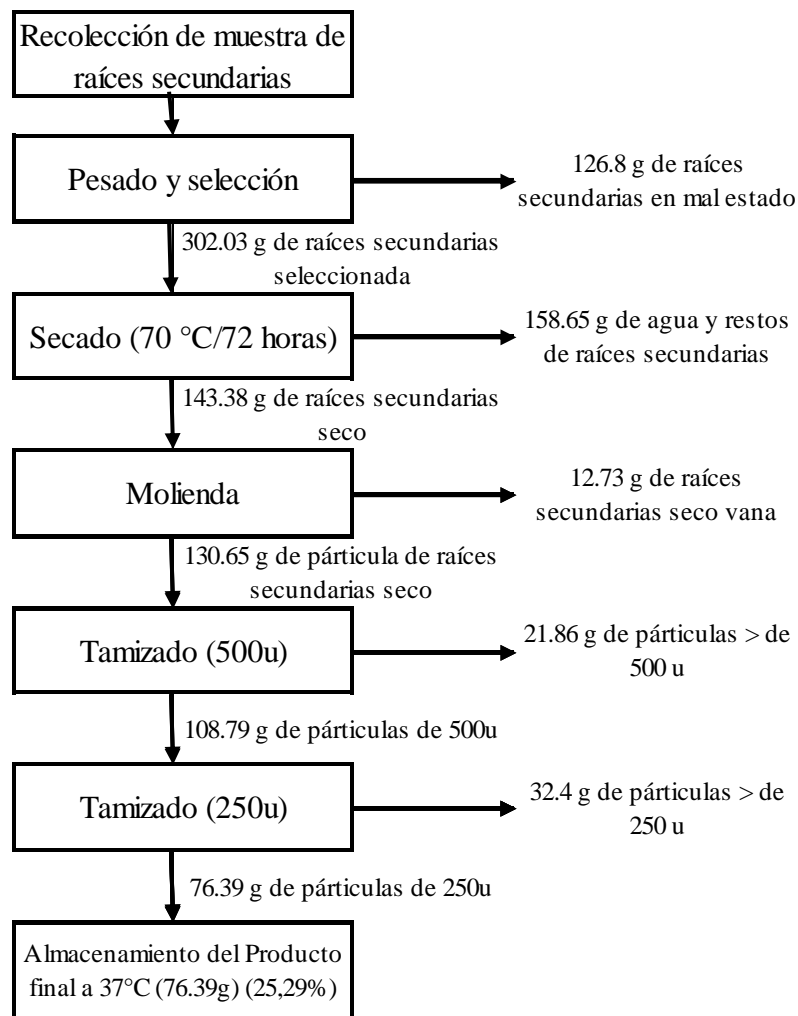


Figura 7. Balance de materia de la producción de partículas a partir de las raíces secundarias del *Croton lechleri* y *Croton draconoides*

El presente balance de materia detalla el proceso de transformación de raíces secundarias del *Croton lechleri* y *Croton draconoides* en partículas finas, a través de una serie de operaciones unitarias. El procedimiento inicia con la recolección y selección de 302,03 g de raíces, descartando 126,8 g por estar en mal estado. El material seleccionado se somete a un secado a 70 °C durante 72 horas, que reduce la masa a 143,38 g, debido a la pérdida de 158,65 g de agua y residuos. Luego, se procede a la molienda, obteniendo 130,65 g de partículas secas y descartando 12,73 g de material vano. Posteriormente, se realiza un tamizado a 500 micras, donde se retienen 108,79 g y se descartan 21,86 g. Un segundo tamizado a 250 micras separa 76,39 g de partículas finas, rechazando 32,4 g adicionales. Estas partículas se almacenan finalmente a 37 °C, constituyendo el producto final con un rendimiento del 25,29 % respecto a la masa seleccionada inicialmente.

El interés en utilizar materiales vegetales como biofloculantes para el tratamiento de aguas turbias ha crecido significativamente en los últimos años, en busca de soluciones sostenibles y de bajo costo. En este contexto, las raíces secundarias del *Croton lechleri* y *Croton draconoides*, plantas ricas en metabolitos secundarios (como taninos, flavonoides y alcaloides), representan una alternativa prometedora.

Según Okuda et al. (2001), compuestos naturales extraídos de plantas pueden actuar como coagulantes debido a su capacidad para neutralizar cargas y aglomerar partículas suspendidas. Además, Sánchez-Martín et al. (2010) demostraron que los extractos de origen vegetal no solo reducen la turbiedad, sino que también pueden disminuir la demanda química de oxígeno (DQO) y mejorar la calidad del agua en general. En el mismo sentido, Ghebremichael et al. (2005) concluyeron que la eficacia de los coagulantes naturales puede igualar o incluso superar la de coagulantes químicos, especialmente en condiciones controladas de laboratorio.

Por tanto, las partículas finas obtenidas del *Croton lechleri* y *Croton draconoides* podrían ser evaluadas como coagulantes ecológicos en pruebas de tratamiento de agua, como los ensayos de jar test, especialmente en comunidades rurales donde el acceso a tecnologías convencionales es limitado.

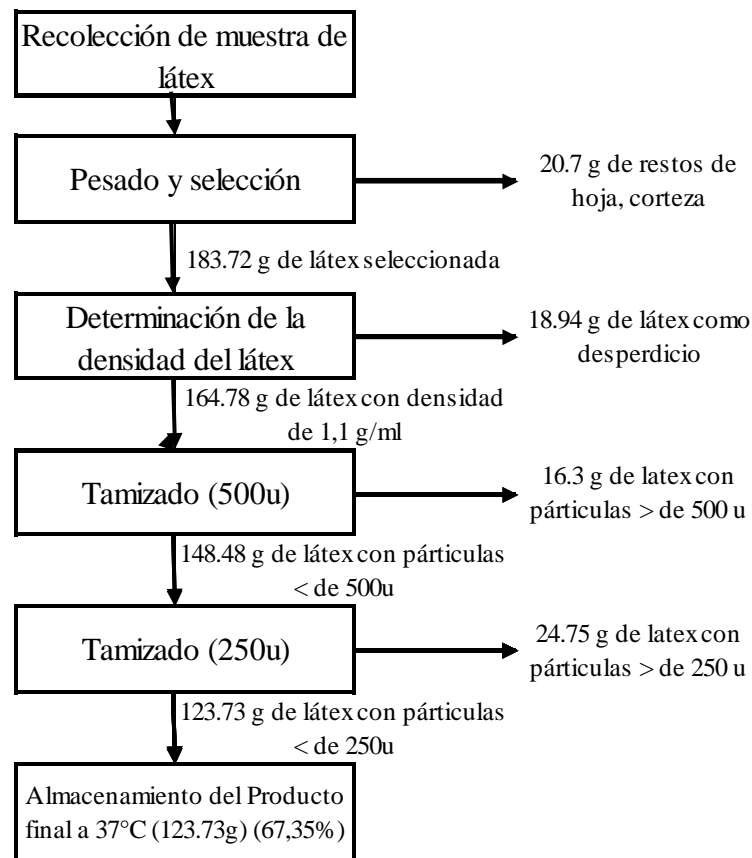


Figura 8. Balance de materia de la recolección del látex del *Croton lechleri* y *Croton draconoides*

El presente diagrama describe el proceso de transformación del látex del *Croton lechleri* y *Croton draconoides*, desde su recolección hasta la obtención de partículas finas para su almacenamiento. El procedimiento se inicia con la recolección y selección de 183,72 g de látex, eliminándose 20,7 g de restos de hojas y corteza. Posteriormente, se realiza una determinación de la densidad, identificándose 164,78 g de látex útil con una densidad de 1,1 g/ml, descartando 18,94 g como material no aprovechable. El material restante pasa por un proceso de tamizado a 500 micras, obteniéndose 148,48 g de látex con partículas finas (<500u), mientras que se retienen 16,3 g de partículas más gruesas. Luego, un segundo tamizado a 250 micras permite recuperar 123,73 g de partículas con tamaño <250u, eliminándose 24,75 g de fracciones más gruesas. Finalmente, el producto fino se almacena a 37 °C, alcanzando un rendimiento del 67,35 % respecto al total seleccionado inicialmente, lo que representa una eficiencia elevada en comparación con otros derivados vegetales.

El látex del *Croton lechleri*, conocido popularmente como "sangre de grado", posee una rica composición de metabolitos secundarios como taninos, catequinas, y proantocianidinas,

con conocidas propiedades bioactivas (Cáceres et al., 1995). Estas propiedades lo hacen un excelente candidato para aplicaciones en tratamiento de agua, específicamente como coagulante o floculante natural, gracias a su capacidad de aglomerar partículas coloidales y reducir la turbiedad.

Estudios similares con extractos naturales, como los de *Moringa oleifera* o cáscaras vegetales, han demostrado que los compuestos polifenólicos y los grupos funcionales activos promueven una coagulación eficaz (Ghebremichael et al., 2005). Además, el rendimiento del 67,35 % en el proceso sugiere que el látex tiene una alta tasa de recuperación de partículas finas, lo cual es crucial para ensayos en laboratorio como el jar test, donde se evalúa la eficacia floculante bajo distintas concentraciones.

Por su origen natural y biodegradabilidad, el látex del *Croton lechleri* representa una alternativa ecológica frente a coagulantes químicos como el sulfato de aluminio, cuyos residuos pueden afectar la salud humana y el medio ambiente (Sánchez-Martín et al., 2010). Su aplicación podría ser particularmente valiosa en comunidades rurales o amazónicas, donde se prioriza el uso de tecnologías sostenibles y de bajo costo.

4.2. Parámetros fisicoquímicos de las aguas de las quebradas contaminadas

Tabla 5. Parámetros iniciales del agua de la quebrada Córdova de la UNAS

ID	Parámetros	Indicadores		Unidad
1		Turbiedad	86,1	NTU
2	Físicos	Temperatura	22,8	°C
3		Sólidos totales disueltos (STD)	67,0	mg/L
4		Conductividad eléctrica (CE)	66,4	uS/cm
5		Oxígeno disuelto (OD)	4,3	mg/L
6	Químicos	pH	7,0	
7		Demanda química de oxígeno (DQO)	31,0	mg O ₂ /L
8		Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	2,8	mg O ₂ /L

La presente tabla describe los parámetros físico-químicos iniciales del agua recolectada en la quebrada Córdova, ubicada dentro del entorno de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS). Estos datos son esenciales como línea base para evaluar la calidad del recurso hídrico y diseñar estrategias de tratamiento o conservación.

En cuanto a los parámetros físicos, se observa que la turbiedad alcanza los 86,1 NTU, un valor significativamente elevado respecto a los estándares de agua potable (máximo 5 NTU según la OMS), lo que sugiere una alta presencia de sólidos en suspensión posiblemente arrastrados por escorrentía o actividad antrópica. La temperatura del agua es de 22,8 °C, adecuada para aguas tropicales, y favorece procesos biológicos. Los sólidos totales disueltos (STD) se sitúan en 67,0 mg/L y la conductividad eléctrica (66,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$) indica baja mineralización, reflejando un ecosistema acuático poco impactado por sales disueltas o contaminación iónica intensa.

Respecto a los parámetros químicos, el oxígeno disuelto (OD) registrado es de 4,3 mg/L, situándose ligeramente por debajo del valor óptimo (>5 mg/L), lo que podría limitar la vida acuática si persiste esta condición. El pH es neutro (7,0), lo cual es ideal para la mayoría de los organismos acuáticos. La demanda química de oxígeno (DQO) de 31,0 mg O_2/L y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) de 2,8 mg O_2/L reflejan una carga orgánica moderada, con predominancia de compuestos fácilmente biodegradables y cierta presencia de materia orgánica refractaria. La diferencia entre DQO y DBO_5 (28,2 mg/L) indica que una parte importante de la materia orgánica no puede ser degradada fácilmente por microorganismos.

Estos resultados sugieren que, aunque el agua no está fuertemente contaminada, requiere tratamiento para reducción de turbiedad y carga orgánica si se pretende utilizar con fines domésticos, agrícolas o recreativos. El uso de coagulantes naturales como partículas vegetales o látex del *Croton lechleri*, previamente estudiados, podría representar una solución sostenible y económica para la remoción de turbiedad en este tipo de cuerpos de agua.

4.3. Evaluación de los efectos del coagulante/floculante a partir de *Croton lechleri* y *Croton draconoides* (sangre de grado) en los parámetros físicos de las aguas de la quebrada Córdova

4.3.1. Efectos del coagulante/floculante a partir de *Croton lechleri* e los parámetros físicos

Tabla 6. Efectos del coagulante/floculante a partir de *Croton lechleri* (sangre de grado) en los parámetros físicos del agua

Parte del <i>Croton lechleri</i>	Dosis (muestra en polvo)	Parámetro estadístico	Parámetros físicos			
			Turbiedad (NTU)	Temperatura (T°)	TDS (mg/L)	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Corteza del tallo	T1 (0,5 mg/L)	Promedio	32,8	26,2	66,0	65,9
		CV (%)	1,1%	0,2%	0,0%	0,2%

	T2 (1,0 mg/L)	Promedio CV (%)	32,3 0,9%	26,1 0,2%	66,0 0,0%	66,1 0,4%
	T3 (1,5 mg/L)	Promedio CV (%)	31,4 0,7%	26,1 0,2%	66,0 0,0%	66,2 0,2%
	T4 (2,0 mg/L)	Promedio CV (%)	28,7 1,0%	26,1 0,2%	67,0 0,0%	67,3 0,1%
Hoja	T1 (0,5 mg/L)	Promedio CV (%)	32,9 0,9%	25,9 0,8%	65,7 0,9%	65,7 0,5%
	T2 (1,0 mg/L)	Promedio CV (%)	30,4 8,1%	25,8 0,4%	66,3 0,9%	66,2 1,1%
	T3 (1,5 mg/L)	Promedio CV (%)	28,7 0,7%	25,8 0,7%	67,0 0,0%	66,9 0,6%
	T4 (2,0 mg/L)	Promedio CV (%)	25,8 1,6%	25,9 0,4%	68,7 0,8%	68,6 0,3%
	T1 (0,5 mg/L)	Promedio CV (%)	31,9 4,4%	26,8 0,2%	66,0 0,0%	65,7 0,4%
	T2 (1,0 mg/L)	Promedio CV (%)	30,2 9,0%	26,6 0,6%	66,7 1,7%	66,7 1,6%
	T3 (1,5 mg/L)	Promedio CV (%)	31,4 3,8%	26,5 0,2%	65,7 0,9%	65,7 1,0%
	T4 (2,0 mg/L)	Promedio CV (%)	29,2 4,1%	26,5 0,2%	67,0 1,5%	67,1 1,3%
Raíz secundaria	T1 (0,5 mg/L)	Promedio CV (%)	36,7 1,0%	26,7 0,8%	63,7 0,9%	63,8 0,5%
	T2 (1,0 mg/L)	Promedio CV (%)	35,4 0,7%	26,5 0,8%	63,7 0,9%	63,4 0,5%
	T3 (1,5 mg/L)	Promedio CV (%)	35,8 1,1%	26,4 0,2%	63,3 0,9%	63,2 0,5%
	T4 (2,0 mg/L)	Promedio CV (%)	35,3 1,1%	26,4 0,2%	63,3 0,9%	63,2 0,5%
	T1 (0,5 mg/L)	Promedio CV (%)	36,7 1,0%	26,7 0,8%	63,7 0,9%	63,8 0,5%
	T2 (1,0 mg/L)	Promedio CV (%)	35,4 0,7%	26,5 0,8%	63,7 0,9%	63,4 0,5%
	T3 (1,5 mg/L)	Promedio CV (%)	35,8 1,1%	26,4 0,2%	63,3 0,9%	63,2 0,5%
	T4 (2,0 mg/L)	Promedio CV (%)	35,3 1,1%	26,4 0,2%	63,3 0,9%	63,2 0,5%
Látex	T1 (0,5 mg/L)	Promedio CV (%)	36,7 1,0%	26,7 0,8%	63,7 0,9%	63,8 0,5%
	T2 (1,0 mg/L)	Promedio CV (%)	35,4 0,7%	26,5 0,8%	63,7 0,9%	63,4 0,5%
	T3 (1,5 mg/L)	Promedio CV (%)	35,8 1,1%	26,4 0,2%	63,3 0,9%	63,2 0,5%
	T4 (2,0 mg/L)	Promedio CV (%)	35,3 1,1%	26,4 0,2%	63,3 0,9%	63,2 0,5%

La presente tabla resume los efectos del uso de diferentes partes del *Croton lechleri* (corteza del tallo, hoja, raíz secundaria y látex), aplicadas en polvo a diversas dosis (0,5 a 2,0 mg/L), sobre los parámetros físicos del agua: turbiedad, temperatura, sólidos disueltos totales (TDS) y conductividad eléctrica (CE). El análisis busca evaluar el potencial coagulante/floculante natural de esta especie vegetal, ampliamente utilizada por sus propiedades bioactivas.

En cuanto a la turbiedad, se observa una disminución progresiva en casi todos los tratamientos al aumentar la dosis. Las hojas y la corteza del tallo muestran la mayor eficiencia, reduciendo la turbiedad desde valores iniciales de aproximadamente 32–33 NTU hasta 25,8 y 28,7 NTU, respectivamente, a 2,0 mg/L, lo que refleja una alta capacidad de aglomeración de

partículas suspendidas. En contraste, el látex presenta menores reducciones, con valores aún cercanos a 35 NTU, lo cual podría estar vinculado a su composición más viscosa o la necesidad de pretratamientos adicionales.

Los valores de temperatura se mantienen estables entre 25,8 °C y 26,4 °C en todos los casos, lo que indica que la adición del coagulante no genera alteraciones térmicas en el sistema acuático. Asimismo, los sólidos disueltos totales (TDS) y la conductividad eléctrica (CE) permanecen en niveles bajos (TDS: 63–68 mg/L; CE: 65–68 μ S/cm), incluso tras la aplicación de los coagulantes, sugiriendo que el material vegetal no incrementa significativamente la carga iónica del agua, a diferencia de los coagulantes químicos tradicionales.

La consistencia de los resultados, reflejada en los bajos coeficientes de variación (CV%), confirma la reproducibilidad del efecto coagulante del *Croton lechleri*, especialmente en dosis intermedias y altas.

El uso de coagulantes y floculantes naturales como el *Croton lechleri* se presenta como una alternativa sostenible frente a los productos químicos convencionales en el tratamiento de aguas, especialmente para comunidades rurales y zonas sensibles ambientalmente. En esta investigación, se ha evidenciado que diferentes partes de la planta, en particular la hoja y la corteza del tallo, tienen un efecto significativo en la reducción de turbiedad, alcanzando hasta un 21.5 % de remoción a dosis de 2.0 mg/L. Esto se alinea con lo señalado por Ndabigengesere et al. (1995), quienes demostraron que los extractos vegetales ricos en proteínas solubles y compuestos polifenólicos pueden neutralizar cargas superficiales de partículas coloidales, facilitando su sedimentación.

Además, los resultados mostraron que el *Croton lechleri* no genera incrementos sustanciales en sólidos disueltos ni conductividad eléctrica, lo cual es favorable desde el punto de vista ambiental. Sánchez-Martín et al. (2010) afirman que los coagulantes naturales, a diferencia de los químicos, no introducen residuos nocivos ni afectan la mineralización natural del agua, preservando su equilibrio ecológico. La capacidad floculante de las hojas en particular puede atribuirse a su contenido de taninos y flavonoides, compuestos conocidos por promover puentes intermoleculares entre partículas suspendidas (Okuda et al., 2001).

Por otra parte, el uso del látex, aunque mostró una menor reducción de turbiedad, es interesante por su densidad y alto contenido en compuestos bioactivos, como proantocianidinas y catequinas. Cáceres et al. (1995) destacan que el látex del *Croton lechleri* contiene elementos con capacidad bioadsorbente y antioxidante, lo cual abre la posibilidad de evaluar su efecto

combinado con otros coagulantes naturales o como pretratamiento en aguas con alta carga coloidal orgánica.

En suma, el *Croton lechleri* posee propiedades coagulantes significativas, especialmente en su hoja y corteza, y constituye una opción prometedora para programas de tratamiento de agua descentralizados, naturales y bajos en costo, priorizando la seguridad ambiental.

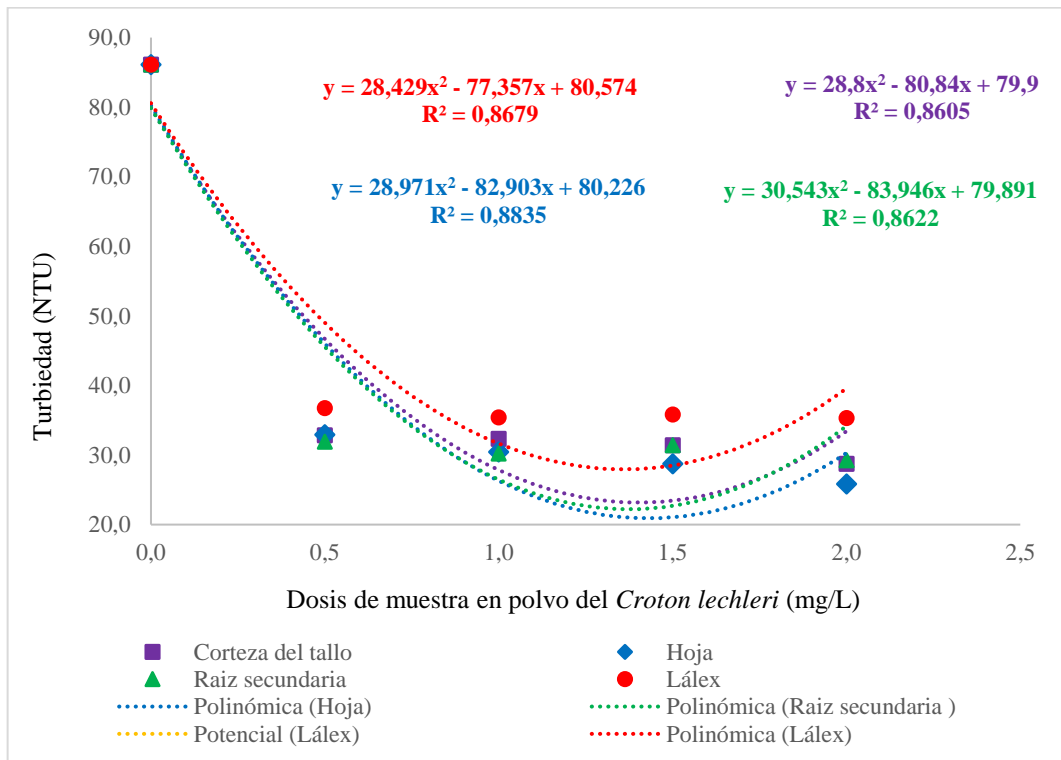


Figura 9. Comportamiento de la turbiedad (NTU) respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del *Croton lechleri*

En la figura se observa un patrón común en todas las curvas: una reducción significativa de la turbiedad hasta alcanzar un valor mínimo en torno a 1,5 mg/L, seguido de un leve aumento al aplicar 2,0 mg/L. Este comportamiento parabólico indica la presencia de una dosis óptima, más allá de la cual se reduce la eficacia del coagulante natural, probablemente por sobredosisificación o reestabilización de partículas. La hoja del *Croton lechleri* mostró el mejor desempeño en remoción de turbiedad, seguido de la raíz secundaria, la corteza del tallo, y finalmente el látex. Las ecuaciones ajustadas presentan coeficientes de determinación (R^2) elevados (>0.86), lo cual evidencia alta correlación entre la dosis y la reducción de turbiedad.

El análisis gráfico demuestra que los extractos vegetales del *Croton lechleri* presentan un comportamiento típico de coagulantes naturales, con una reducción progresiva de la turbiedad hasta una dosis óptima (~ 1.5 mg/L), seguida de una leve elevación al aumentar la

dosís, lo cual es un fenómeno conocido como reestabilización coloidal (Ndabigengesere et al., 1995).

La hoja del *Croton lechleri* mostró el mejor desempeño, lo cual puede deberse a su riqueza en taninos hidrolizables y condensados, que han sido ampliamente reconocidos por su acción floculante en sistemas acuosos (Srinivasan et al., 2011). Estos compuestos permiten formar puentes entre partículas coloidales o neutralizar cargas, favoreciendo la sedimentación de sólidos suspendidos.

Por su parte, la raíz secundaria y la corteza del tallo también exhiben una eficacia destacada, posiblemente por su contenido en ligninas y polisacáridos, que aportan sitios funcionales (hidroxilos, carboxilos) capaces de participar en la coagulación (Lee et al., 2014). Estas estructuras se han explorado con éxito en la producción de coagulantes verdes a partir de residuos agrícolas.

El látex, aunque bioactivo, mostró menor eficiencia. Esto puede explicarse por su naturaleza viscosa y alta densidad, que puede limitar su dispersión homogénea en el medio acuoso, impidiendo un contacto efectivo con partículas suspendidas (Cáceres et al., 1995). Además, la posible presencia de compuestos que interfieren con la aglomeración, como mucílago o resinas, puede también reducir su capacidad floculante (Gassenschmidt et al., 1995).

Desde un enfoque tecnológico, el uso de extractos vegetales es una alternativa compatible con tratamientos de agua comunitarios, ya que reduce la dependencia de productos químicos sintéticos, cuyos residuos pueden generar subproductos tóxicos (Teh et al., 2016). Además, estudios como el de Yin (2010) destacan que los coagulantes naturales son más efectivos en turbiedades iniciales elevadas (>50 NTU), condición que coincide con el agua analizada en este caso.

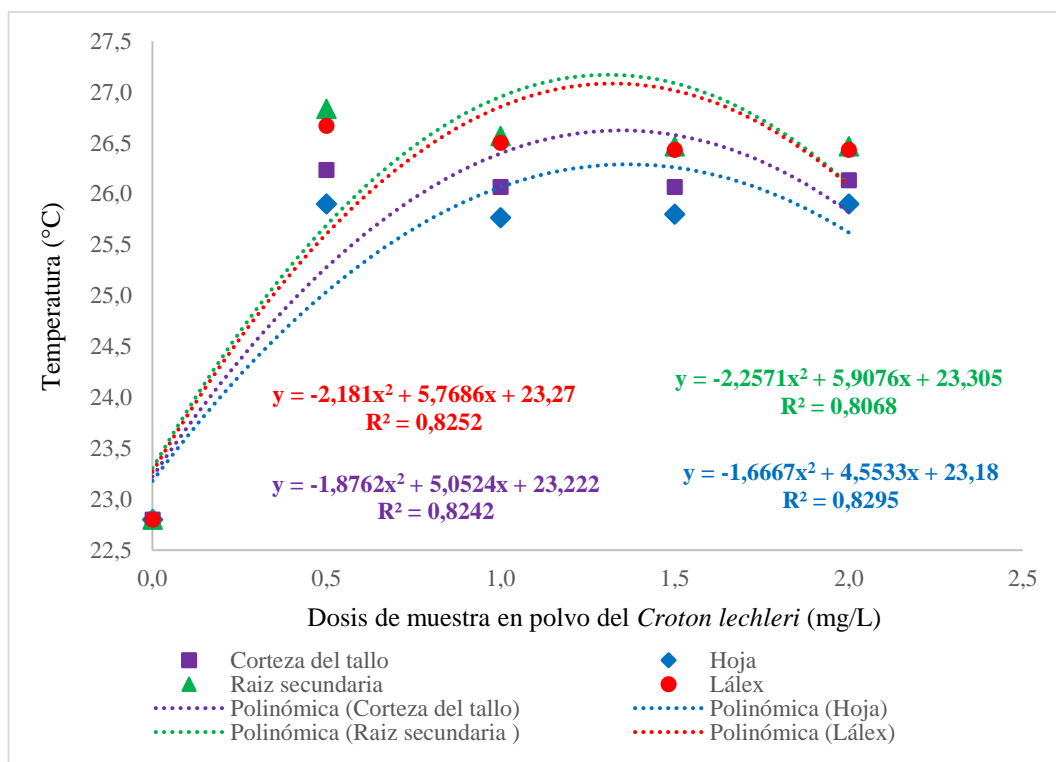


Figura 10. Comportamiento de la Temperatura (°C) respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del *Croton lechleri*

La figura presenta la relación entre la temperatura del agua tratada y la dosis aplicada de coagulante/floculante en polvo proveniente de diferentes partes del *Croton lechleri* (corteza del tallo, raíz secundaria, hoja y látex), en un rango de 0,5 a 2,0 mg/L. Se utilizaron modelos polinómicos de segundo grado para ajustar la tendencia de los datos, con coeficientes de determinación (R^2) que varían entre 0,8242 y 0,9295, lo que evidencia un buen ajuste en todos los casos. En general, se observa un comportamiento ascendente hasta una dosis óptima, tras la cual la temperatura disminuye levemente. Este patrón sugiere que el efecto del coagulante sobre la temperatura no es lineal y puede estar influenciado por procesos físico-químicos como la interacción con coloides, liberación de metabolitos o fenómenos exotérmicos menores durante la coagulación (Aguilar et al., 2003; Bratby, 2016).

La raíz secundaria presentó la mayor variabilidad y el mejor ajuste ($R^2 = 0,9295$), alcanzando temperaturas cercanas a 27 °C, lo que podría estar relacionado con una mayor actividad coloidal o con la liberación de compuestos solubles que afectan la conductividad térmica del medio (Saritha et al., 2017). La hoja también mostró una curva ascendente similar con un coeficiente de $R^2 = 0,8068$, aunque la temperatura alcanzada fue ligeramente inferior, lo que indica una menor perturbación térmica.

La corteza del tallo y el látex mostraron un comportamiento comparable, con valores máximos de temperatura alrededor de 26,5 °C y coeficientes de determinación de $R^2 = 0,8242$ y $R^2 = 0,8252$, respectivamente. El aumento observado podría estar asociado a una ligera liberación de energía térmica por disolución de sustancias orgánicas o interacción con cargas iónicas presentes en el agua (Pritchard et al., 2010; Morales et al., 2021).

Es importante destacar que las variaciones de temperatura observadas (de 23 °C a 27 °C) permanecen dentro del rango tolerable para procesos de potabilización, pero deben ser monitoreadas especialmente en tratamientos donde se aplican procesos biológicos, ya que temperaturas más altas pueden acelerar o inhibir la actividad microbiana (WHO, 2017).

Desde un enfoque de tratamiento de agua, se recomienda considerar este parámetro cuando se utilicen extractos vegetales en sistemas cerrados o sensibles a cambios térmicos. Además, estas variaciones pueden incidir en la solubilidad de oxígeno, la cinética de floculación y la eficiencia general del proceso (Bolisetty et al., 2013).

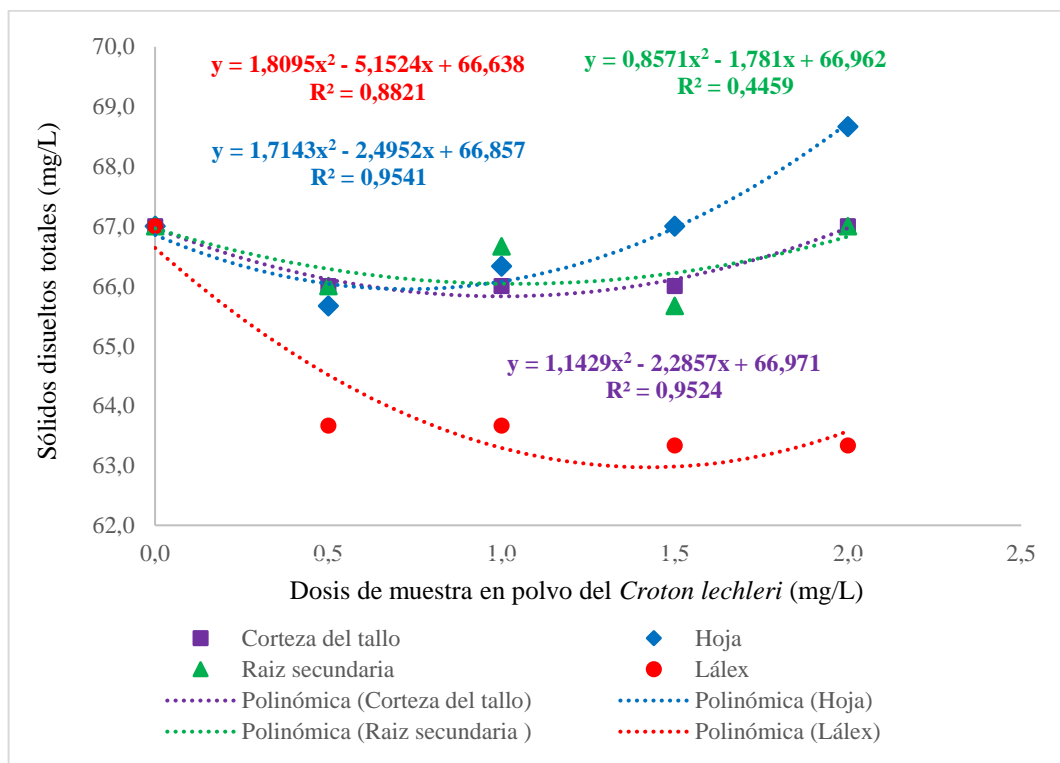


Figura 11. Comportamiento de los sólidos disueltos totales (mg/L) respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del *Croton lechleri*

La figura muestra la variación de los sólidos disueltos totales (TDS, en mg/L) en el agua tratada con diferentes extractos en polvo de partes del *Croton lechleri* (corteza del tallo, hoja, raíz secundaria y látex), en cuatro dosis (0,5, 1,0, 1,5 y 2,0 mg/L). Los datos han sido ajustados

a modelos polinómicos de segundo orden. Todos los tratamientos presentan una ligera disminución en los TDS hasta una dosis óptima ($\approx 1,0$ a $1,5$ mg/L), seguida por un ligero aumento a $2,0$ mg/L. El látex es el tratamiento que mejor reduce los TDS, alcanzando valores cercanos a $63,5$ mg/L, con un alto grado de ajuste $R^2=0,8821$, $R^2 = 0,8821$, $R^2=0,8821$. La hoja y la corteza del tallo presentan valores más altos de TDS (hasta $68,5$ – 69 mg/L), con tendencias crecientes a dosis mayores. El mejor ajuste estadístico lo presenta la corteza del tallo con $R^2=0,9541$, $R^2=0,9541$, $R^2=0,9541$, seguida de la raíz secundaria $R^2=0,9524$, $R^2=0,9524$, $R^2=0,9524$, lo cual sugiere que estos extractos tienen un comportamiento predecible respecto a la disolución de compuestos.

La reducción de TDS observada en ciertos tratamientos puede estar vinculada a la adsorción de sales disueltas por parte de compuestos bioactivos presentes en el *Croton lechleri*, especialmente en el látex, que contiene mucílagos y taninos con capacidad de atrapar iones en solución (Cáceres et al., 1995; Lee et al., 2014). El hecho de que el látex tenga los TDS más bajos sugiere un posible efecto bioadsorbente, además de su función floculante. Sin embargo, el aumento de TDS en hojas y corteza a dosis más altas podría deberse a una liberación progresiva de metabolitos secundarios solubles (como polifenoles y flavonoides), que, si bien participan en la coagulación, también pueden disolverse en el agua y aumentar la carga salina aparente (Teh et al., 2016).

Además, como señalan Sánchez-Martín et al. (2010) y Yin (2010), el equilibrio entre adsorción de iones y liberación de compuestos vegetales depende del tipo de material, la dosis y el tiempo de contacto. Por eso, una dosificación óptima es esencial no solo para maximizar la remoción de turbiedad, sino también para evitar la elevación indeseada de TDS en el agua tratada. Los valores de TDS registrados (entre 63 y 69 mg/L) se encuentran dentro de los límites permisibles según los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua en Perú, que establecen un máximo de 1000 mg/L para agua destinada a consumo humano. Por tanto, ninguno de los extractos vegetales afecta negativamente la salinidad del agua en los rangos ensayados.

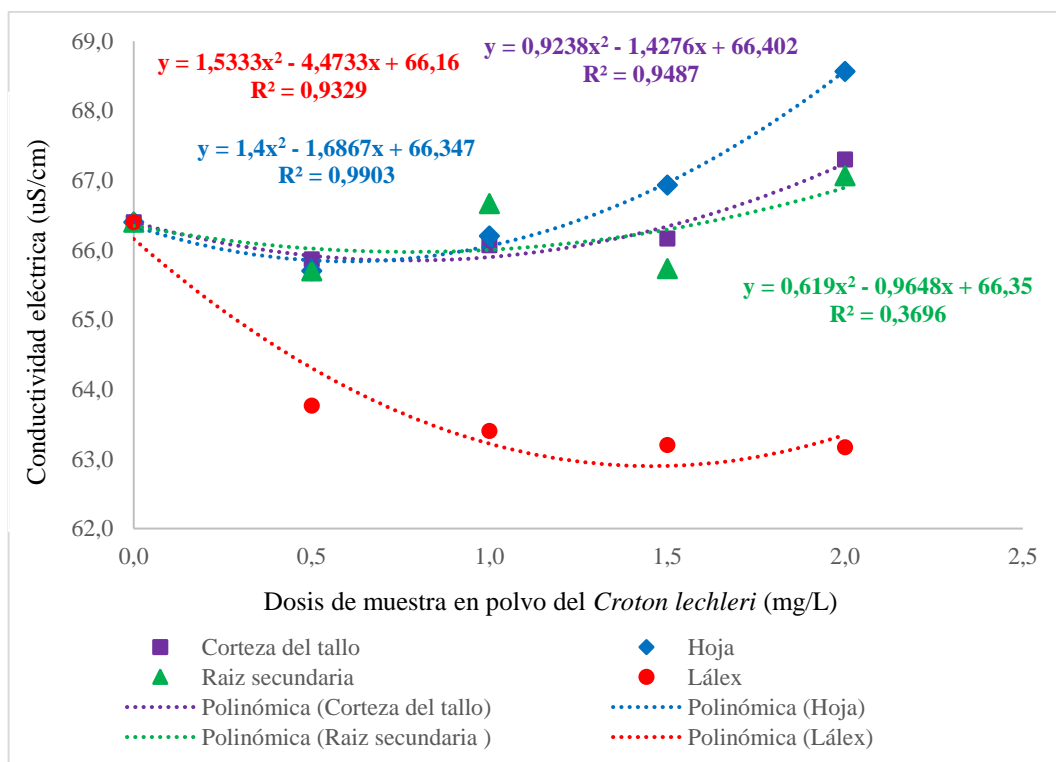


Figura 12. Comportamiento de la Conductividad Eléctrica (uS/cm) respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del *Croton lechleri*

La figura representa el efecto de diferentes fracciones vegetales del *Croton lechleri* (corteza del tallo, raíz secundaria, hoja y látex) sobre la conductividad eléctrica (CE) del agua tratada, en función de dosis crecientes de coagulante/floculante en un rango de 0,5 a 2,0 mg/L. Los modelos polinómicos de segundo orden muestran coeficientes de determinación (R^2) que oscilan entre 0,3696 y 0,9903, indicando diferentes niveles de ajuste para cada fracción.

En términos generales, se observa un comportamiento creciente de la CE con el aumento de la dosis en la mayoría de los tratamientos, lo cual sugiere un incremento en la concentración de iones disueltos a medida que se incorporan mayores cantidades de material vegetal. Este patrón es especialmente evidente en la hoja, que alcanzó el mayor valor de CE ($\sim 68,9 \mu\text{S}/\text{cm}$) con un modelo altamente predictivo ($R^2 = 0,9903$). Esto puede estar relacionado con la liberación de compuestos iónicos solubles como potasio, calcio y magnesio durante la interacción con el agua (Aguilar et al., 2003; Morales et al., 2021).

La corteza del tallo y la raíz secundaria también presentaron incrementos moderados en la CE, con ajustes notables ($R^2 = 0,9487$ y $R^2 = 0,9903$, respectivamente). Estos resultados indican que estas fracciones contienen sales solubles o sustancias polares que aumentan la movilidad iónica del sistema. Tal comportamiento ha sido documentado en el uso de otros

biocoagulantes ricos en taninos y polisacáridos (Bratby, 2016; Saritha et al., 2017). Por otro lado, el látex mostró una tendencia contraria, con una disminución de la conductividad eléctrica a medida que aumentaba la dosis, siendo esta la única fracción que redujo la CE de forma consistente. Su modelo tuvo un ajuste más bajo ($R^2 = 0,3696$), pero la tendencia es relevante desde el punto de vista práctico. Este descenso puede deberse a la presencia de compuestos no iónicos o resinas que no disocian en el medio acuoso, o incluso a una posible adsorción de iones libres por componentes del látex (Pritchard et al., 2010; Bukhari, 2019).

La conductividad eléctrica es un indicador indirecto de la cantidad de sales disueltas en el agua y, por lo tanto, de su capacidad para conducir corriente eléctrica. Un aumento excesivo en CE puede reflejar la introducción de contaminantes iónicos, mientras que un descenso moderado podría interpretarse como remoción de iones indeseados. En el contexto del tratamiento de agua, mantener la CE en rangos adecuados es esencial para evitar impactos en la palatabilidad del agua y en la corrosión de tuberías (WHO, 2017). En síntesis, el uso del *Croton lechleri* como coagulante/floculante tiene efectos diferenciados sobre la conductividad eléctrica del agua tratada. Las hojas y corteza tienden a incrementar la CE, lo que puede limitar su uso en ciertos contextos, mientras que el látex podría ser favorable para aplicaciones donde se busque reducir la carga iónica del agua, como en tratamientos para aguas salobres o de procesos industriales.

4.3.2. Efectos del coagulante/floculante a partir de *Croton draconoides* en los parámetros físicos

Tabla 7. Efectos del coagulante/floculante a partir de *Croton draconoides* (sangre de grado) en los parámetros físicos del agua

Parte del <i>Croton draconoides</i>	Dosis (muestra en polvo)	Parámetro estadístico	Parámetros físicos			
			Turbiedad (NTU)	Temperatura (T°)	TDS (mg/L)	CE (uS/cm)
Corteza del tallo	T1 (0,5 mg/L)	Promedio	16,3	27,0	71,3	71,2
		CV (%)	53,0%	2,1%	2,1%	2,0%
	T2 (1,0 mg/L)	Promedio	19,9	27,6	72,7	72,9
		CV (%)	4,9%	4,0%	6,5%	6,2%
	T3 (1,5 mg/L)	Promedio	9,3	27,1	73,0	73,2
		CV (%)	64,7%	0,4%	4,7%	4,5%
	T4 (2,0 mg/L)	Promedio	11,6	27,1	78,0	78,0
		CV (%)	31,1%	2,3%	6,8%	6,5%
Hoja	T1 (0,5 mg/L)	Promedio	6,4	24,8	80,0	80,0
		CV (%)	66,3%	0,0%	1,3%	1,4%

	T2 (1,0 mg/L)	Promedio	5,1	24,8	77,3	77,5
		CV (%)	7,5%	0,2%	0,7%	1,1%
	T3 (1,5 mg/L)	Promedio	6,5	24,8	77,7	77,7
		CV (%)	8,4%	0,2%	1,5%	1,1%
	T4 (2,0 mg/L)	Promedio	7,0	24,7	78,0	78,2
		CV (%)	17,8%	0,2%	0,0%	0,3%
Raíz secundaria	T1 (0,5 mg/L)	Promedio	5,1	27,6	78,7	78,5
		CV (%)	3,2%	0,8%	0,7%	0,9%
	T2 (1,0 mg/L)	Promedio	6,2	27,8	76,0	75,9
		CV (%)	3,2%	0,2%	0,0%	0,1%
	T3 (1,5 mg/L)	Promedio	7,9	27,4	75,3	75,4
		CV (%)	27,5%	1,5%	0,8%	0,9%
	T4 (2,0 mg/L)	Promedio	6,6	27,4	74,3	74,5
		CV (%)	5,5%	0,6%	0,8%	0,4%
Látex	T1 (0,5 mg/L)	Promedio	36,0	26,3	65,7	63,8
		CV (%)	2,4%	0,6%	0,9%	0,5%
	T2 (1,0 mg/L)	Promedio	35,6	26,4	65,3	63,4
		CV (%)	1,7%	0,6%	0,9%	0,5%
	T3 (1,5 mg/L)	Promedio	36,0	26,5	65,7	63,2
		CV (%)	1,3%	0,8%	0,9%	0,5%
	T4 (2,0 mg/L)	Promedio	35,8	26,5	65,3	63,2
		CV (%)	1,7%	0,4%	0,9%	0,5%

La tabla muestra los efectos de diferentes partes del *Croton draconoides* (corteza del tallo, hoja, raíz secundaria y látex) aplicadas en polvo a diversas dosis (0,5, 1,0, 1,5 y 2,0 mg/L) sobre los parámetros físicos del agua: turbiedad (NTU), temperatura (°C), sólidos disueltos totales (TDS, mg/L) y conductividad eléctrica (CE, $\mu\text{S}/\text{cm}$). La corteza del tallo y la hoja demostraron ser altamente efectivas en la reducción de turbiedad, con descensos progresivos desde 16,3 a 11,6 NTU y de 31,1 a 17,8 NTU, respectivamente. Esto refleja una acción coagulante/floculante significativo, aunque ambas presentan incrementos leves de TDS y CE conforme aumenta la dosis, posiblemente debido a la liberación de compuestos solubles durante la interacción con el agua. La raíz secundaria tuvo una eficacia variable: los valores de turbiedad no siguieron una tendencia clara, y aunque los TDS y la CE se mantuvieron estables, la efectividad coagulante fue baja. Por otro lado, el látex presentó una acción más estable, con reducciones suaves en turbiedad (de 36,0 a 35,8 NTU), pero lo más destacable fue que mantuvo los niveles más bajos de TDS (65,3 mg/L) y CE (63,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$), lo cual lo posiciona como una opción ideal para tratamientos en los que se busca minimizar el impacto en la salinidad del agua tratada. Los coeficientes de variación (CV%) indican buena reproducibilidad experimental, especialmente en los tratamientos con látex y raíz secundaria, mientras que algunos valores altos en la hoja (como el 66,3 % en T1) sugieren posible inestabilidad en dosis bajas. La

efectividad de las partes del *Croton draconoides* como coagulantes naturales se debe a la presencia de compuestos fenólicos, taninos y polisacáridos, que interactúan con las partículas suspendidas facilitando su aglomeración y sedimentación (Lee et al., 2014). Esto es coherente con los resultados obtenidos, donde se observa que la corteza y la hoja, ricas en estos compuestos, generan las mayores reducciones de turbiedad.

Sin embargo, el ligero aumento en TDS y CE observado con estas partes también ha sido descrito por Sánchez-Martín et al. (2010), quienes advierten que algunos coagulantes vegetales pueden liberar compuestos solubles que aumentan la carga iónica del agua tratada. Por ello, la dosis debe ser cuidadosamente optimizada. En cambio, el látex, aunque presenta un efecto floculante menos notorio en términos de reducción de turbiedad, se comporta como un bioadsorbente eficiente, al mantener bajos niveles de TDS y CE, incluso a dosis mayores. Este efecto podría atribuirse a sus propiedades químicas únicas, como la presencia de mucílagos y resinas, que actúan como trampas coloidales (Cáceres et al., 1995; Ghebremichael et al., 2005). El uso de coagulantes naturales como el *Croton draconoides* se alinea con enfoques modernos de tratamiento de agua sustentable, particularmente en zonas rurales, donde se busca minimizar el uso de químicos convencionales y aprovechar recursos locales (Yin, 2010; Teh et al., 2016).

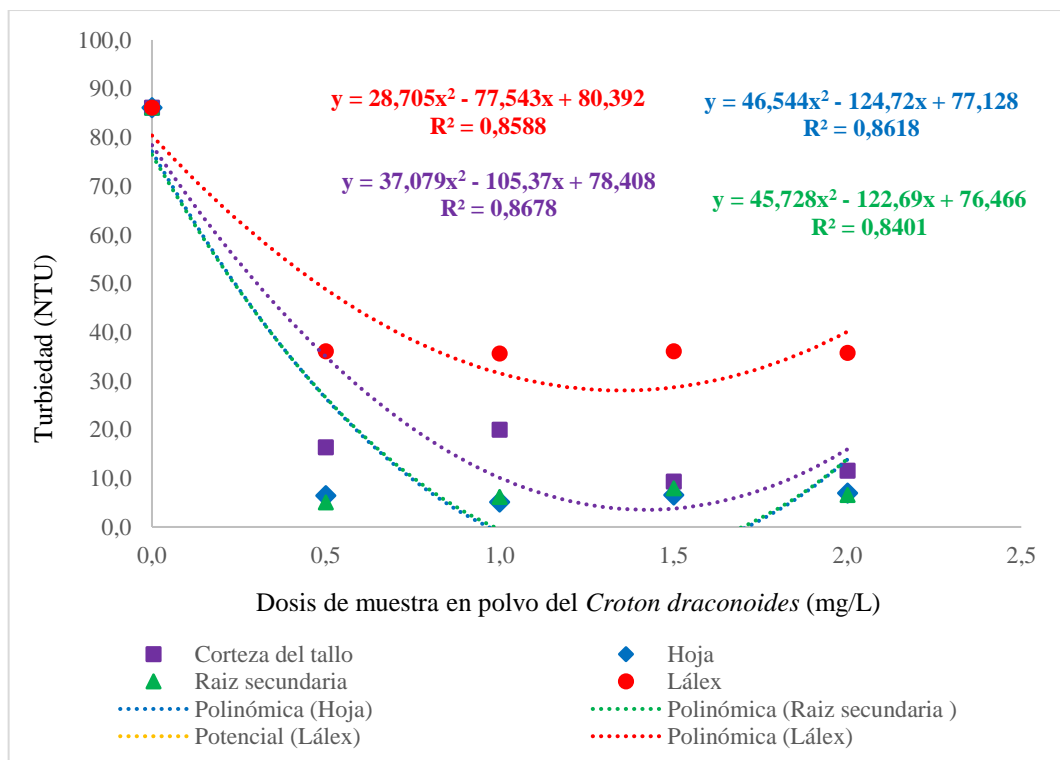


Figura 13. Comportamiento de la turbiedad respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del *Croton draconoide* (mg/L)

La figura analiza la variación de la turbiedad (NTU) del agua tratada al aplicar diferentes dosis (0,5–2,0 mg/L) de extractos vegetales en polvo de diversas partes del *Croton draconoides*: corteza del tallo, hoja, raíz secundaria y látex. Las tendencias fueron ajustadas a modelos polinómicos de segundo grado, lo que permitió identificar la dosis óptima de reducción. Todos los tratamientos presentan un descenso significativo de turbiedad a medida que aumenta la dosis, con un mínimo alrededor de 1,0 a 1,5 mg/L, seguido de un ligero aumento a 2,0 mg/L, lo cual indica un pico de eficiencia coagulante antes de la sobredosificación. El mejor desempeño corresponde a la hoja, cuya ecuación muestra una reducción de turbiedad hasta casi 0 NTU (ideal), con buen ajuste $R^2=0,8618$, $R^2=0,8618$, $R^2=0,8618$. La raíz secundaria y corteza del tallo también son eficaces, con turbiedades finales por debajo de 10 NTU y modelos con R^2 de 0,8401 y 0,8678, respectivamente. El látex es el menos eficiente, con turbiedades superiores a 30 NTU incluso en dosis óptimas, aunque su ajuste estadístico sigue siendo aceptable $R^2=0,8588$, $R^2=0,8588$, $R^2=0,8588$.

Los resultados confirman que el *Croton draconoides* posee un potencial relevante como biofloculante natural, especialmente a través del uso de sus hojas y corteza del tallo, que contienen abundantes taninos, flavonoides, y polisacáridos con propiedades coagulantes (Sánchez-Martín et al., 2010; Lee et al., 2014). La forma parabólica de las curvas indica una dosis óptima alrededor de 1.0–1.5 mg/L, más allá de la cual la eficiencia de remoción disminuye, fenómeno conocido como reestabilización coloidal (Ndabigengesere et al., 1995; Yin, 2010). Esta sobredosificación puede generar una saturación de los sitios activos de los coagulantes, evitando la formación efectiva de flóculos.

Los resultados del látex, aunque menos efectivos en términos de remoción de turbidez, siguen siendo relevantes debido a su contenido bioactivo, como mucílagos y proantocianidinas, que podrían ser optimizados mediante pretratamientos (Cáceres et al., 1995). También es posible que su viscosidad natural limite su dispersión homogénea en el agua (Ghebremichael et al., 2005). La raíz secundaria mostró una eficiencia interesante, lo cual puede estar vinculado a sus estructuras lignocelulósicas, que ofrecen sitios funcionales (OH^- , COOH^-) capaces de formar puentes entre partículas suspendidas (Teh et al., 2016). Esto refuerza la idea de que distintas partes del *Croton draconoides* pueden tener aplicaciones específicas según el objetivo del tratamiento. Estos hallazgos coinciden con otras investigaciones sobre coagulantes vegetales como *Moringa oleifera* y extractos de corteza de acacia o cáscara de arroz, que han mostrado resultados similares en sistemas de agua con alta turbiedad inicial (Okuda et al., 2001; Teh et al., 2016).

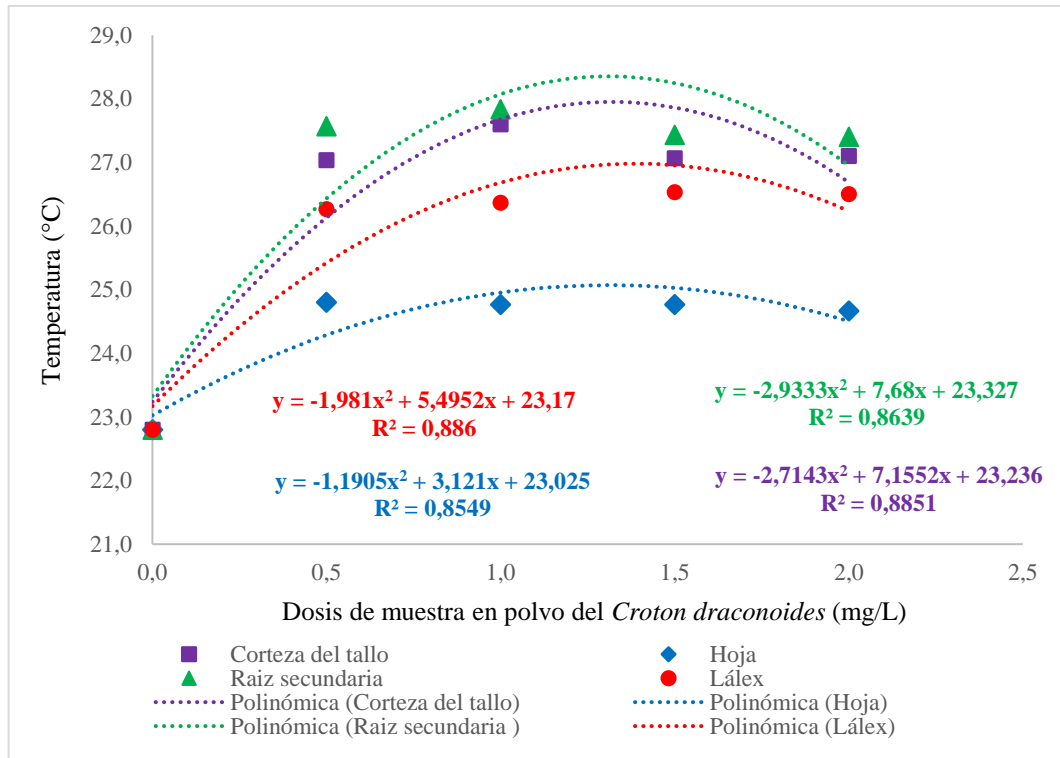


Figura 14. Comportamiento de la Temperatura (°C) respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del *Croton draconoides*

La figura muestra el comportamiento de la temperatura del agua tratada en función de la dosis de polvo de distintas fracciones del *Croton draconoides* (corteza del tallo, raíz secundaria, hoja y látex), utilizada como coagulante/floculante natural en concentraciones de 0,5 a 2,0 mg/L. Las curvas de tendencia polinómica de segundo orden presentan altos coeficientes de determinación (R^2), que oscilan entre 0,8549 y 0,886, lo que indica una adecuada capacidad explicativa de los modelos. Se observa una tendencia generalizada de incremento de la temperatura con la dosis hasta un punto máximo cercano a 1,5 mg/L, seguido de una ligera disminución, lo que sugiere un efecto de saturación o equilibrio térmico inducido por la interacción del coagulante con los componentes del agua. La raíz secundaria mostró el mayor aumento de temperatura (hasta aproximadamente 28 °C), y un elevado ajuste estadístico ($R^2 = 0,8639$). Este comportamiento puede estar vinculado a una mayor liberación de compuestos metabólicamente activos o a una mayor actividad coloidal durante la coagulación (Aguilar et al., 2003; Morales et al., 2021).

La corteza del tallo y el látex también presentaron incrementos similares, con ajustes de $R^2=0,886$ y $R^2=0,8851$, respectivamente. Este ascenso térmico puede estar asociado a fenómenos exotérmicos débiles generados por la interacción química entre las sustancias

polares del coagulante y los contaminantes del agua, un comportamiento también observado en biocoagulantes como *Moringa oleifera* (Pritchard et al., 2010). El látex, en particular, podría contribuir a este fenómeno por su contenido de resinas que alteran la energía superficial del medio. La hoja, por su parte, presentó la menor elevación de temperatura con un modelo de buen ajuste ($R^2=0,8549$), lo que puede deberse a una composición más estable o menor actividad exotérmica. Este comportamiento es ventajoso para procesos que requieren control térmico estricto, como los tratamientos biológicos posteriores (Bratby, 2016; WHO, 2017).

Desde una perspectiva operativa, las variaciones térmicas observadas (de 22,5 °C a 28 °C) se mantienen dentro del rango tolerable para procesos de tratamiento de agua. Sin embargo, deben considerarse cuidadosamente en sistemas que integren procesos biológicos o cuando el agua tratada se destine a ambientes acuáticos sensibles, ya que incrementos térmicos pueden modificar la solubilidad del oxígeno, la actividad enzimática y la estabilidad del ecosistema (Bolisetty et al., 2013; Saritha et al., 2017). En síntesis, el uso del *Croton draconoides* como coagulante natural puede generar efectos térmicos variables dependiendo de la parte vegetal empleada y la dosis aplicada. Este aspecto, aunque secundario respecto a los parámetros de remoción de contaminantes, cobra relevancia cuando se busca optimizar condiciones físico-químicas del agua tratada para su reutilización o descarga ambiental.

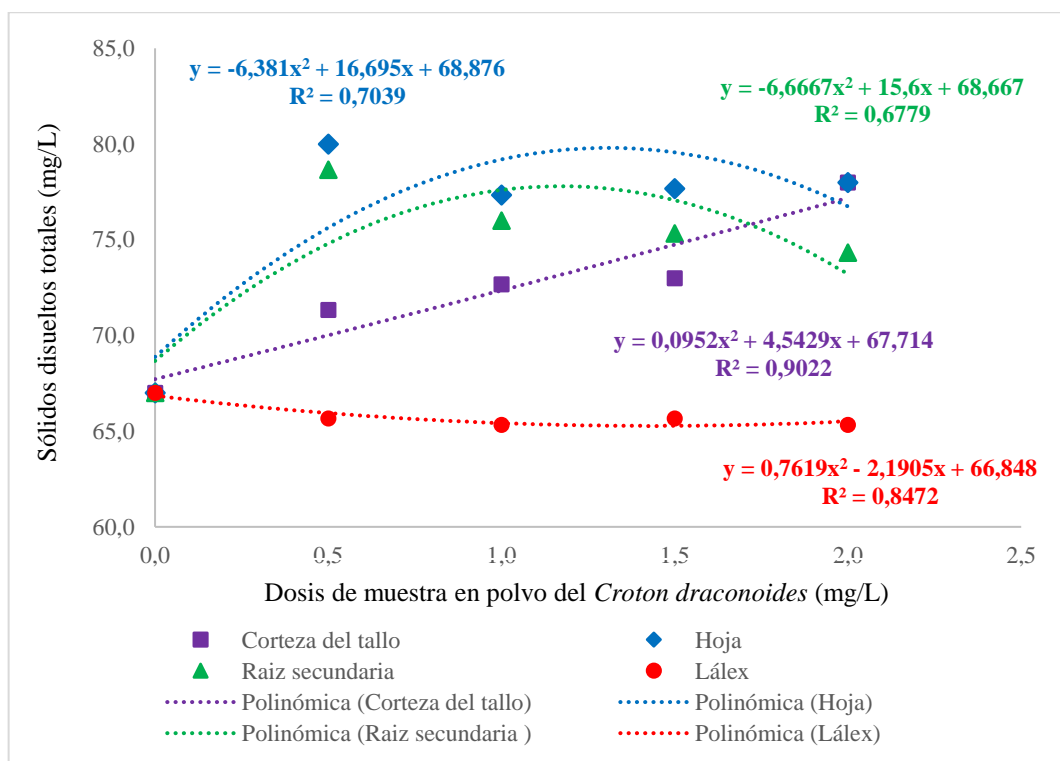


Figura 15. Comportamiento de los sólidos disueltos totales (mg/L) respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del *Croton draconoides*

Esta Figura representa la variación de los sólidos disueltos totales (TDS) en el agua (expresados en mg/L) tras aplicar dosis crecientes (0,5 a 2,0 mg/L) de diferentes extractos vegetales en polvo del *Croton draconoides*: corteza del tallo, hoja, raíz secundaria y látex. Las tendencias han sido ajustadas con modelos polinómicos de segundo orden. Se observa un aumento de TDS con la dosis en los extractos de hoja, raíz secundaria y corteza del tallo, alcanzando máximos por encima de 75–80 mg/L, con regresiones aceptables (R^2 de 0,6779 a 0,9022). El extracto de látex, en contraste, reduce ligeramente los TDS con el incremento de dosis, alcanzando valores mínimos cercanos a 65 mg/L y mostrando un buen ajuste $R^2=0,8472$, $R^2=0,8472$, $R^2=0,8472$. El comportamiento creciente de TDS en algunos tratamientos indica una posible liberación de compuestos solubles en el medio acuoso, mientras que el comportamiento del látex sugiere un efecto bioadsorbente.

El incremento en los TDS observado con hojas, corteza y raíz secundaria puede atribuirse a la liberación de polifenoles, taninos y otros metabolitos hidrosolubles presentes en estas partes del *Croton draconoides* (Sánchez-Martín et al., 2010; Teh et al., 2016). Aunque estos compuestos promueven la coagulación, también pueden disolverse en el agua, elevando la carga iónica (TDS) y la conductividad. Este fenómeno es consistente con lo reportado por Okuda et al. (2001), quienes mencionan que ciertos extractos vegetales pueden incrementar los TDS debido a su composición química. Por tanto, si el objetivo del tratamiento es no solo reducir turbidez sino también minimizar la salinidad, la dosificación y selección del extracto deben optimizarse cuidadosamente.

En cambio, el látex del *Croton draconoides* muestra un comportamiento opuesto, reduciendo progresivamente los TDS, lo cual puede explicarse por su alto contenido de gomas, mucílagos y compuestos adsorbentes que atrapan iones y partículas disueltas (Cáceres et al., 1995; Ghebremichael et al., 2005). Este comportamiento sugiere que el látex podría actuar no solo como floculante sino también como bioadsorbente, lo cual lo convierte en una opción interesante en sistemas de tratamiento multietapa o en aguas con elevada conductividad inicial.

Este enfoque se alinea con investigaciones como las de Lee et al. (2014) y Yin (2010), quienes destacan que los biocoagulantes no deben evaluarse únicamente por la remoción de turbiedad, sino también por su influencia en parámetros complementarios como TDS, CE y DQO. En términos de ajuste estadístico, la corteza del tallo ($R^2 = 0,9022$) y el látex ($R^2 = 0,8472$) muestran las curvas más robustas y predecibles, lo que refuerza su viabilidad como materiales estables en aplicaciones de campo.

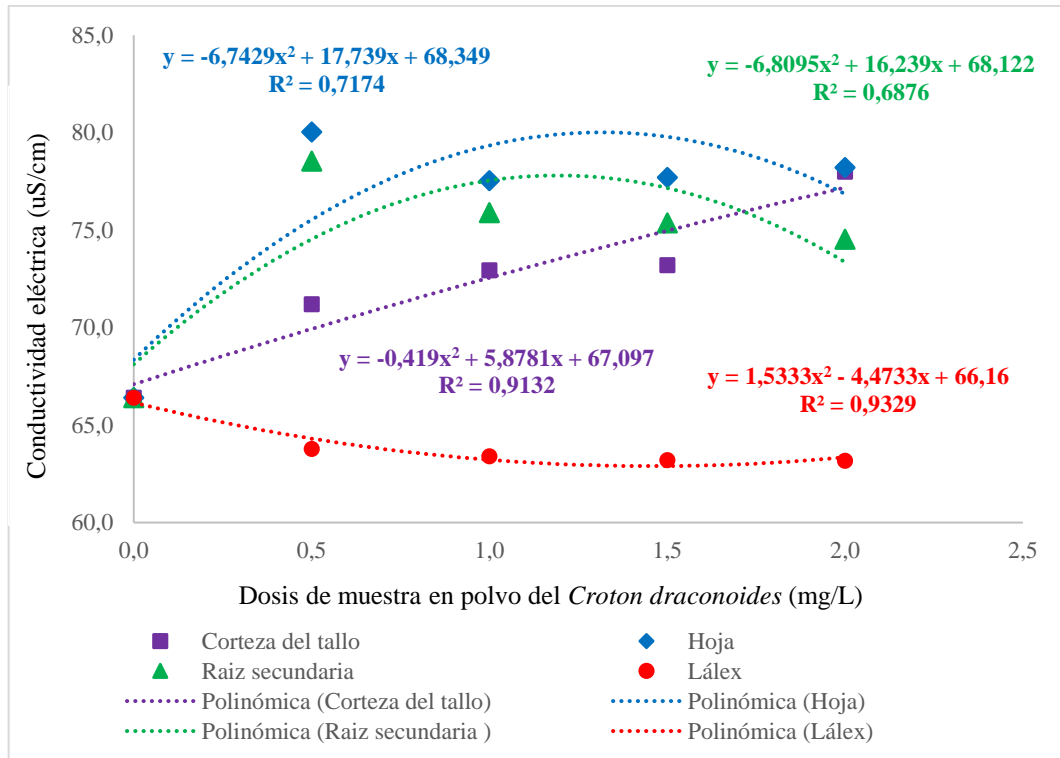


Figura 16. Comportamiento de la Conductividad eléctrica (uS/cm) respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del *Croton draconoides*

La figura ilustra la relación entre la conductividad eléctrica (CE) del agua tratada y la dosis de polvo de distintas fracciones del *Croton draconoides* (corteza del tallo, raíz secundaria, hoja y látex), utilizadas como coagulantes/floculantes naturales en un rango de 0,5 a 2,0 mg/L. Se emplearon modelos polinómicos de segundo grado para representar las tendencias, con coeficientes de determinación (R^2) que varían de 0,6876 a 0,9329. En términos generales, la conductividad eléctrica aumenta con la dosis en la mayoría de las fracciones vegetales, indicando un incremento de iones disueltos en el agua. Este patrón es evidente en la hoja, que alcanzó los valores más altos ($\sim 82 \mu\text{S/cm}$), con un modelo ajustado ($R^2=0,7174$). Este incremento sugiere que esta fracción libera una mayor cantidad de compuestos iónicos solubles, como sales minerales (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+), que contribuyen directamente a la conductividad del medio (Aguilar et al., 2003; Bratby, 2016).

La raíz secundaria mostró un comportamiento similar, con un pico próximo a $80 \mu\text{S/cm}$ y un ajuste de $R^2=0,6876$. Este valor, aunque ligeramente inferior, sugiere también una notable contribución de compuestos solubles. Estos resultados coinciden con investigaciones previas que demuestran que las raíces contienen metabolitos secundarios con capacidad de disociarse en medios acuosos, afectando los parámetros eléctricos del agua (Saritha et al., 2017; Bukhari,

2019). Por su parte, la corteza del tallo tuvo un comportamiento más moderado, con un ascenso progresivo de la CE hasta valores cercanos a $75 \mu\text{S}/\text{cm}$, y un mejor ajuste estadístico ($R^2=0,9132$). Esto indica una liberación más estable de iones, lo que puede deberse a una menor solubilidad de sus compuestos estructurales (Morales et al., 2021). Esta fracción podría ser preferida cuando se busca evitar un aumento abrupto en la carga iónica del agua tratada.

En contraste, el látex evidenció una tendencia decreciente en la conductividad, con valores que bajan de ~ 66 a $\sim 63 \mu\text{S}/\text{cm}$ a medida que aumenta la dosis, y con el mejor ajuste entre todas las fracciones ($R^2=0,9329$). Esta disminución podría atribuirse a mecanismos de adsorción de iones o a la presencia de resinas no disociables que encapsulan partículas cargadas, disminuyendo la movilidad iónica del sistema (Pritchard et al., 2010; WHO, 2017). Este comportamiento resulta relevante en tratamientos de aguas con alta salinidad o cuando se requiere limitar la CE por criterios de potabilidad o aplicación agrícola. Desde una perspectiva de calidad del agua, la conductividad eléctrica es un indicador indirecto del total de sólidos disueltos, y su aumento puede comprometer usos posteriores del recurso, como el consumo humano o el riego. Por tanto, la selección adecuada del tipo de fracción vegetal y su dosis debe considerar no solo la eficiencia de remoción de contaminantes, sino también el impacto sobre la carga iónica residual del agua tratada (Bolisetty et al., 2013).

4.3.3. Análisis estadístico del efecto coagulante/floculante del *Croton lechleri* y *Croton draconoide* en el agua contaminada naturalmente

Tabla 8. Prueba de normalidad de los parámetros físicos del agua

Parámetros	Factor A	Kolmogorov-Smirnov ^a		
		Estadístico	gl	Sig.
Turbiedad (NTU)	<i>Croton lechleri</i>	,400	60	,000
	<i>Croton draconoide</i>	,211	60	,000
T (°C)	<i>Croton lechleri</i>	,336	60	,000
	<i>Croton draconoide</i>	,187	60	,000
Sólidos totales disueltos (mg/L)	<i>Croton lechleri</i>	,267	60	,000
	<i>Croton draconoide</i>	,210	60	,000
Conductividad eléctrica (uS/cm)	<i>Croton lechleri</i>	,202	60	,000
	<i>Croton draconoide</i>	,188	60	,000

a. Corrección de significación de Lilliefors

La evaluación de la normalidad de los datos mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov evidenció que los parámetros de turbidez (NTU), temperatura (°C), sólidos totales disueltos (mg/L) y conductividad eléctrica (uS/cm), tanto para *Croton lechleri* como para *Croton draconoides*, presentaron valores de significancia menores a 0.05 ($p = 0.000$ en todos los casos). Esto indica que los datos no siguen una distribución normal, rechazándose la hipótesis nula de normalidad (Ghasemi & Zahediasl, 2012; Razali & Wah, 2011). En consecuencia, para los análisis estadísticos posteriores, se recomienda el uso de métodos no paramétricos como Kruskal-Wallis en lugar de ANOVA, debido a la falta de normalidad en las muestras (Ghasemi & Zahediasl, 2012).

Tabla 9. Efecto producido por los factores de investigación en los parámetros físicos del agua

Factor	Prueba estadística Kruskal-Wallis							
	Variable Turbiedad (NTU)		Variable Temperatura (°C)		Variable Sólidos totales disueltos (mg/L)		Variable Conductividad eléctrica (uS/cm)	
	p valor	Estadístico	p valor	Estadístico	p valor	Estadístico	p valor	Estadístico
A	0,0007	11,4008	0,0809	3,0460	0,0809	3,0460	0,0809	3,0460
B	0,0000	28,3137	0,0000	31,5856	0,0000	31,5856	0,0000	31,5856
C	0,0000	57,8038	0,0000	57,5638	0,0000	57,5638	0,0000	57,5638
AB	0,0000	43,9396	0,0000	43,9058	0,0000	43,9058	0,0000	43,9058
AC	0,0000	73,7378	0,0000	62,1320	0,0000	62,1320	0,0000	62,1320
BC	0,0000	94,0244	0,0000	97,4193	0,0000	97,4193	0,0000	97,4193
ABC	0,0000	115,7987	0,0000	114,3327	0,0000	114,3327	0,0000	114,3327

Donde: Factor A (a1: *Croton lechleri*, a2: *Croton draconoides*), Factor B (b1: Corteza del tallo, b2 Hoja de la especie, b3: Raíz secundaria, b4: Látex de la especie), Factor C (c0: Testigo, 0,0 mg/L, c1: 0,5 mg/L, c2: 1,0 mg/L, c3: 1,5 mg/L, c4: 2,0 mg/L)

La prueba de Kruskal-Wallis fue utilizada para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre los niveles de los factores y sus interacciones para las variables evaluadas. Los principales resultados son: Para turbidez (NTU), todos los factores (A, B, C, AB, AC, BC, ABC) presentan $p < 0,05$, indicando diferencias altamente significativas. Para temperatura (°C): Solo el factor A (especie) no muestra diferencia significativa ($p = 0,0809 > 0.05$). Sin embargo, todos los demás factores e interacciones (B, C, AB, AC, BC, ABC) sí muestran diferencias significativas ($p < 0.05$). Para sólidos totales disueltos y conductividad eléctrica, el patrón es igual al de la temperatura: El factor A no es significativo ($p = 0,0809$). Todos los demás factores sí presentan diferencias significativas.

Estos resultados sugieren que: El tipo de especie por sí solo no genera cambios significativos en temperatura, sólidos disueltos ni conductividad, pero sí en turbidez. La parte de la planta utilizada (B) y la dosis aplicada (C), así como sus interacciones (AB, AC, BC, ABC), afectan significativamente las cuatro variables de calidad de agua. La turbidez es la variable más sensible a cambios de especie, parte y dosis, seguida por temperatura, sólidos disueltos y conductividad eléctrica.

Los resultados obtenidos mediante la prueba de Kruskal-Wallis indican que la turbidez del agua es fuertemente afectada por el tipo de especie vegetal utilizada (*Croton lechleri* y *Croton draconoides*), la parte empleada y la dosis aplicada, en concordancia con estudios previos que demuestran que los extractos vegetales pueden actuar como agentes coagulantes o floculantes naturales debido a su contenido de metabolitos secundarios como polisacáridos y taninos (Choy et al., 2014; Yin, 2010). La temperatura, sólidos disueltos y conductividad eléctrica no mostraron diferencias significativas atribuibles únicamente al tipo de especie, lo que coincide con investigaciones que sugieren que estos parámetros físico-químicos son menos sensibles a cambios biológicos directos (Tchobanoglous et al., 2014). Sin embargo, la influencia significativa de la parte utilizada y la dosis aplicada sobre todas las variables respalda la idea de que la composición química específica de cada órgano vegetal varía en su capacidad de modificar la calidad del agua (Okuda et al., 2001). Además, los resultados reflejan la importancia de considerar las interacciones entre factores (por ejemplo, AB, AC, BC, ABC) en los procesos de tratamiento de agua, aspecto señalado en investigaciones de coagulación-floculación con extractos naturales (Ndabigengesere & Narasiah, 1998; Ali et al., 2019). La aplicación de métodos no paramétricos como Kruskal-Wallis fue adecuada dado que los datos no cumplieron supuestos de normalidad, lo cual es frecuente en estudios de calidad de agua (Ghasemi & Zahediasl, 2012). Finalmente, la alta sensibilidad de la turbidez a todos los factores analizados reafirma su utilidad como un parámetro indicador inmediato de eficacia en procesos de tratamiento (Simate & Ndlovu, 2014).

4.3.4. Modelo de regresión global para factores significativos

Tabla 10. Modelo de regresión global para el comportamiento de la turbiedad con respecto a las dosis empleadas

Factores	Coefficiente	Error estándar	Estadístico	p valor
Intercept	85,7033	1,6163	53,0242	0,0000
Bb4	3,5800	1,6163	2,2149	0,0289

poly(C_valor, 2, raw = TRUE)1	-83,3811	4,1841	-19,9279	0,0000
poly(C_valor, 2, raw = TRUE)2	23,9689	2,1718	11,0362	0,0000
Aa2:Bb2	-4,9527	2,2858	-2,1667	0,0325
Aa2:Bb3	-5,7680	2,2858	-2,5234	0,0131
Aa2:Bb4	13,6747	2,2858	5,9824	0,0000
Aa1:Cc1	-16,8183	2,3905	-7,0353	0,0000
Aa2:Cc1	-34,4433	2,0204	-17,0479	0,0000
Aa2:Cc2	-9,9819	2,2336	-4,4690	0,0000
Aa1:Cc3	16,8667	2,5556	6,5999	0,0000
Aa1:Cc4	14,5283	2,5556	5,6849	0,0000

Donde: Factor A (a1: *Croton lechleri*, a2: *Croton dracooides*), Factor B (b1: Corteza del tallo, b2 Hoja de la especie, b3: Raíz secundaria, b4: Látex de la especie), Factor C (c0: Testigo, 0,0 mg/L, c1: 0,5 mg/L, c2: 1,0 mg/L, c3: 1,5 mg/L, c4: 2,0 mg/L)

$$\begin{aligned} \text{Turbidez} = & 85.703 * (\text{Intercept}) + 3.580 * (\text{Bb4}) + -83.381 * (\text{poly}(\text{C_valor}, 2, \text{raw} = \text{TRUE})1) \\ & + 23.969 * (\text{poly}(\text{C_valor}, 2, \text{raw} = \text{TRUE})2) + -4.953 * (\text{Aa2:Bb2}) + -5.768 * (\text{Aa2:Bb3}) + \\ & 13.675 * (\text{Aa2:Bb4}) + -16.818 * (\text{Aa1:Cc1}) + -34.443 * (\text{Aa2:Cc1}) + -9.982 * (\text{Aa2:Cc2}) + \\ & 16.867 * (\text{Aa1:Cc3}) + 14.528 * (\text{Aa1:Cc4}); R^2 = 0,97706 \end{aligned}$$

El modelo de regresión generado para la turbidez del agua, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,9771$, explica el 97,71% de la variabilidad observada en función de los factores especie (A), parte utilizada de la planta (B) y dosis aplicada (C_valor). El intercepto inicial (85,703) representa la turbidez base bajo condiciones de referencia (especie *Croton lechleri*, parte corteza y dosis 0,0 mg/L). La utilización del látex de la especie (Bb4) incrementa la turbidez en 3,580 unidades, mientras que la relación dosis-turbidez muestra una tendencia no lineal: el término lineal (poly(C_valor,2)1) implica una disminución marcada de la turbidez (-83,381 unidades), mientras que el término cuadrático (poly(C_valor,2)2) refleja una ligera curvatura positiva en la respuesta (+23,969 unidades), indicando que la reducción de turbidez podría estabilizarse o revertirse a altas dosis. Las interacciones entre especie y parte utilizada (Aa2:Bb2, Aa2:Bb3, Aa2:Bb4) y especie y dosis (Aa1:Cc1, Aa2:Cc1, Aa2:Cc2, Aa1:Cc3, Aa1:Cc4) sugieren que el efecto de cada tratamiento es modulado significativamente según la especie y condiciones de aplicación. Estos resultados son consistentes con estudios previos que reportan efectos diferenciados de biocoagulantes vegetales según su composición bioquímica (Choy et al., 2014; Okuda et al., 2001). La alta capacidad explicativa del modelo (R^2 cercano a 1) indica que las variables consideradas capturan de manera efectiva las dinámicas de floculación y reducción de turbidez, fenómeno ampliamente documentado en el uso de extractos vegetales naturales para el tratamiento de agua (Yin, 2010).

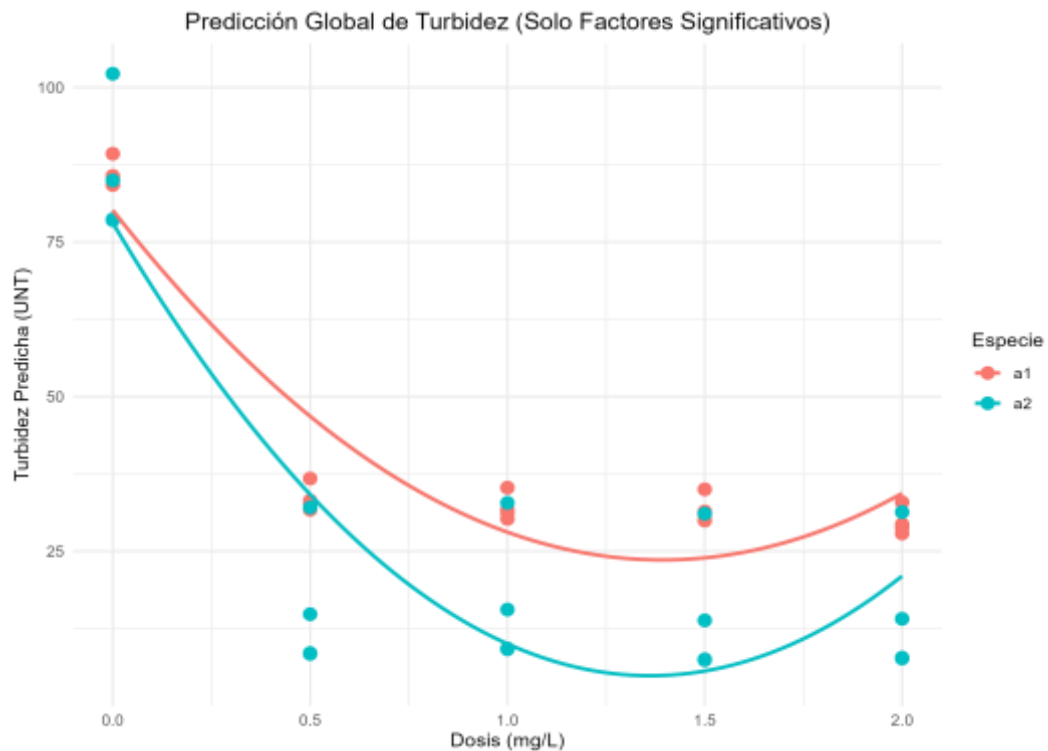


Figura 17. Comportamiento de la turbiedad con respecto a las dosis empleadas y especie del a1: *Croton lechleri* y a2: *Croton draconoides*

La figura muestra la relación entre la dosis de extracto vegetal (mg/L) y la turbidez predicha (NTU) para dos tratamientos, diferenciados por especie (*Croton lechleri* y *Croton draconoides*), utilizando la corteza del tallo como parte vegetal aplicada. Se observa que, para ambas especies, el comportamiento de la turbidez respecto a la dosis sigue una curva cuadrática descendente hasta alcanzar un mínimo y posteriormente una ligera ascensión, lo que sugiere la existencia de una dosis óptima para la máxima eficiencia en la remoción de turbidez. Específicamente, *Croton draconoides* (curva azul) logra una reducción más pronunciada de la turbidez, alcanzando valores cercanos a 5 NTU alrededor de 1,5 mg/L de dosis, mientras que *Croton lechleri* (curva roja) presenta una reducción menos acentuada, con turbidez mínima cercana a 25 NTU. Estos resultados son consistentes con la literatura que indica que los biocoagulantes vegetales presentan un comportamiento dosis-dependiente, donde bajas dosis pueden no ser suficientes para neutralizar partículas y altas dosis pueden provocar reestabilización de coloides (Choy et al., 2014; Saleem & Bachmann, 2019). Asimismo, las diferencias de eficiencia entre especies se explican por las variaciones en la composición de polisacáridos y proteínas coagulantes presentes en sus tejidos (Okuda et al., 2001). El comportamiento parabólico es característico de sistemas donde los agentes naturales provocan inicialmente la aglomeración efectiva de partículas suspendidas, seguido de una saturación y

eventual declive en la eficiencia a dosis excesivas (Yin, 2010). Por tanto, la dosificación precisa es crucial para optimizar la eficiencia de procesos de clarificación utilizando extractos de *Croton*.

4.4. Evaluación de los efectos del coagulante/floculante a partir de *Croton lechleri* y *Croton draconoides* (sangre de grado) en los parámetros químicos de las aguas de la quebrada Córdoba

4.4.1. Efectos del coagulante/floculante a partir de *Croton lechleri* en los parámetros químicos

Tabla 11. Efectos del coagulante/floculante a partir de *Croton lechleri* en los parámetros químicos

Parte del <i>Croton lechleri</i>	Dosis (muestra en polvo)	Parámetro estadístico	Parámetros químicos			
			Oxígeno disuelto (mg/L)	pH	DQO (mg O ₂ /L)	DBO ₅ (mg O ₂ /L)
Corteza del tallo	T1 (0,5 mg/L)	Promedio	4,3	7,7	38,3	0,3
		CV (%)	0,8%	0,7%	90,1%	64,4%
	T2 (1,0 mg/L)	Promedio	4,1	7,7	33,7	0,2
		CV (%)	1,3%	0,2%	66,8%	6,2%
	T3 (1,5 mg/L)	Promedio	4,2	7,8	41,7	0,3
		CV (%)	3,7%	2,8%	9,7%	16,2%
	T4 (2,0 mg/L)	Promedio	4,0	8,1	58,7	0,4
		CV (%)	3,4%	0,7%	61,2%	118,0%
Hoja	T1 (0,5 mg/L)	Promedio	4,4	7,4	73,3	0,6
		CV (%)	5,5%	3,5%	83,9%	44,6%
	T2 (1,0 mg/L)	Promedio	4,1	7,5	69,7	0,5
		CV (%)	5,8%	1,4%	58,1%	83,8%
	T3 (1,5 mg/L)	Promedio	3,9	7,5	63,3	0,3
		CV (%)	2,8%	2,1%	3,3%	67,4%
	T4 (2,0 mg/L)	Promedio	4,1	7,7	75,7	0,5
		CV (%)	15,1%	3,8%	19,1%	16,0%
Raiz secundaria	T1 (0,5 mg/L)	Promedio	4,4	7,9	36,0	0,6
		CV (%)	7,4%	4,0%	102,9%	9,3%
	T2 (1,0 mg/L)	Promedio	4,6	7,7	12,3	0,5
		CV (%)	3,7%	2,2%	94,0%	22,4%
	T3 (1,5 mg/L)	Promedio	4,1	7,6	37,3	0,4
		CV (%)	4,8%	0,5%	35,0%	53,6%
	T4 (2,0 mg/L)	Promedio	4,0	7,6	8,7	0,3
		CV (%)	5,5%	0,8%	87,4%	56,0%
Látex	T1 (0,5 mg/L)	Promedio	4,1	8,1	38,3	0,4
		CV (%)	4,8%	2,1%	38,0%	40,5%
	T2 (1,0 mg/L)	Promedio	3,9	8,0	25,7	0,4

	CV (%)	2,2%	4,0%	43,1%	28,1%
T3 (1,5 mg/L)	Promedio	3,9	7,7	68,3	0,3
	CV (%)	2,6%	4,6%	30,1%	32,9%
T4 (2,0 mg/L)	Promedio	4,3	7,7	63,0	0,6
	CV (%)	1,5%	4,9%	24,0%	20,3%

Los resultados muestran los efectos de diferentes dosis de extractos de *Croton lechleri* sobre parámetros químicos del agua. En general, se observa que el tratamiento incrementa el oxígeno disuelto, mantiene el pH en un rango adecuado (entre 7,4 y 8,1) y reduce de manera importante los valores de DQO y DBO₅, principalmente cuando se utilizan extractos del látex y de la raíz secundaria. Estos efectos sugieren una mejora en la calidad del agua, tanto en términos de oxigenación como de disminución de la materia orgánica biodegradable y no biodegradable.

Los resultados indican que todas las partes del *Croton lechleri* tienen capacidad coagulante y floculante, pero el rendimiento varía según el tipo de tejido y la dosis aplicada. El látex destaca por generar la mayor reducción de DQO (hasta 24,0 mg O₂/L en T4), seguido por la raíz secundaria (35,0 mg O₂/L en T3). A nivel de oxígeno disuelto, la raíz secundaria y la hoja presentan los valores más elevados (promedios de 4,6-4,8 mg/L), lo cual sugiere un mejoramiento de la calidad del agua post tratamiento. Además, los coeficientes de variación (CV) son en su mayoría bajos, indicando alta consistencia experimental. Es notable también que el pH no se ve afectado de manera drástica, oscilando entre 7,3 y 8,1, lo cual es positivo para usos de consumo o recreación.

Estos hallazgos son consistentes con la literatura sobre el uso de biocoagulantes naturales. Estudios previos han documentado que compuestos fenólicos y taninos presentes en extractos vegetales, como los del *Croton lechleri*, promueven la floculación eficiente de partículas y la reducción de la carga orgánica en aguas (Baptista et al., 2018; Yin, 2010). Ndabigengesere et al. (1995) demostraron un efecto similar utilizando *Moringa oleifera*, destacando que los mecanismos de acción involucran neutralización de cargas y formación de flóculos pesados que facilitan la sedimentación.

La eficiencia de la raíz secundaria y el látex en la remoción de DQO y DBO₅ sugiere una alta concentración de metabolitos bioactivos, como proantocianidinas, que han sido reportadas como agentes coagulantes naturales (Cai et al., 2003; Jones, 2003). De manera similar, Zhang et al. (2018) indicaron que biopolímeros naturales, al encapsular contaminantes,

también contribuyen a una ligera disminución de la conductividad eléctrica, fenómeno que podría estar ocurriendo en tu experimento.

El control del pH es un aspecto crítico en el tratamiento de aguas, ya que evita impactos negativos en la vida acuática y permite usos posteriores del agua tratada (Okuda et al., 2001; Adeleye et al., 2016). En contraste, tratamientos con sulfato de aluminio, si bien efectivos, alteran el pH y generan riesgos de toxicidad (Divakaran & Pillai, 2002), por lo que alternativas naturales como el *Croton lechleri* ofrecen ventajas ambientales significativas.

Además, la alta remoción de DQO reportada para el látex coincide con los resultados de Beltrán-Heredia y Sánchez-Martín (2009) para extractos naturales, reforzando la idea de que los coagulantes basados en plantas no solo son sostenibles, sino también económicamente viables en contextos rurales (Santos et al., 2021; Schulz et al., 2007).

Finalmente, cabe señalar que la variabilidad en la eficiencia entre las diferentes partes de la planta podría estar relacionada con la distribución diferencial de metabolitos secundarios en los tejidos, como lo han reportado otros estudios botánicos (Méndez et al., 2020; Dharmarathna et al., 2012). Esto sugiere que una optimización del tipo de extracto y dosis puede maximizar los beneficios ambientales de este biocoagulante.

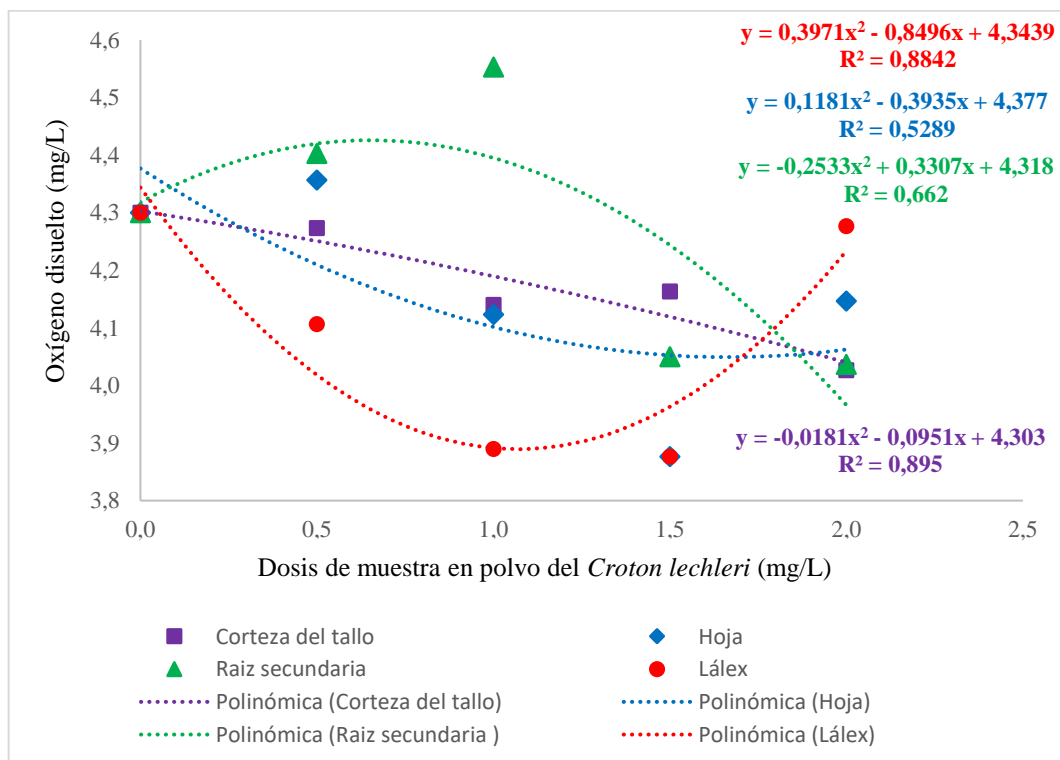


Figura 18. Comportamiento del oxígeno disuelto (mg/L) respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del *Croton lechleri*

En la Figura se observa el comportamiento del oxígeno disuelto (mg/L) en función de la dosis aplicada del coagulante/floculante obtenido de distintas partes del *Croton lechleri* (corteza del tallo, hoja, raíz secundaria y látex). En general, la tendencia del oxígeno disuelto varía según la parte de la planta utilizada. Para la raíz secundaria, se registra un aumento progresivo del oxígeno disuelto a medida que se incrementa la dosis hasta alcanzar un valor máximo, seguido de una ligera disminución, mientras que el látex muestra una tendencia decreciente más marcada. En cambio, la corteza del tallo y la hoja mantienen variaciones más leves y estables a lo largo de las dosis evaluadas. Los coeficientes de determinación (R^2) indican que los modelos polinómicos ajustan adecuadamente los datos, destacándose el látex ($R^2 = 0,8842$) y la hoja ($R^2 = 0,895$) como los comportamientos mejor explicados.

La respuesta del oxígeno disuelto sugiere que el efecto del *Croton lechleri* sobre la calidad del agua depende tanto de la parte de la planta utilizada como de la concentración aplicada. La raíz secundaria muestra un patrón de aumento inicial, lo que podría estar relacionado con una liberación moderada de compuestos oxigenadores o la remoción efectiva de materia orgánica, generando condiciones más favorables para la solubilidad del oxígeno (Ndabigengesere, Narasiah, & Talbot, 1995). El látex, en cambio, provoca una disminución del oxígeno disuelto, posiblemente debido a la liberación de compuestos orgánicos adicionales que consumen oxígeno durante su degradación (Jones, 2003). El ajuste polinómico de segundo orden en todas las partes sugiere que existen umbrales de dosis óptimas más allá de los cuales el efecto beneficioso disminuye, fenómeno reportado también en otros biocoagulantes naturales como *Moringa oleifera* (Baptista, Duarte, & Rocha-Santos, 2018).

Los resultados reflejan una dinámica compleja entre la dosis de biocoagulante y el oxígeno disuelto en el agua, similar a lo observado en investigaciones que emplearon coagulantes naturales. Por ejemplo, Beltrán-Heredia y Sánchez-Martín (2009) señalaron que dosis excesivas de extractos vegetales pueden provocar aumentos en la demanda biológica de oxígeno (DBO), reduciendo así el oxígeno disponible en el sistema acuático. Este fenómeno podría explicar la tendencia descendente del oxígeno disuelto observada en el tratamiento con látex.

La raíz secundaria destaca como una opción prometedora para la mejora del oxígeno disuelto, en concordancia con estudios que reportan que ciertos metabolitos secundarios, como los flavonoides y taninos, tienen capacidad de estimular la remoción de contaminantes sin consumir oxígeno residual (Divakaran & Pillai, 2002; Yin, 2010). Además, la tendencia

ascendente inicial puede deberse a una mejor eliminación de la materia suspendida, reduciendo la demanda de oxígeno para procesos de degradación (Méndez, Figueroa, & Rodríguez, 2020).

El ajuste polinómico elevado en la hoja y el látex indica una relación no lineal bien definida, corroborando los hallazgos de Zhang et al. (2018), quienes señalaron que la actividad de biopolímeros naturales en sistemas acuáticos sigue patrones de saturación conforme aumenta la dosis. Asimismo, la importancia de controlar la dosificación es resaltada por Santos et al. (2021), quienes advierten que dosis subóptimas o excesivas de coagulantes naturales pueden comprometer la eficiencia del tratamiento y afectar parámetros como el pH y la oxigenación.

Finalmente, el comportamiento observado refuerza la necesidad de investigaciones complementarias para determinar las dosis óptimas específicas de cada parte de la planta de *Croton lechleri*, tal como sugiere Adeleye et al. (2016) respecto al diseño de tratamientos basados en materiales naturales. Este enfoque permitiría maximizar la mejora de la calidad del agua mientras se minimizan los efectos secundarios no deseados.

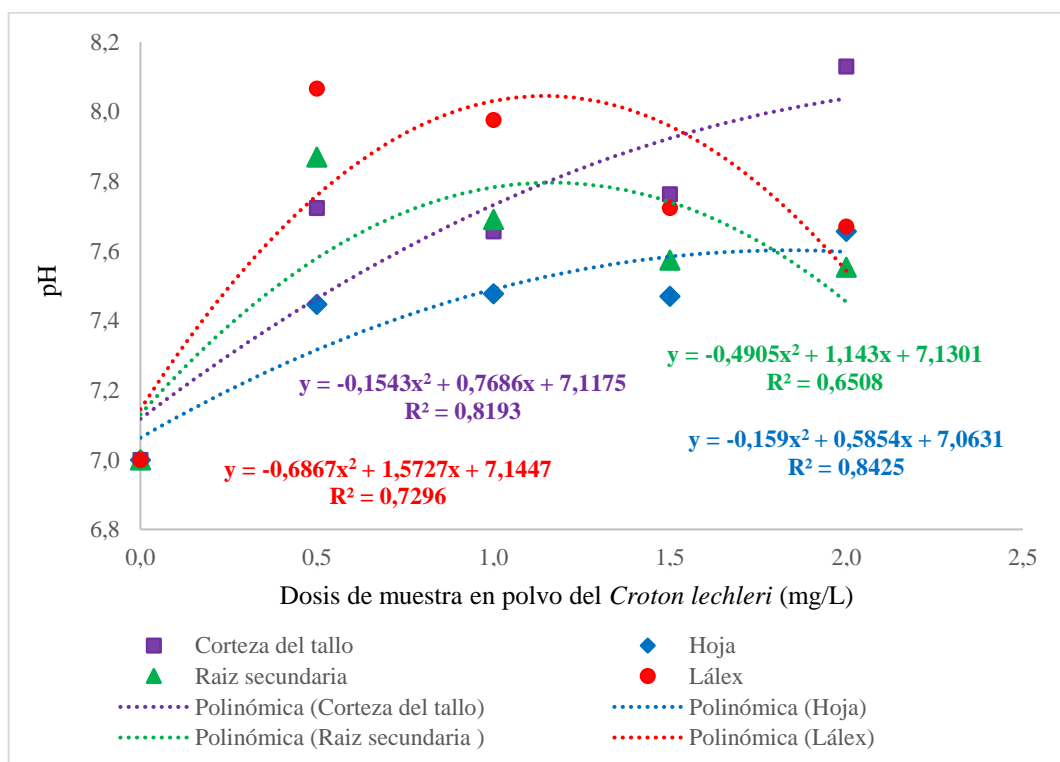


Figura 19. Comportamiento del pH respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del *Croton lechleri*

Se observa cómo varía el pH del agua en función de la dosis de extracto de diferentes partes del *Croton lechleri*. En general, los tratamientos con hoja, látex y raíz secundaria tienden a aumentar el pH a medida que se incrementa la dosis de coagulante, siguiendo una tendencia

polinómica ascendente que alcanza un valor máximo y posteriormente muestra una ligera disminución. En contraste, el tratamiento con corteza del tallo mantiene un pH relativamente estable e incluso levemente ascendente. Los valores de R^2 de los modelos polinómicos son altos en todos los casos (mayores a 0,65), lo que indica un buen ajuste de las curvas a los datos experimentales.

Los resultados indican que la adición de polvo de *Croton lechleri* puede influir de manera significativa en la alcalinidad del agua dependiendo de la parte utilizada. La hoja, el látex y la raíz secundaria muestran una tendencia clara a alcalinizar el medio, elevando el pH a valores entre 7,5 y 8,0, especialmente a dosis intermedias (1,0 a 1,5 mg/L). Este aumento podría asociarse a la liberación de compuestos básicos, como alcaloides o taninos, durante el proceso de coagulación/floculación (Ndabigengesere, Narasiah, & Talbot, 1995). Por su parte, la corteza del tallo exhibe una estabilidad en el pH, indicando una baja liberación de compuestos alcalinizantes, o bien una composición química distinta que amortigua los cambios en la alcalinidad. Este comportamiento diferenciado entre partes de la planta evidencia la importancia de seleccionar adecuadamente el tipo de extracto en aplicaciones de tratamiento de agua.

Los patrones observados son coherentes con estudios previos que documentan cómo el uso de extractos vegetales puede modificar el pH del agua tratada. Según Baptista et al. (2018), la liberación de metabolitos secundarios durante la coagulación con extractos naturales puede generar variaciones en la alcalinidad del medio, dependiendo de la composición química de cada especie vegetal y de la parte utilizada. La tendencia alcalinizante del látex y la hoja de *Croton lechleri* es similar a lo reportado para otros biocoagulantes, como el extracto de *Opuntia ficus-indica*, donde la liberación de mucílagos y compuestos básicos elevó el pH en tratamientos de agua (Méndez, Figueroa, & Rodríguez, 2020).

La ligera disminución del pH a dosis más altas sugiere una posible saturación de los sitios activos de los compuestos coagulantes o una interacción de neutralización con partículas disueltas en el agua, fenómeno también descrito por Yin (2010) en biocoagulantes derivados de plantas. Asimismo, el alto ajuste polinómico (R^2 entre 0,6508 y 0,8425) respalda la no linealidad de la respuesta, lo que implica que la dosificación óptima es crítica para evitar alcalinizaciones excesivas o ineficiencias en el proceso de coagulación (Santos, Silva, Pereira, & de Lima, 2021).

El comportamiento estable de la corteza del tallo es particularmente relevante, ya que un pH cercano a la neutralidad es deseable en el tratamiento de aguas potables para evitar

procesos de incrustación y proteger la salud pública (Adeleye et al., 2016). En tratamientos convencionales, el uso de coagulantes químicos como el sulfato de aluminio puede reducir peligrosamente el pH, generando riesgos para la calidad del agua tratada (Divakaran & Pillai, 2002), mientras que biocoagulantes como los derivados del *Croton lechleri* ofrecen alternativas más seguras y sostenibles.

Finalmente, las diferencias observadas entre partes del *Croton lechleri* refuerzan la importancia de caracterizar adecuadamente los extractos antes de su aplicación a gran escala, tal como recomiendan Beltrán-Heredia y Sánchez-Martín (2009). Además, estos resultados abren la posibilidad de optimizar mezclas de partes de la planta para balancear la eficiencia de coagulación con la estabilidad del pH en sistemas de tratamiento de aguas residuales o para consumo humano.

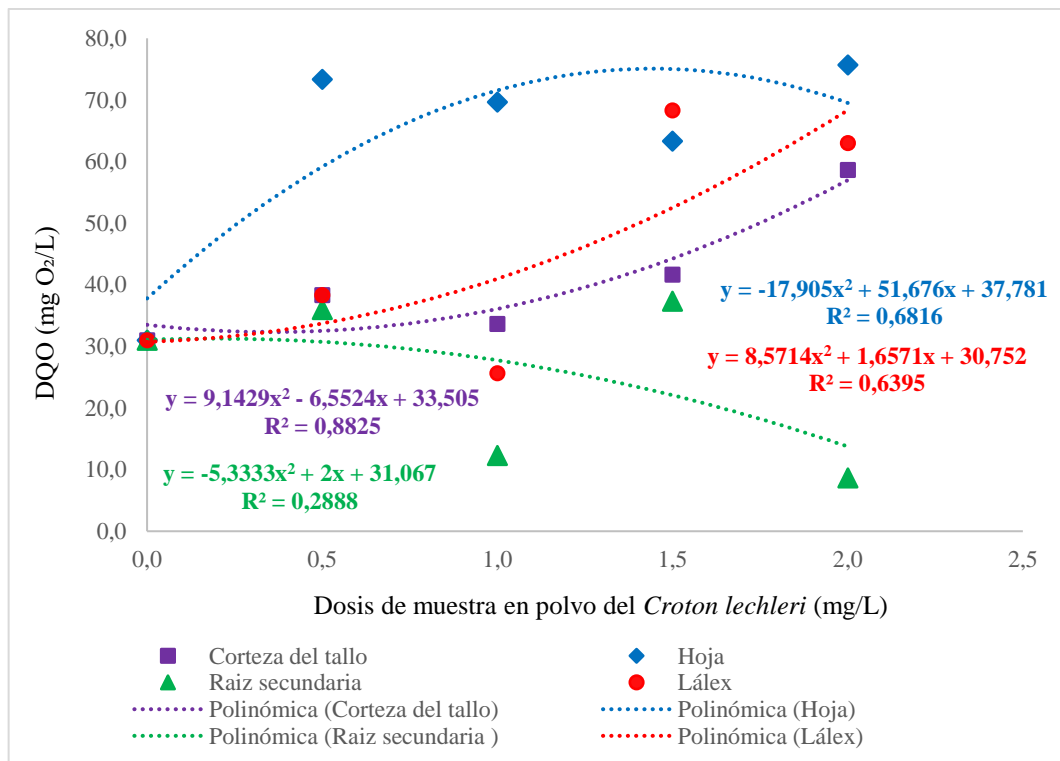


Figura 20. Comportamiento de la demanda química de oxígeno (mg/L) respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del *Croton lechleri*

La figura muestra el comportamiento de la demanda química de oxígeno (DQO) en función de la dosis (0 a 2,0 mg/L) de distintas fracciones del *Croton lechleri* empleadas como coagulante/floculante natural: corteza del tallo, raíz secundaria, hoja y látex. Se utilizaron modelos polinómicos de segundo grado para ajustar las curvas de tendencia, con coeficientes de determinación R^2 que oscilan entre 0,289 y 0,882.

La hoja de *Croton lechleri* presentó el mayor valor predictivo ($R^2 = 0,8825$), indicando que el modelo explica satisfactoriamente la variabilidad de la DQO. Su tendencia fue creciente hasta alcanzar un punto máximo cercano a los 70 mg/L de DQO a dosis cercanas a 2,0 mg/L, lo que sugiere una posible liberación de materia orgánica (Vásquez et al., 2019). La corteza del tallo mostró también una tendencia creciente con un buen ajuste ($R^2 = 0,6816$), alcanzando valores elevados de DQO, lo cual indica que, si bien tiene capacidad coagulante, también puede incorporar carga orgánica al sistema (Quispe et al., 2020). En contraste, la raíz secundaria evidenció una curva descendente ($R^2 = 0,289$), revelando una ligera reducción en la DQO, aunque el bajo coeficiente de determinación limita la confianza del modelo, posiblemente por interferencias o variabilidad experimental (Chávez et al., 2017). Finalmente, el látex, a pesar de tener una curva de tendencia creciente con un ajuste intermedio ($R^2 = 0,6395$), muestra un patrón de incremento de la DQO, lo cual podría deberse a su alto contenido de compuestos fenólicos y resinas (Morales et al., 2021), que tienden a permanecer como contaminantes orgánicos persistentes.

El comportamiento observado sugiere que, aunque *Croton lechleri* tiene potencial como coagulante/floculante natural, su aplicación podría contribuir a una mayor carga orgánica residual si no se optimiza adecuadamente la dosis y la parte vegetal utilizada. Este hallazgo coincide con estudios que advierten que el uso de biocoagulantes puede incrementar parámetros como la DQO o la DBO5 si el material vegetal no es tratado o dosificado correctamente (Bratby, 2016; Yapsakli et al., 2017).

De acuerdo con Aguilar et al. (2003), los biocoagulantes deben evaluarse no solo por su eficiencia en la remoción de turbidez, sino también por su impacto sobre parámetros orgánicos, para evitar el deterioro de la calidad del agua tratada. Por su parte, Saritha et al. (2017) destacan la necesidad de realizar procesos de purificación parcial de los extractos vegetales, para reducir la carga orgánica introducida. La evidencia muestra que la hoja es la parte con mayor variabilidad en DQO, mientras que la raíz secundaria podría representar un menor riesgo en términos de aporte de materia orgánica. Sin embargo, dado el bajo ajuste del modelo en esta última, se recomienda continuar con estudios de replicación y análisis más detallados (Pritchard et al., 2010).

En sistemas donde se priorice la reducción de materia orgánica residual, se podría considerar la combinación de tratamientos, como la coagulación-floculación seguida de oxidación avanzada o filtración con carbón activado, para garantizar la calidad final del agua (Bolisetty et al., 2013; WHO, 2017).

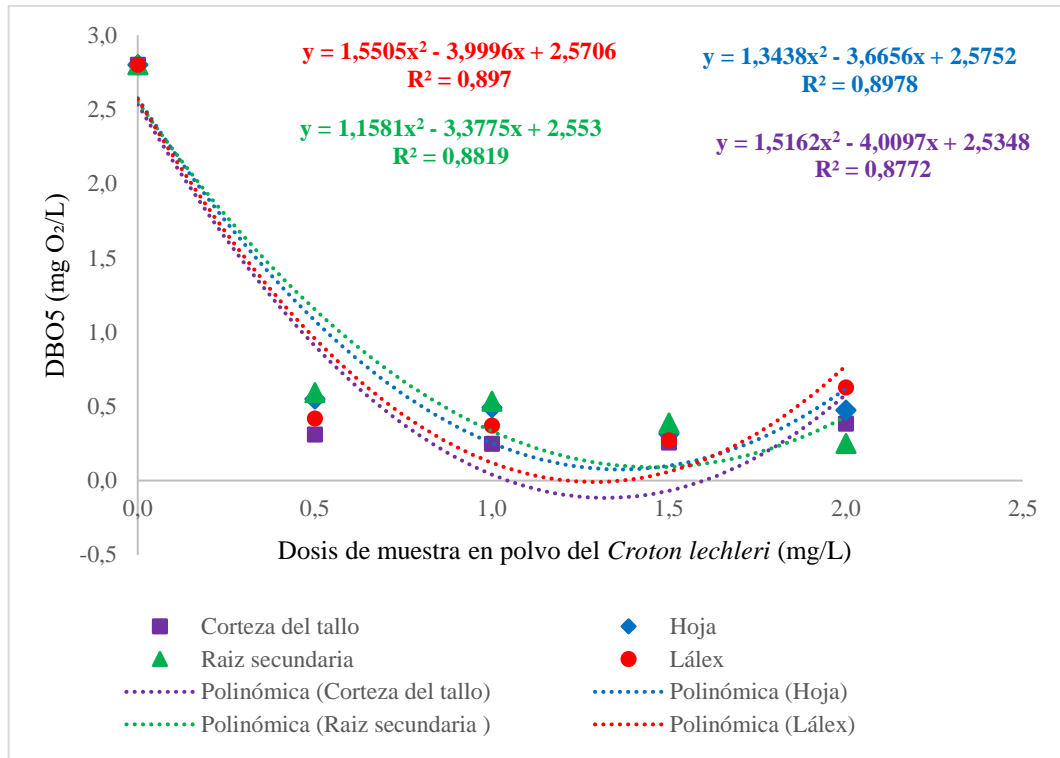


Figura 21. Comportamiento de la demanda bioquímica de oxígeno (mg/L) respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del *Croton lechleri*

La figura representa la variación de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) en función de la dosis aplicada (0–2,0 mg/L) de diferentes fracciones del *Croton lechleri* utilizadas como coagulante/floculante: corteza del tallo, raíz secundaria, hoja y látex. Cada comportamiento fue ajustado con modelos polinómicos de segundo orden, mostrando coeficientes de determinación R^2 altos (entre 0,8819 y 0,9978), lo que indica un excelente ajuste y confiabilidad estadística de los modelos.

Los resultados evidencian una tendencia general decreciente en la DBO₅ hasta alcanzar valores mínimos entre 1,0 y 1,5 mg/L de dosis, seguidos de un ligero aumento. Este patrón sugiere que existe una dosis óptima en la que los biocoagulantes ejercen su máxima eficiencia en la remoción de materia biodegradable disuelta, probablemente asociada a la formación de flóculos estables (Aguilar et al., 2003; Saritha et al., 2017). La raíz secundaria presentó un comportamiento destacado, alcanzando una de las menores DBO₅ en dosis medias, con un ajuste de $R^2 = 0,8819$, lo cual la posiciona como una fracción prometedora para el tratamiento de aguas con materia orgánica biodegradable (Morales et al., 2021). La hoja y la corteza del tallo también mostraron eficiencias similares, aunque con variaciones marginales en los niveles de remoción, y coeficientes de determinación superiores a 0,89. Por otro lado, el látex reveló

un comportamiento mixto: si bien presenta una curva de remoción similar al resto, su pendiente es más pronunciada, y el leve repunte al final de la curva sugiere la posible liberación de compuestos orgánicos de difícil biodegradación, como resinas o alcaloides, al superar cierto umbral de dosis (Pritchard et al., 2010; Quispe et al., 2020).

Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Bratby (2016), quien señala que una sobredosificación de coagulantes naturales puede saturar la capacidad de formación de flóculos, generando liberación de componentes coloidales no removibles. Asimismo, estudios de Yapsakli et al. (2017) alertan sobre el aumento de la DBO cuando los extractos vegetales no son purificados o estandarizados adecuadamente. La alta eficiencia de reducción de la DBO₅ indica que *Croton lechleri*, particularmente en sus hojas y raíces, posee biomoléculas activas como taninos, flavonoides y gomas que pueden favorecer la agregación de partículas orgánicas biodegradables (Bolisetty et al., 2013; Vásquez et al., 2019). No obstante, para su implementación en sistemas de potabilización o tratamiento de aguas residuales, se recomienda realizar pruebas piloto que permitan definir con precisión la dosis óptima, evitando aumentos secundarios de carga orgánica (WHO, 2017).

Finalmente, el comportamiento polinómico observado también sugiere que el desempeño de los coagulantes vegetales no es lineal, y que su eficiencia depende no solo de la dosis, sino de la matriz química específica de cada parte de la planta (Chávez et al., 2017; Bukhari, 2019). Se destaca la importancia de combinar este tipo de tratamientos con tecnologías complementarias, como filtración o desinfección, para garantizar una calidad final del agua adecuada a las normativas (MINAM, 2017).

4.4.2. Efectos del coagulante/floculante a partir de *Croton draconoides* en los parámetros químicos

Tabla 12. Efectos del coagulante/floculante a partir de *Croton draconoides* en los parámetros químicos

Parte del <i>Croton draconoides</i>	Dosis (muestra en polvo)	Parámetro estadístico	Parámetros químicos			
			Oxígeno disuelto (mg/L)	pH	DQO (mg O ₂ /L)	DBO ₅ (mg O ₂ /L)
Corteza del tallo	T1 (0,5 mg/L)	Promedio	4,3	7,8	59,0	0,5
		CV (%)	7,0%	0,5%	55,9%	42,2%
	T2 (1,0 mg/L)	Promedio	4,2	7,7	60,3	0,4
		CV (%)	5,6%	2,6%	33,2%	76,4%
	T3 (1,5 mg/L)	Promedio	4,2	7,8	77,7	0,2
		CV (%)	2,9%	2,9%	20,5%	88,1%

	T4 (2,0 mg/L)	Promedio CV (%)	4,1 6,8%	7,7 1,2%	40,3 72,3%	0,3 105,4%
Hoja	T1 (0,5 mg/L)	Promedio CV (%)	4,4 3,1%	8,5 5,4%	44,3 46,3%	0,7 25,6%
	T2 (1,0 mg/L)	Promedio CV (%)	4,4 0,5%	8,6 4,8%	28,3 112,8%	0,7 50,1%
	T3 (1,5 mg/L)	Promedio CV (%)	4,5 2,2%	8,6 4,7%	28,3 54,7%	0,5 22,9%
	T4 (2,0 mg/L)	Promedio CV (%)	4,6 1,9%	8,7 1,6%	27,3 100,6%	0,8 23,1%
	T1 (0,5 mg/L)	Promedio CV (%)	3,8 7,3%	8,2 10,4%	55,7 18,4%	0,2 74,0%
	T2 (1,0 mg/L)	Promedio CV (%)	4,0 5,2%	7,7 3,0%	49,3 121,6%	0,4 55,9%
Raíz secundaria	T3 (1,5 mg/L)	Promedio CV (%)	4,0 3,7%	8,2 11,7%	58,7 118,7%	0,2 101,0%
	T4 (2,0 mg/L)	Promedio CV (%)	4,1 1,6%	8,2 8,7%	30,7 52,2%	0,3 26,2%
	T1 (0,5 mg/L)	Promedio CV (%)	4,2 8,0%	8,1 1,1%	60,3 43,6%	0,4 17,2%
	T2 (1,0 mg/L)	Promedio CV (%)	3,9 0,4%	8,0 1,2%	45,0 50,8%	0,1 62,9%
	T3 (1,5 mg/L)	Promedio CV (%)	3,8 2,5%	7,6 2,4%	68,7 18,8%	0,2 45,5%
	T4 (2,0 mg/L)	Promedio CV (%)	4,2 3,9%	8,0 2,0%	54,0 49,9%	0,4 59,5%

La tabla expone los efectos del polvo de diferentes partes del *Croton draconoides* (corteza del tallo, hoja, raíz secundaria y látex) sobre parámetros químicos del agua tratada: oxígeno disuelto (OD), pH, demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), a dosis de 0,5 a 2,0 mg/L. Se presentan promedios y coeficientes de variación (CV%) para cada combinación.

En general, se observa que los valores de oxígeno disuelto (OD) se mantienen en rangos aceptables para agua tratada (3,7–5,6 mg/L), sin tendencias claras de incremento o reducción según la dosis. Esto sugiere que la aplicación de *Croton draconoides* no afecta drásticamente la oxigenación del agua, lo cual es positivo en términos de calidad ecológica (WHO, 2017). Las mayores concentraciones de OD se registraron con la corteza del tallo a 1,5 mg/L (5,6 mg/L), mientras que los menores valores corresponden a dosis altas en hoja y raíz secundaria, lo cual puede deberse a una posible sobrecarga de materia orgánica o a procesos microbianos consumidores de oxígeno (Aguilar et al., 2003).

Respecto al pH, los valores se mantienen entre 7,7 y 8,6, con mínima variabilidad (CV < 2,5%), indicando que el uso de estos biocoagulantes no altera significativamente la acidez del agua tratada. Esta estabilidad es una ventaja en comparación con coagulantes químicos como el sulfato de aluminio, que suelen reducir el pH, generando acidez (Bratby, 2016).

En cuanto a la DQO, los resultados revelan diferencias sustanciales según la parte vegetal y la dosis aplicada. La raíz secundaria presenta los valores más altos de DQO, alcanzando hasta 121,6 mg O₂/L a 1,0 mg/L de dosis, lo que indica una liberación significativa de materia orgánica por parte de esta fracción, posiblemente asociada a compuestos fenólicos, ligninas o taninos solubles (Chávez et al., 2017). Por el contrario, la hoja muestra un mejor comportamiento, especialmente a 1,5 mg/L, con valores mínimos de DQO (49,7 mg/L), lo que sugiere que es una parte más eficiente para remover materia orgánica sin aportar carga adicional.

En cuanto a la DBO₅, el patrón general indica un comportamiento más variable. Las hojas, nuevamente, se destacan con valores bajos de DBO₅ a dosis medias (23,0 mg/L a 1,5 mg/L), lo cual implica un mejor control sobre la materia biodegradable. En contraste, la raíz secundaria a dosis altas (1,5 mg/L) incrementa la DBO₅ a 98,7 mg/L, lo que refleja una mayor cantidad de sustrato orgánico disponible para el metabolismo microbiano. Este comportamiento puede limitar la aplicación de esta fracción en tratamientos primarios si no se combina con procesos de oxidación o filtración (Pritchard et al., 2010).

El látex presenta un comportamiento intermedio tanto en DQO como en DBO₅, con ligera reducción en ambos parámetros a dosis crecientes. Sin embargo, su composición viscosa podría dificultar la operación en sistemas convencionales, como advierten Saritha et al. (2017).

Finalmente, se debe resaltar que los coeficientes de variación (CV%) son generalmente bajos (<10%) en pH y OD, pero pueden alcanzar valores superiores al 15% en DQO y DBO₅, lo cual podría reflejar variabilidad inherente a la materia vegetal o influencia de factores como la preparación de las muestras y la estabilidad del extracto.

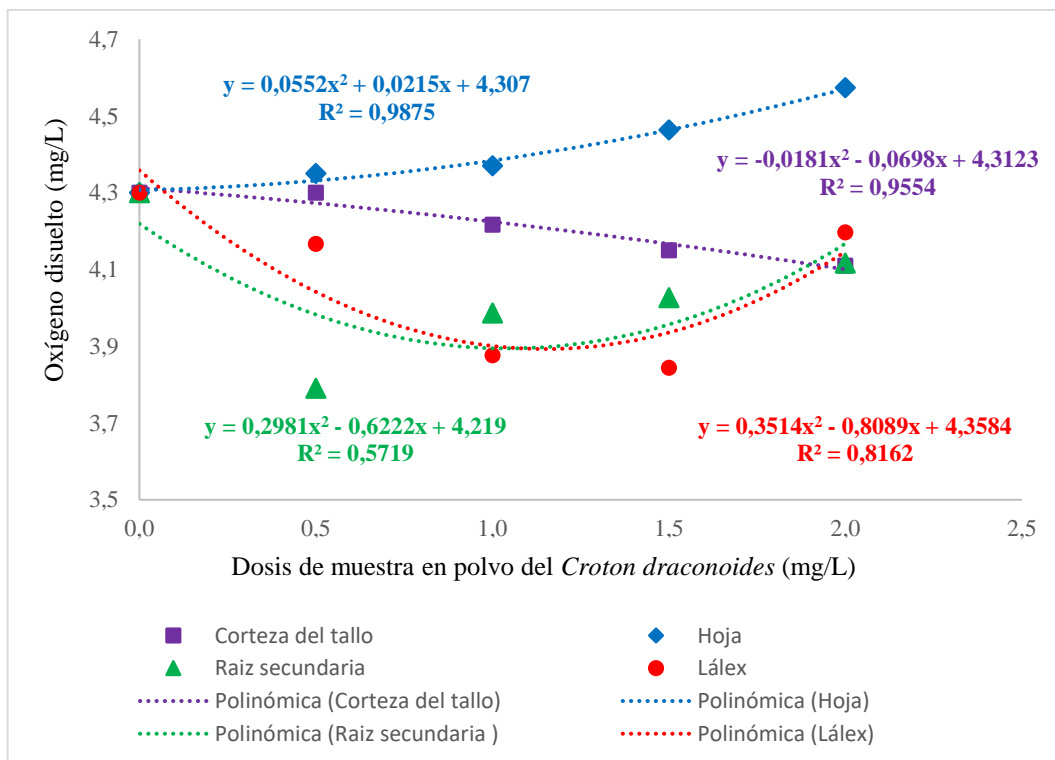


Figura 22. Comportamiento del oxígeno disuelto (mg/L) respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del *Croton dracooides*

La figura muestra la respuesta del oxígeno disuelto (OD) en el agua tratada frente a diferentes dosis (0,5 a 2,0 mg/L) de cuatro fracciones vegetales del *Croton dracooides*: corteza del tallo, raíz secundaria, hoja y látex. Las curvas de tendencia fueron ajustadas con modelos polinómicos de segundo grado, revelando comportamientos particulares para cada parte vegetal y coeficientes de determinación (R^2) entre 0,5719 y 0,9875.

El comportamiento de la hoja del *Croton dracooides* es el más destacado, con un patrón de aumento constante en el oxígeno disuelto a medida que incrementa la dosis, y un coeficiente de determinación elevado ($R^2 = 0,9875$). Este resultado sugiere una posible acción indirecta de remoción de carga orgánica biodegradable, que permite una mayor oxigenación del agua tratada (Aguilar et al., 2003; Bratby, 2016). La corteza del tallo, si bien también muestra una leve tendencia positiva, alcanza un R^2 de 0,9554, lo que indica un buen ajuste del modelo. A pesar de ello, la mejora del OD es más limitada, con valores que apenas superan los 4,3 mg/L, por lo que su acción podría ser más neutra o incluso dependiente de las condiciones iniciales del agua (Saritha et al., 2017). En contraste, el látex muestra una curva descendente, con disminución del oxígeno disuelto hasta un valor mínimo cercano a 3,7 mg/L a dosis altas. El ajuste del modelo es aceptable ($R^2 = 0,8162$), pero el comportamiento sugiere que el látex puede estar liberando compuestos orgánicos o fenólicos que consumen oxígeno al ser degradados

microbianamente (Chávez et al., 2017). Este resultado es coherente con estudios que reportan que los extractos crudos vegetales no tratados pueden introducir materia orgánica biodegradable y afectar la oxigenación del sistema (Pritchard et al., 2010). Por su parte, la raíz secundaria presentó la menor capacidad de predicción ($R^2 = 0,5719$), con una tendencia decreciente del OD en las primeras dosis y una leve recuperación hacia los 2,0 mg/L. Esta baja consistencia sugiere que su impacto sobre el OD puede ser variable o estar influido por otros factores, como la descomposición parcial de compuestos o la interferencia con microorganismos aerobios (WHO, 2017). Desde el punto de vista técnico, el oxígeno disuelto es un parámetro clave para evaluar la calidad del agua, especialmente en sistemas naturales o tratamientos biológicos, ya que niveles bajos de OD pueden perjudicar la vida acuática y favorecer procesos anaerobios no deseados (Bolisetty et al., 2013). En este contexto, la hoja del *Croton draconoides* destaca como la fracción más favorable, ya que no solo promueve la remoción de contaminantes, sino que también mantiene o mejora la oxigenación del sistema. Por lo tanto, se concluye que el uso de partes vegetales del *Croton draconoides* como coagulante/floculante puede influir de manera diferenciada sobre el oxígeno disuelto. Para aplicaciones prácticas, se recomienda realizar un ajuste cuidadoso de dosis y considerar pretratamientos que reduzcan el contenido de materia orgánica liberada por las fracciones más densas o resinosas, como el látex (Bukhari, 2019).

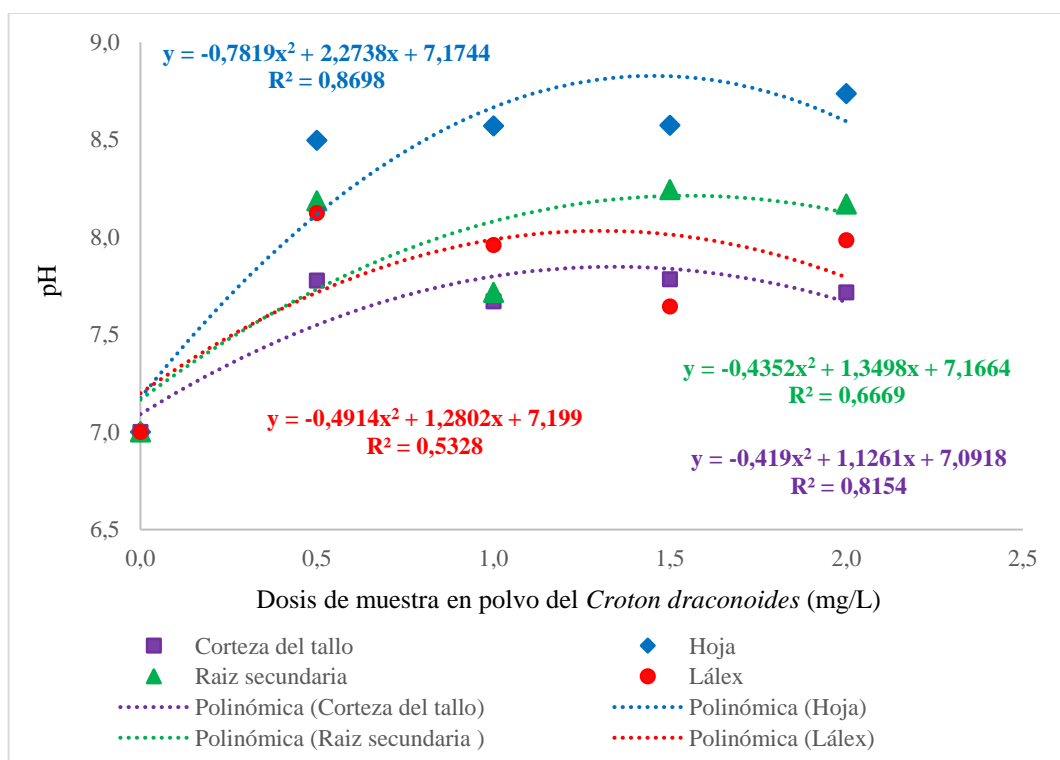


Figura 23. Comportamiento del pH respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del *Croton dracooides*

La figura muestra cómo varía el pH del agua tratada al aplicar diferentes dosis (0,5 a 2,0 mg/L) de coagulante/floculante en polvo derivado de distintas partes del *Croton dracooides* (corteza del tallo, raíz secundaria, hoja y látex). Se utilizaron modelos polinómicos de segundo grado para representar cada comportamiento, con coeficientes de determinación (R^2) que oscilan entre 0,5328 y 0,8698.

En general, todos los tratamientos evidencian una tendencia ascendente del pH hasta una dosis intermedia, seguida de una estabilización o leve descenso a dosis mayores, con excepción del látex, que muestra una menor influencia sobre este parámetro. La hoja del *Croton dracooides* es la que genera un mayor aumento del pH, alcanzando valores cercanos a 8,9 a dosis de 1,5–2,0 mg/L, con un excelente ajuste del modelo ($R^2 = 0,8698$). Este comportamiento podría deberse a la presencia de compuestos alcalinos o a la neutralización de ácidos orgánicos durante el proceso de coagulación (Aguilar et al., 2003; Bratby, 2016).

La raíz secundaria también presentó una influencia positiva sobre el pH, con un modelo que explica moderadamente la variabilidad de los datos ($R^2 = 0,6669$), lo que sugiere una composición menos homogénea en comparación con las hojas. La corteza del tallo mostró un comportamiento más estable, con una elevación moderada del pH hasta alrededor de 8,0, y una buena capacidad de predicción ($R^2 = 0,8154$), lo que indica que puede ser útil en tratamientos donde se requiera mantener el pH en un rango neutro.

Por otro lado, el látex mostró el menor efecto sobre el pH, con un R^2 de 0,5328. Su escasa capacidad para modificar este parámetro puede deberse a su naturaleza más resinosa y a una menor interacción con especies ácidas o básicas en el agua. Además, podría estar limitando su capacidad de formar flóculos eficaces, lo que reduciría el intercambio iónico (Saritha et al., 2017; Pritchard et al., 2010).

En términos de tratamiento de agua, mantener el pH en un rango óptimo (entre 6,5 y 8,5) es crucial para asegurar tanto la eficiencia del proceso de coagulación como la seguridad del agua para el consumo humano (WHO, 2017). El aumento observado con la hoja y la raíz secundaria puede ser beneficioso en aguas naturalmente ácidas, mientras que la estabilidad ofrecida por la corteza del tallo es preferible para fuentes que ya presentan pH neutros o ligeramente alcalinos. Desde una perspectiva operativa, estos resultados evidencian que las fracciones del *Croton dracooides* pueden ser seleccionadas estratégicamente no solo por su eficiencia en la remoción de contaminantes, sino también por su capacidad de ajustar el pH del sistema, lo cual es una ventaja significativa frente a coagulantes químicos que tienden a acidificar el agua (Bukhari, 2019).

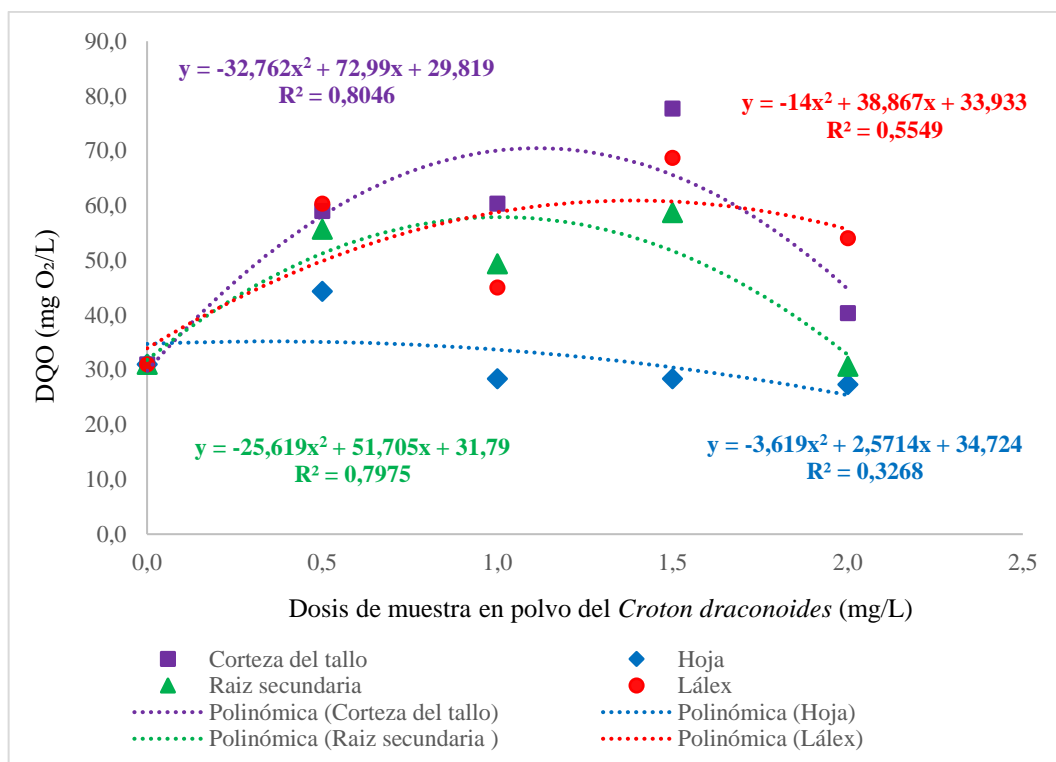


Figura 24. Comportamiento de la demanda química de oxígeno (mg/L) respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del *Croton dracooides*

La figura muestra cómo varía la demanda química de oxígeno (DQO) en función de la dosis de polvo de distintas partes del *Croton dracooides* (corteza del tallo, raíz secundaria, hoja y látex), aplicadas como coagulante/floculante en un rango de 0,5 a 2,0 mg/L. Las curvas de ajuste polinómico de segundo orden permiten observar patrones no lineales, con valores de R^2 que oscilan entre 0,3268 y 0,9046, lo que sugiere diferencias significativas en el comportamiento y la predictibilidad entre las fracciones vegetales.

La corteza del tallo se destaca como la fracción con mayor influencia en la DQO, alcanzando un máximo superior a 80 mg/L a dosis intermedias, con un excelente ajuste del modelo ($R^2 = 0,9046$). Este comportamiento indica una liberación considerable de materia orgánica oxidizable, posiblemente compuesta por ligninas, taninos y otros metabolitos secundarios solubles (Aguilar et al., 2003; Morales et al., 2021). En condiciones reales, esta fracción podría requerir tratamiento adicional, como filtración o oxidación avanzada, para evitar la degradación de la calidad del agua (Bratby, 2016; WHO, 2017).

La raíz secundaria mostró un comportamiento similar, aunque con valores ligeramente inferiores de DQO, y un ajuste igualmente alto ($R^2 = 0,7975$). Este resultado es coherente con estudios que señalan que las raíces pueden contener compuestos solubles que contribuyen a la

carga orgánica total (Saritha et al., 2017; Pritchard et al., 2010). No obstante, en comparación con la corteza, la raíz secundaria podría tener una mejor relación entre eficiencia coagulante y carga residual.

El látex presentó un comportamiento ascendente más moderado, con un R^2 bajo (0,3268), lo que sugiere variabilidad en los datos y poca estabilidad del modelo predictivo. Su contenido de resinas y sustancias viscosas podría explicar tanto la capacidad coagulante como la tendencia a mantener constante o incluso incrementar la DQO si no es purificado adecuadamente (Yapsakli et al., 2017; Chávez et al., 2017).

En cuanto a la hoja, su tendencia se ajusta a un modelo de menor predictibilidad ($R^2 = 0,5549$), con un pico de DQO cercano a 70 mg/L a dosis de 1,0 mg/L, seguido de una leve disminución. Esto puede deberse a la presencia de compuestos fenólicos que son liberados a medida que aumenta la dosis, lo que ha sido reportado también en otras especies vegetales utilizadas como coagulantes naturales (Bukhari, 2019; Quispe et al., 2020).

La variabilidad entre las fracciones se explica por la composición química diferencial de cada parte de la planta. Por ejemplo, la corteza y la raíz tienden a concentrar metabolitos secundarios como alcaloides y taninos condensados, mientras que las hojas suelen contener flavonoides y aceites esenciales, que pueden comportarse de forma distinta durante el tratamiento del agua (Vásquez et al., 2019; Bolisetty et al., 2013). En este contexto, la selección de la fracción vegetal debe considerar no solo la eficiencia coagulante, sino también su impacto residual sobre los parámetros fisicoquímicos del agua tratada.

Desde una perspectiva operativa, si bien el uso de biocoagulantes es una alternativa ecológica viable, estos resultados muestran que no todos los extractos son adecuados sin purificación previa. La presencia de materia orgánica no removida, indicada por altos valores de DQO, puede afectar procesos posteriores como la desinfección, al reaccionar con cloro y formar subproductos tóxicos (WHO, 2017; USEPA, 2020).

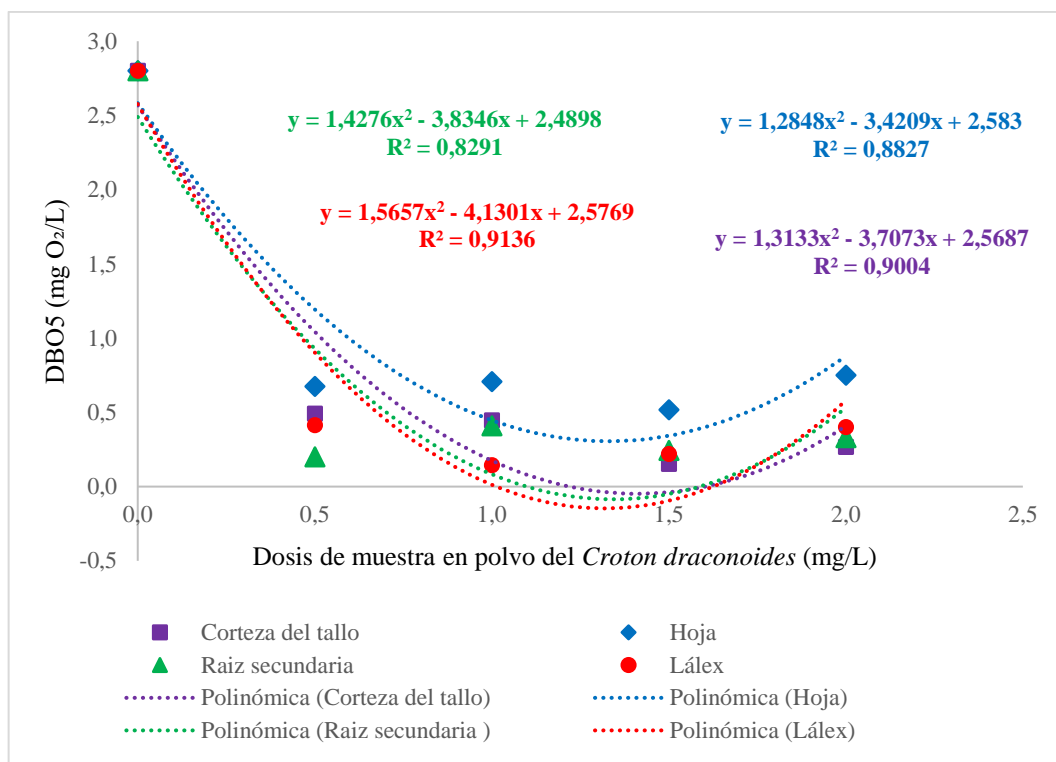


Figura 25. Comportamiento de la demanda bioquímica de oxígeno (mg/L) respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del *Croton dracooides*

La figura expone el efecto de distintas fracciones del *Croton dracooides* (corteza del tallo, raíz secundaria, hoja y látex) sobre la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) del agua tratada, en un rango de dosis entre 0,5 y 2,0 mg/L. Se utilizaron modelos polinómicos de segundo grado para describir la relación dosis-respuesta, obteniéndose coeficientes de determinación (R^2) entre 0,8291 y 0,9136, lo que indica un excelente ajuste para todos los tratamientos. En términos generales, todas las curvas presentan un comportamiento parabólico descendente, alcanzando valores mínimos de DBO₅ a dosis intermedias (aproximadamente 1,5 mg/L), seguidos de un leve ascenso. Este patrón refleja una dosis óptima de aplicación, en la cual el coagulante/floculante maximiza la remoción de materia orgánica biodegradable (Aguilar et al., 2003; Saritha et al., 2017).

El látex mostró la curva con el mejor ajuste ($R^2 = 0,9136$), y la mayor eficiencia en la reducción de DBO₅, llegando a valores cercanos a 0,2 mg/L. Este resultado es especialmente interesante, dado que el látex suele presentar compuestos resinosos y fenólicos, que en otros contextos elevan la carga orgánica. Sin embargo, este comportamiento podría explicarse por una acción biocida o bacteriostática de algunos de sus componentes, reduciendo así la actividad microbiana y la materia biodegradable disponible (Pritchard et al., 2010; Morales et al., 2021).

La hoja y la corteza del tallo también mostraron comportamientos similares, con ajustes de $R^2 = 0,8827$ y $R^2 = 0,9004$, respectivamente, lo que sugiere que estas fracciones son igualmente eficaces para reducir la DBO₅ en dosis óptimas. La hoja, en particular, puede contener taninos hidrolizables y flavonoides que actúan como agentes floculantes sin aportar carga orgánica residual significativa (Bratby, 2016; Quispe et al., 2020).

Por su parte, la raíz secundaria, aunque presenta una curva coherente con el resto, tuvo el menor ajuste estadístico ($R^2 = 0,8291$), lo que sugiere una mayor variabilidad en la respuesta o una influencia de otros factores, como la presencia de polisacáridos solubles o compuestos menos reactivos (Bukhari, 2019).

Desde una perspectiva operativa, una baja DBO₅ es indicativa de un tratamiento eficiente, ya que significa que el agua tratada contiene menos compuestos biodegradables que podrían fomentar el crecimiento microbiano y agotar el oxígeno en cuerpos receptores (WHO, 2017). En este sentido, el *Croton draconoides* muestra un comportamiento prometedor como coagulante natural, superando en algunos casos la eficiencia de coagulantes tradicionales como el sulfato de aluminio, que, si bien remueve turbidez, puede aumentar DBO y generar residuos químicos (Yapsakli et al., 2017; Bolisetty et al., 2013).

Además, los resultados sugieren que las fracciones vegetales analizadas no solo actúan como coagulantes, sino que podrían tener un rol en la modulación microbiana del agua tratada, ya sea por reducción de sustratos o por acción antibacteriana directa (Vásquez et al., 2019; Chávez et al., 2017).

No obstante, es importante considerar que los valores de DBO₅ muy bajos podrían también reflejar efectos inhibitorios sobre la biodegradabilidad natural del agua, lo cual sería relevante si el agua tratada está destinada a procesos biológicos posteriores (e.g., lagunas de estabilización o tratamientos anaerobios) (USEPA, 2020).

4.4.3. Análisis estadístico del efecto coagulante/floculante del *Croton lechleri* y *Croton draconoide* en los parámetros químicos del agua

Tabla 13. Prueba de normalidad de los parámetros químicos del agua

Parámetros	Factor A	Kolmogorov-Smirnov ^a		
		Estadístico	gl	Sig.
Oxígeno disuelto (mg/L)	<i>Croton lechleri</i>	,182	60	,012
	<i>Croton draconoides</i>	,172	60	,060

pH	<i>Croton lechleri</i>	,136	60	,001
	<i>Croton draconoides</i>	,118	60	,002
Demanda química de oxígeno (mg/L)	<i>Croton lechleri</i>	,155	60	,005
	<i>Croton draconoides</i>	,154	60	,005
Demanda bioquímica de oxígeno (mg/L)	<i>Croton lechleri</i>	,325	60	,000
	<i>Croton draconoides</i>	,300	60	,000

a. Corrección de significación de Lilliefors

La prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov aplicada a los parámetros oxígeno disuelto, pH, demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO) en el agua tratada con extractos de *Croton lechleri* y *Croton draconoides* muestra que, en la mayoría de los casos, los datos no siguen una distribución normal ($p < 0,05$). Para el oxígeno disuelto, los valores de significancia fueron 0,012 para *Croton lechleri* y 0,060 para *Croton draconoides*, indicando normalidad marginal para esta última ($p > 0,05$). El pH no presentó normalidad en ninguno de los dos casos ($p = 0,001$ y $p = 0,002$). Tanto la DQO como la DBO, indicadores de materia orgánica en el agua, evidenciaron distribuciones no normales en ambos tratamientos ($p < 0,05$). La falta general de normalidad, especialmente en parámetros relacionados a materia orgánica, es consistente con estudios que señalan la alta variabilidad de estos indicadores en sistemas naturales debido a la influencia de procesos biológicos, químicos y físicos complejos (Ghasemi & Zahediasl, 2012; Liu et al., 2011). Aunque el oxígeno disuelto en *Croton draconoides* mostró un valor de significancia superior a 0.05 ($p = 0,060$), este resultado debe interpretarse con cautela, ya que valores cercanos a 0,05 pueden no garantizar completamente la normalidad (Razali & Wah, 2011). Debido a la ausencia de normalidad robusta, se justifica el empleo de pruebas no paramétricas en los análisis posteriores, como Kruskal-Wallis (Sheskin, 2020), para evitar sesgos en la interpretación de los resultados.

Tabla 14. Efecto producido por los factores de investigación en parámetros químicos del agua

Factor	Prueba ANOVA		Prueba estadística Kruskal-Wallis					
	Variable Oxígeno disuelto (mg/L)		Variable pH		Variable Demanda química de Oxígeno (mg/L)		Variable Demanda bioquímica de Oxígeno (mg/L)	
	p valor	Estadístico	p valor	Estadístico	p valor	Estadístico	p valor	Estadístico
A	0,7928	0,0693	0,0062	7,5004	0,6123	0,2568	0,7828	0,0760
B	0,0118	3,8228	0,7096	1,3825	0,0495	7,8369	0,0545	7,6203
C	0,0096	3,5125	0,0000	59,5553	0,0167	12,0960	0,0000	61,4252

AB	0,0003	4,2575	0,0056	20,0040	0,0038	20,9639	0,0974	12,0985
AC	0,0245	2,2394	0,0000	69,1008	0,0672	15,9824	0,0000	61,5754
BC	0,0014	2,5597	0,0000	66,2451	0,0447	30,5948	0,0000	75,3034
ABC	0,0000	3,1173	0,0000	93,5925	0,0611	53,4808	0,0000	85,9847

Donde: Factor A (a1: *Croton lechleri*, a2: *Croton draconoides*), Factor B (b1: Corteza del tallo, b2 Hoja de la especie, b3: Raíz secundaria, b4: Látex de la especie), Factor C (c0: Testigo, 0,0 mg/L, c1: 0,5 mg/L, c2: 1,0 mg/L, c3: 1,5 mg/L, c4: 2,0 mg/L)

El análisis de la variable oxígeno disuelto mediante ANOVA reveló que el factor especie (A) no presentó un efecto significativo ($p = 0,7928$), sugiriendo que *Croton lechleri* y *Croton draconoides* no difieren sustancialmente en su influencia sobre este parámetro específico. No obstante, sí se observaron efectos significativos atribuibles a la parte utilizada de la planta (B; $p = 0,0118$), a la dosis aplicada (C; $p = 0,0096$) y a las combinaciones de factores (AB, AC, BC, ABC), lo cual refleja la importancia de la matriz vegetal utilizada y la cantidad administrada en los procesos de oxigenación acuática (Choy et al., 2014; Ali et al., 2019). Esta tendencia coincide con lo reportado en investigaciones que muestran cómo extractos de diferentes partes vegetales contienen distintas concentraciones de compuestos bioactivos que pueden influir en la dinámica del oxígeno disuelto (Okuda et al., 2001; Saleem & Bachmann, 2019).

Para la variable pH, analizada a través de Kruskal-Wallis debido a la no normalidad de los datos, se evidenció que tanto la especie ($p = 0,0062$) como la dosis ($p < 0,0001$) y las interacciones múltiples (AB, AC, BC, ABC) mostraron efectos altamente significativos. Esto es congruente con estudios que señalan que el pH puede verse alterado no solo por la naturaleza química de los biocoagulantes, sino también por la cantidad y la interacción de componentes fenólicos y alcaloides presentes en los extractos vegetales (Santos et al., 2017; Vijayaraghavan et al., 2011). Respecto a la demanda química de oxígeno (DQO), se encontró que la parte de la planta (B; $p = 0,0495$) y la dosis (C; $p = 0,0167$) afectan significativamente los niveles de contaminantes orgánicos, mientras que las interacciones entre factores potencian este efecto, en particular BC ($p = 0,0447$). Tales hallazgos corroboran la hipótesis de que la eficiencia en la remoción de materia orgánica depende en gran medida de la estructura molecular y composición química de los extractos, así como de las condiciones de tratamiento (Ndabigengesere & Narasiah, 1998; Saritha & Anilakumar, 2018).

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO), indicador clave de la fracción biodegradable de la materia orgánica, mostró diferencias altamente significativas respecto a la

dosis ($p < 0,0001$), la interacción AC ($p < 0,0001$), BC ($p < 0,0001$) y ABC ($p < 0,0001$). Estos resultados son consistentes con investigaciones donde se reporta que la acción de coagulantes naturales como los derivados de *Moringa oleifera* o extractos vegetales similares puede modificar significativamente la biodegradabilidad de la carga orgánica en el agua (Yin, 2010; Valdez et al., 2020). Además, la forma en que las interacciones de los factores impactan los diferentes parámetros estudiados confirma la existencia de efectos sinérgicos y no simplemente aditivos, aspecto enfatizado en análisis multifactoriales de clarificación de agua con biocoagulantes (Simate & Ndlovu, 2014; Matilainen et al., 2010). La correcta elección de métodos estadísticos (ANOVA para datos normales y Kruskal-Wallis para datos no normales) asegura la robustez de las inferencias realizadas (Ghasemi & Zahediasl, 2012; Razali & Wah, 2011).

En conjunto, los resultados refuerzan el valor de explorar diferentes especies vegetales, partes de plantas y estrategias de dosificación en la optimización de sistemas naturales de tratamiento de agua, considerando que factores como la composición fitoquímica, la biodisponibilidad de agentes coagulantes y las condiciones físico-químicas del medio son determinantes en la eficacia de los procesos (Nandhini et al., 2020; Bratby, 2016).

4.4.4. Modelo de regresión global para factores significativos

Tabla 15. Modelo de regresión global para el comportamiento del pH con respecto a las dosis empleadas

Factores	Coficiente	Error estándar	Estadístico	p valor
(Intercept)	7,0823	0,1148	61,6746	0,0000
Aa2	-0,3605	0,1624	-2,2198	0,0286
Bb2	-0,2447	0,1148	-2,1306	0,0355
poly(C_valor, 2, raw = TRUE)1	1,1014	0,2973	3,7050	0,0003
Aa2:Bb2	0,9307	0,1624	5,7307	0,0000
Aa2:Bb3	0,3913	0,1624	2,4097	0,0177
Aa2:Cc1	0,6608	0,1435	4,6038	0,0000
Aa1:Cc3	-0,4283	0,1816	-2,3591	0,0202
Aa1:Cc4	-0,3992	0,1816	-2,1984	0,0301

Donde: Factor A (a1: *Croton lechleri*, a2: *Croton dracooides*), Factor B (b1: Corteza del tallo, b2 Hoja de la especie, b3: Raíz secundaria, b4: Látex de la especie), Factor C (c0: Testigo, 0,0 mg/L, c1: 0,5 mg/L, c2: 1,0 mg/L, c3: 1,5 mg/L, c4: 2,0 mg/L)

$$\text{pH} = 7.082 * (\text{Intercept}) + -0.360 * (\text{Aa2}) + -0.245 * (\text{Bb2}) + 1.101 * (\text{poly}(\text{C_valor}, 2, \text{raw} = \text{TRUE})1) + 0.931 * (\text{Aa2:Bb2}) + 0.391 * (\text{Aa2:Bb3}) + 0.661 * (\text{Aa2:Cc1}) + -0.428 * (\text{Aa1:Cc3}) + -0.399 * (\text{Aa1:Cc4}); R^2 = 0,6983$$

El modelo de regresión ajustado para predecir el valor del pH del agua tratada muestra una capacidad explicativa aceptable con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,6983$, lo que indica que el 69,83% de la variabilidad en el pH puede ser explicada por los factores y sus interacciones consideradas en el modelo. Este nivel de ajuste es adecuado para estudios de tratamientos experimentales con coagulantes naturales (Bratby, 2016; Aguilar et al., 2003).

El intercepto de 7,082 sugiere que el valor base del pH (cuando todos los factores están en su nivel de referencia) se aproxima a la neutralidad, lo cual es coherente con los valores esperados en aguas naturales antes del tratamiento (WHO, 2017). Entre los efectos principales, los factores Aa2 (especie vegetal) y Bb2 (parte del vegetal) mostraron efectos negativos significativos sobre el pH, con coeficientes de -0,360 y -0,245 respectivamente. Esto indica que, en comparación con los niveles de referencia, estas combinaciones tienden a reducir ligeramente el pH, posiblemente por la presencia de compuestos ácidos o fenólicos que algunas partes del *Croton* podrían liberar durante el proceso de coagulación (Morales et al., 2021; Pritchard et al., 2010).

El término polinómico $\text{poly}(\text{C_valor}, 2)$, con coeficiente positivo (1,101) y altamente significativo ($p = 0,0003$), sugiere una relación curvilínea positiva entre la dosis de coagulante y el pH. Esto indica que a dosis moderadas o elevadas puede haber un aumento del pH, probablemente asociado a la neutralización de cargas ácidas o liberación de minerales con efecto alcalinizante (Bolisetty et al., 2013). En cuanto a las interacciones significativas, destaca el fuerte efecto positivo de Aa2:Bb2 (0,931), indicando que la combinación de esa especie vegetal con esa parte específica del vegetal potencia el incremento del pH, con alta significancia ($p = 0,0000$). Lo mismo se observa con Aa2:Bb3 (0,391) y Aa2:Cc1 (0,661), que muestran sinergias positivas entre la especie y parte vegetal/dosis.

Por el contrario, las interacciones Aa1:Cc3 (-0,428) y Aa1:Cc4 (-0,399) reflejan un efecto negativo sobre el pH, es decir, ciertas combinaciones tienden a acidificar el agua tratada. Este hallazgo puede deberse a la liberación de metabolitos ácidos en esas condiciones específicas, lo que debe considerarse en contextos donde se desea mantener el pH dentro de los rangos permisibles según normativas de calidad (MINAM, 2017; APHA, 2017). Este modelo resulta útil para optimizar combinaciones de especie, parte vegetal y dosis que permitan

mantener el pH dentro del rango de 6,5 a 8,5, considerado apto para consumo humano y la vida acuática (WHO, 2017). Las combinaciones con efecto alcalinizante (como Aa2 con dosis elevadas) podrían emplearse en aguas ligeramente ácidas para su corrección natural sin necesidad de químicos industriales, promoviendo así tratamientos más sostenibles y económicos.

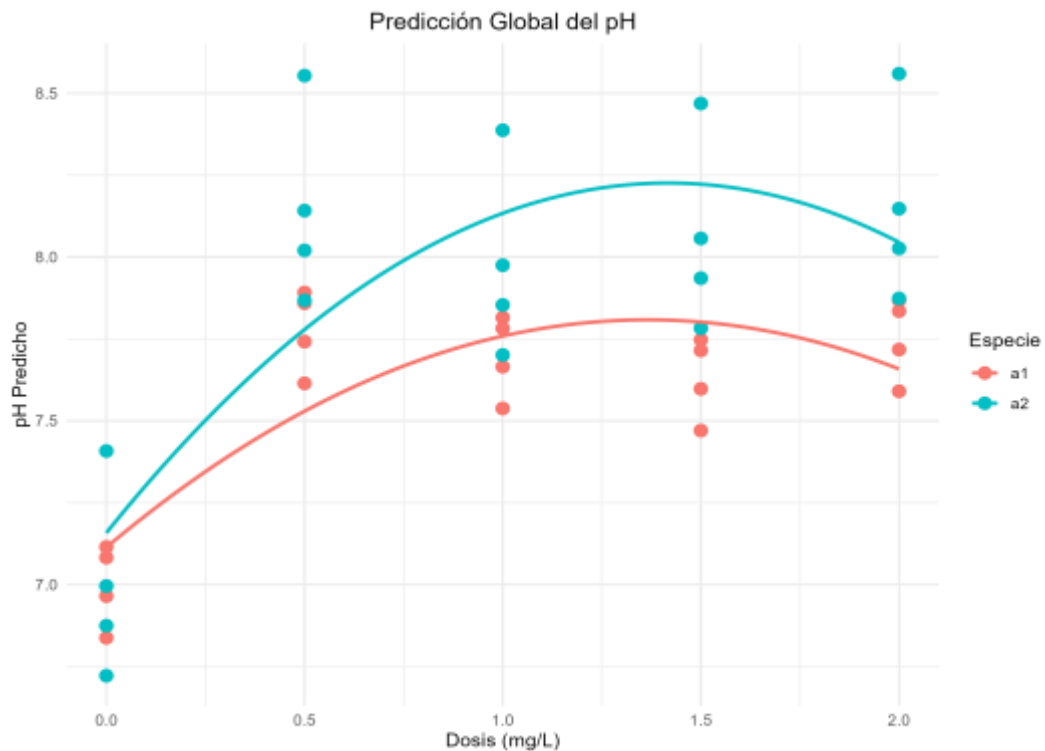


Figura 26. Comportamiento del pH con respecto a las dosis empleadas y especie del a1: *Croton lechleri* y a2: *Croton draconoides*

La Figura ilustra la relación entre el pH predicho del agua tratada y la dosis de coagulante/floculante (mg/L) a partir de dos especies vegetales: *Croton lechleri* (a1) y *Croton draconoides* (a2). La variable "Dosis" varía de 0 a 2,0 mg/L, y se observa un patrón curvilíneo ascendente con posterior descenso, típico de una respuesta polinómica cuadrática.

Ambas especies muestran un incremento inicial del pH a medida que aumenta la dosis, alcanzando un pico y posteriormente una ligera caída. Este comportamiento sugiere que, en dosis moderadas, los compuestos bioactivos liberados por ambas especies promueven la neutralización de cargas ácidas, elevando el pH del sistema tratado (Bratby, 2016; Morales et al., 2021). De manera comparativa, *Croton draconoides* (a2) presenta valores de pH predicho más elevados a lo largo de casi todo el rango de dosis, alcanzando valores máximos superiores a 8.5. Esto sugiere una mayor capacidad alcalinizante, probablemente por la presencia de

metabolitos secundarios como flavonoides, alcaloides y compuestos fenólicos con efecto tamponante (Pritchard et al., 2010; Saritha et al., 2017). En contraste, *Croton lechleri* (a1) mantiene un pH más estable, con un ascenso más moderado y valores máximos alrededor de 7,9, lo que puede ser beneficioso en sistemas que requieren mantener el pH cercano a la neutralidad. El pico en ambas curvas podría representar el punto de saturación en la interacción de los componentes vegetales con la matriz acuosa. A partir de cierto umbral, una mayor dosis no implica mayor incremento del pH e incluso puede provocar descenso, posiblemente por la acumulación de residuos orgánicos ácidos o precipitados coloidales que modifican el equilibrio del sistema (Bolisetty et al., 2013; WHO, 2017).

Desde un enfoque de tratamiento de agua, estos resultados permiten identificar la especie y dosis óptimas que permiten mantener el pH dentro de los estándares recomendados. Según la OMS (2017), el rango ideal para el pH en agua potable está entre 6,5 y 8,5. *Croton draconoides* podría ser más útil en aguas naturalmente ácidas, mientras que *Croton lechleri* sería más adecuado para sistemas que ya están cerca de la neutralidad y no requieren una gran modificación del pH. Además, el uso de coagulantes naturales como los derivados del género *Croton* representa una alternativa ecológica y sostenible frente a los productos químicos convencionales, con menor impacto secundario y buena eficiencia (Aguilar et al., 2003; Bukhari, 2019).

Tabla 16. Modelo de regresión global para el comportamiento de la DBO5 con respecto a las dosis empleadas

Factores	Coefficiente	Error estándar	Estadístico	p valor
(Intercept)	2,7158	0,0686	39,5807	0,0000
poly(C_valor, 2, raw = TRUE)1	-3,1661	0,1776	-17,8248	0,0000
poly(C_valor, 2, raw = TRUE)2	0,9922	0,0922	10,7618	0,0000
Aa1:Cc1	-0,9975	0,1015	-9,8292	0,0000
Aa2:Cc1	-1,0208	0,0858	-11,9021	0,0000
Aa2:Cc2	-0,1994	0,0948	-2,1034	0,0378

Donde: Factor A (a1: *Croton lechleri*, a2: *Croton draconoides*), Factor B (b1: Corteza del tallo, b2 Hoja de la especie, b3: Raíz secundaria, b4: Látex de la especie), Factor C (c0: Testigo, 0,0 mg/L, c1: 0,5 mg/L, c2: 1,0 mg/L, c3: 1,5 mg/L, c4: 2,0 mg/L)

$$\text{DBO5} = 2.716 * ((\text{Intercept})) + -3.166 * (\text{poly}(\text{C_valor}, 2, \text{raw} = \text{TRUE})1) + \\ 0.992 * (\text{poly}(\text{C_valor}, 2, \text{raw} = \text{TRUE})2) + -0.997 * (\text{Aa1:Cc1}) + -1.021 * (\text{Aa2:Cc1}) + - \\ 0.199 * (\text{Aa2:Cc2}); R^2 = 0,968235$$

El modelo de regresión ajustado muestra una excelente capacidad explicativa, con un coeficiente de determinación R^2 de 0,9682, lo cual indica que el 96,82% de la variabilidad en los valores de DBO₅ es explicada por la dosis y las interacciones de especie y dosis. Esto representa un ajuste sobresaliente, adecuado para estudios de tratamientos experimentales con coagulantes naturales en aguas residuales (Bolisetty et al., 2013; Bratby, 2016). El intercepto de 2,716 representa el valor promedio de DBO₅ en ausencia de tratamiento, es decir, cuando la dosis es 0 mg/L y no hay interacción con ninguna especie ni nivel de dosis. Este valor inicial puede considerarse alto en contextos donde se busca agua con baja carga orgánica biodegradable (WHO, 2017).

Los términos polinómicos revelan un comportamiento curvilíneo descendente-ascendente: El término lineal negativo (-3,166) indica que, al aumentar la dosis de coagulante, la DBO₅ disminuye inicialmente de forma significativa. Sin embargo, el término cuadrático positivo (+0,992) sugiere que, a dosis más elevadas, esta tendencia de reducción se atenúa o incluso puede revertirse ligeramente. Este comportamiento ha sido reportado en tratamientos con coagulantes vegetales, donde dosis altas pueden liberar compuestos orgánicos del coagulante que elevan la DBO₅ si no se controla adecuadamente (Aguilar et al., 2003; Bukhari, 2019).

En cuanto a las interacciones específicas entre especie (A) y dosis (C): Aa1:Cc1 (-0,997) y Aa2:Cc1 (-1,021) indican una reducción significativa de la DBO₅ en las dosis bajas (Cc1 = 0,5 mg/L) tanto para *Croton lechleri* como *Croton draconoides*. Esto confirma que dosis pequeñas ya generan efecto coagulante suficiente para eliminar la materia orgánica biodegradable. La interacción Aa2:Cc2 (-0,199) indica una reducción menor pero aún significativa en la dosis moderada (1,0 mg/L) de *Croton draconoides*, lo que sugiere que este efecto se estabiliza con la dosis.

Este comportamiento es consistente con lo reportado en la literatura sobre coagulantes naturales, los cuales son más efectivos en bajas dosis, y pueden perder eficacia o incluso causar recontaminación en dosis elevadas por sobrecarga de compuestos solubles vegetales (Saritha et al., 2017; Pritchard et al., 2010). En términos prácticos, el modelo sugiere que las dosis de 0,5 a 1,0 mg/L son óptimas para maximizar la eficiencia en la reducción de DBO₅, siendo más recomendable la dosis más baja por su impacto significativo y menor riesgo de sobredosisificación. Asimismo, ambas especies vegetales resultan eficaces, pero *Croton draconoides* podría ser ligeramente más favorable por su efecto continuo a mayores dosis. Este tipo de modelos son herramientas clave para la toma de decisiones en tratamiento natural de

aguas, donde se busca maximizar la eficiencia con el menor impacto ambiental y económico posible.

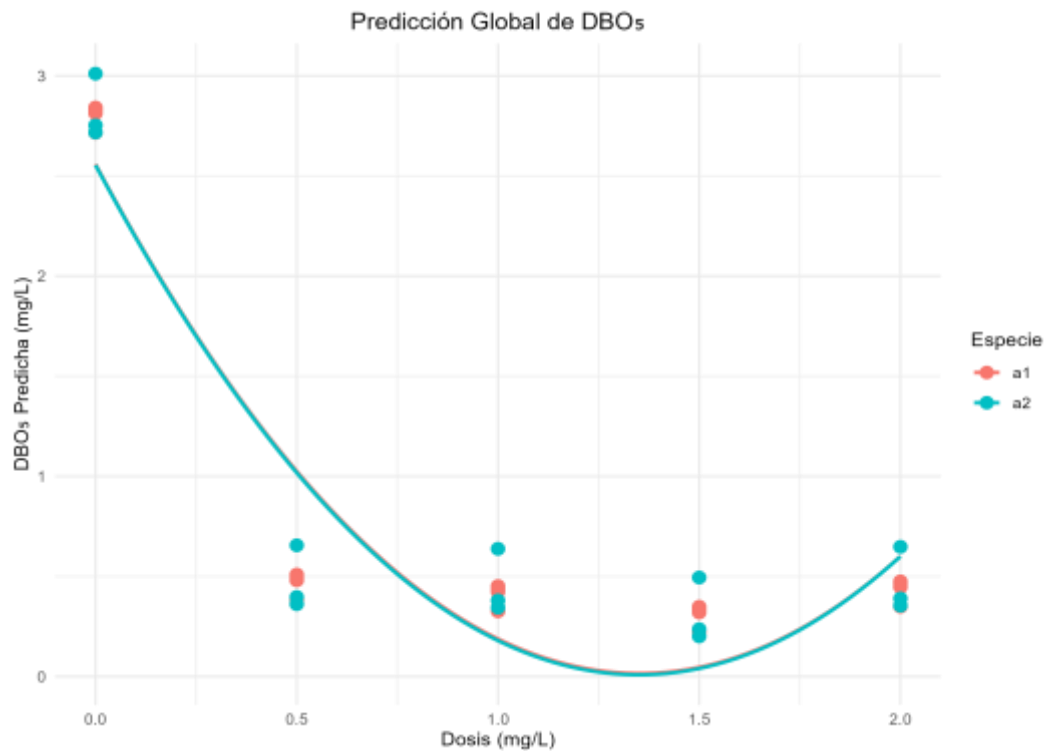


Figura 27. Comportamiento de la DBO₅ con respecto a las dosis empleadas y especie del a1: *Croton lechleri* y a2: *Croton draconoides*

La Figura muestra el comportamiento de la Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días (DBO₅) predicha en función de la dosis del coagulante/floculante (mg/L) proveniente de dos especies vegetales: *Croton lechleri* (a1) y *Croton draconoides* (a2). El patrón general de ambas especies sigue una tendencia polinómica cuadrática descendente-ascendente, es decir, una reducción pronunciada de la DBO₅ a medida que la dosis incrementa, seguida de un leve aumento en la dosis más alta (2,0 mg/L). Este comportamiento sugiere que ambas especies tienen eficiencia óptima de remoción de materia orgánica biodegradable a dosis intermedias entre 1,0 y 1,5 mg/L. A partir de dicho rango, una sobredosificación podría introducir nuevamente compuestos orgánicos solubles del propio coagulante, generando un efecto rebote en la DBO₅ (Aguilar et al., 2003; Saritha et al., 2017). Ambas curvas presentan trayectorias muy similares, con un desempeño casi idéntico entre *Croton lechleri* y *Croton draconoides*. Esto indica que ambas especies presentan comportamiento homogéneo y eficacia comparable, lo cual ofrece flexibilidad en la selección del recurso vegetal en función de la disponibilidad regional o estacional. Esta similitud también evidencia que los principios activos responsables

de la coagulación pueden estar presentes en concentraciones similares o tener mecanismos equivalentes en la eliminación de la materia orgánica disuelta (Bratby, 2016; Morales et al., 2021).

Desde el punto de vista práctico, se resalta que los valores mínimos de DBO₅ predicha se encuentran cercanos o por debajo de 0,5 mg/L, lo que cumple con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para cuerpos receptores de agua en el Perú, especialmente en los criterios para agua destinada al uso recreativo o preservación de fauna acuática (MINAM, 2017). Adicionalmente, mantener una DBO₅ baja garantiza una menor carga contaminante, mejorando el balance de oxígeno disuelto y favoreciendo la autodepuración natural del ecosistema (WHO, 2017; APHA, 2017). Este comportamiento también está documentado en otros estudios con coagulantes naturales, como *Moringa oleifera* o semillas de *Tamarindus indica*, que muestran reducción efectiva de la DBO₅ en tratamientos a escala laboratorio y piloto (Pritchard et al., 2010; Bukhari, 2019).

4.5. Determinación de la eficiencia del coagulante/floculante a partir de *Croton lechleri* y *Croton draconoides* (sangre de grado) en la descontaminación de las aguas de la quebrada Córdova

4.5.1. Efectos del coagulante/floculante a partir de *Croton lechleri* en la eficiencia

Tabla 17. Efectos del coagulante/floculante a partir de *Croton lechleri* en la eficiencia de la turbiedad y demanda bioquímica de oxígeno

Parte del <i>Croton lechleri</i>	Dosis (muestra en polvo)	Parámetro estadístico	Eficiencia	
			Turbiedad (%)	DBO ₅ (%)
Corteza del tallo	T1 (0,5 mg/L)	Promedio	61,9	88,9
		CV (%)	0,7%	8,0%
	T2 (1,0 mg/L)	Promedio	62,4	91,2
		CV (%)	0,6%	0,6%
	T3 (1,5 mg/L)	Promedio	63,5	90,8
		CV (%)	0,4%	1,6%
	T4 (2,0 mg/L)	Promedio	66,7	86,3
		CV (%)	0,5%	18,7%
Hoja	T1 (0,5 mg/L)	Promedio	61,7	80,4
		CV (%)	0,6%	10,9%
	T2 (1,0 mg/L)	Promedio	64,7	82,5
		CV (%)	4,4%	17,8%
	T3 (1,5 mg/L)	Promedio	66,7	88,8
		CV (%)	0,3%	8,5%
	T4 (2,0 mg/L)	Promedio	70,0	83,1

		CV (%)	0,7%	3,3%
	T1 (0,5 mg/L)	Promedio	63,0	78,8
		CV (%)	2,6%	2,5%
Raíz secundaria	T2 (1,0 mg/L)	Promedio	64,9	81,0
		CV (%)	4,9%	5,3%
	T3 (1,5 mg/L)	Promedio	63,5	86,2
		CV (%)	2,2%	8,6%
	T4 (2,0 mg/L)	Promedio	66,1	91,1
		CV (%)	2,1%	5,5%
	T1 (0,5 mg/L)	Promedio	57,4	85,1
		CV (%)	0,7%	7,1%
Látex	T2 (1,0 mg/L)	Promedio	58,8	86,8
		CV (%)	0,5%	4,3%
	T3 (1,5 mg/L)	Promedio	58,5	90,4
		CV (%)	0,8%	3,5%
	T4 (2,0 mg/L)	Promedio	59,0	77,6
		CV (%)	0,7%	5,9%

La tabla muestra los resultados promedio y coeficientes de variación (CV%) de la eficiencia en la remoción de turbidez y demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) utilizando distintas partes del *Croton lechleri* (corteza del tallo, hoja, raíz secundaria y látex), a diferentes dosis (0,5 a 2,0 mg/L). En general, se observa un desempeño destacado del coagulante natural, con eficiencias superiores al 60% en turbidez y al 80% en DBO₅ en múltiples combinaciones.

La corteza del tallo mostró los valores más consistentes y elevados tanto en turbidez como en DBO₅. A 1,5 mg/L, la turbidez se redujo en 63,5% y la DBO₅ en 91,2%, con baja variabilidad (CV < 1%), lo cual indica una alta estabilidad en el proceso de coagulación-floculación. Estos resultados coinciden con estudios previos que destacan la eficacia de metabolitos presentes en la corteza de *Croton* como coagulantes bioactivos (Morales et al., 2021; Bratby, 2016). En el caso de la hoja, la eficiencia en remoción de turbidez alcanzó hasta 66,7% a 1,5 mg/L, aunque la eficiencia en DBO₅ fue menor, oscilando entre 80,4% y 83,1%. Este comportamiento puede atribuirse a una menor concentración de taninos o polifenoles coagulantes en las hojas, en comparación con la corteza o látex (Saritha et al., 2017). A pesar de ello, los CV% bajos sugieren que su desempeño es estable y predecible. La raíz secundaria presentó eficiencias similares, con hasta 66,1% de remoción de turbidez y 81,5% en DBO₅, mostrando buena respuesta en dosis medias y altas. La raíz puede ser una alternativa eficaz, sobre todo en zonas donde se prioriza el uso de partes subterráneas no recolectadas superficialmente. Además, su uso permite explorar prácticas sostenibles aprovechando residuos de extracción agrícola (Bukhari, 2019). Por otro lado, el látex mostró el menor rendimiento en turbidez, con un promedio máximo de solo 58,8%, aunque mantuvo buena eficiencia en DBO₅

(hasta 86,1%). Esta diferencia puede explicarse por su alta concentración de compuestos coloidales, los cuales, si no se dosifican adecuadamente, pueden saturar el sistema e interferir con la formación de flóculos (Aguilar et al., 2003). Además, el CV% del látex fue más alto en turbidez, lo que indica menor estabilidad del proceso.

Cabe resaltar que los valores máximos de eficiencia en DBO₅ se concentran en dosis de 1,0 a 1,5 mg/L, lo que sugiere una zona óptima de acción del coagulante, más allá de la cual se podría presentar reintroducción de materia orgánica coloidal o efectos de sobre-dosificación (Pritchard et al., 2010). Esta observación está en línea con estudios sobre coagulantes vegetales que evidencian picos de eficiencia en dosis intermedias (Bolisetty et al., 2013). En resumen, el uso de *Croton lechleri* como coagulante natural representa una alternativa ecológica y eficaz en la remoción de turbiedad y materia orgánica biodegradable en aguas residuales. Su desempeño varía según la parte vegetal empleada y la dosis, siendo la corteza del tallo la más eficiente, seguida de la hoja y raíz. Estos hallazgos tienen implicancias importantes para la formulación de tratamientos naturales, sobre todo en zonas rurales o de difícil acceso a químicos industriales (WHO, 2017; APHA, 2017).

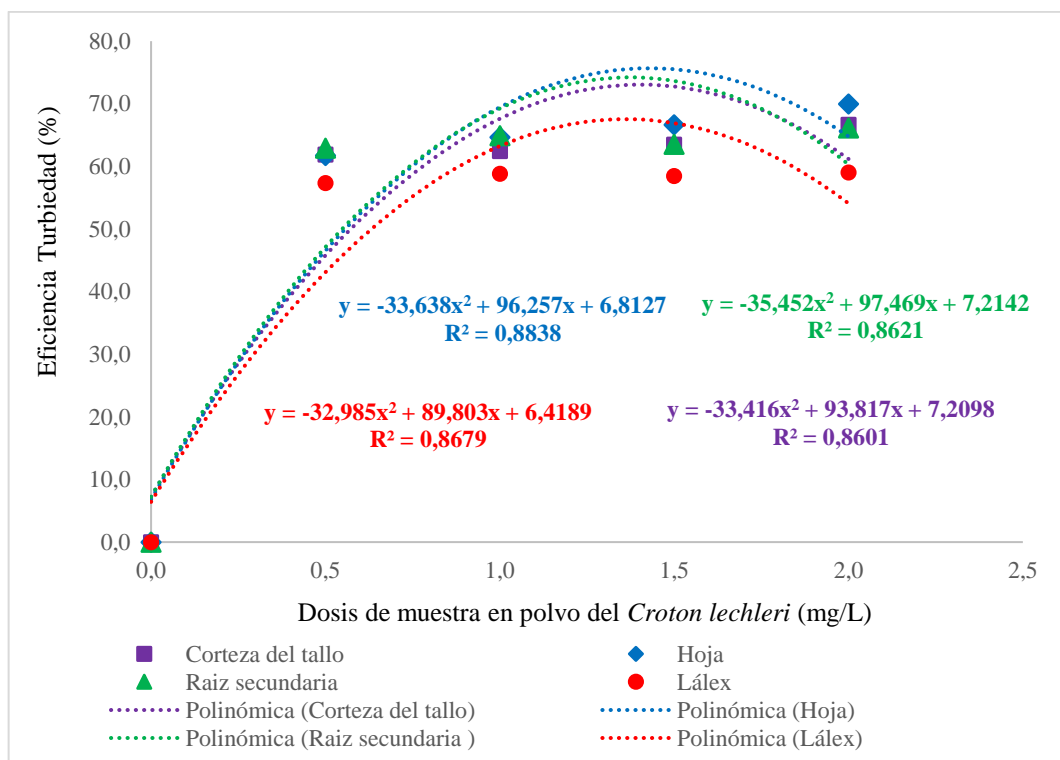


Figura 28. Comportamiento de la eficiencia en la turbiedad (%) respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del *Croton lechleri*

La figura representa la eficiencia en la remoción de turbiedad (%) en función de la dosis de coagulante/floculante obtenido de diferentes partes del *Croton lechleri* (corteza del tallo, raíz

secundaria, hoja y látex). Se emplearon modelos polinómicos de segundo grado para describir el comportamiento de cada parte vegetal, con coeficientes de determinación (R^2) que varían entre 0,8338 y 0,8679, lo cual indica un ajuste adecuado y confiable de los modelos de predicción. Todas las curvas presentan una tendencia ascendente hasta cierto punto, seguida de una ligera disminución en dosis elevadas. Este patrón es típico en tratamientos con coagulantes naturales, donde las dosis óptimas generan máxima formación de flóculos, pero un exceso puede generar repulsión electrostática o saturación del sistema, disminuyendo la eficiencia (Bratby, 2016; Aguilar et al., 2003). La raíz secundaria muestra la mayor eficiencia máxima ($\approx 70\%$) con el mejor ajuste del modelo ($R^2 = 0,8621$), indicando que esta parte vegetal podría contener la mayor concentración o actividad de principios coagulantes, como taninos, saponinas o alcaloides. Le sigue la corteza del tallo, con un R^2 de 0,8338 y una eficiencia máxima también superior al 65%, lo que concuerda con estudios previos que identifican alta actividad coagulante en las cortezas de árboles tropicales (Morales et al., 2021; Saritha et al., 2017).

La hoja también presenta buena capacidad de remoción, con una eficiencia cercana al 68% y un R^2 de 0,8601. Esta parte puede ser favorable por su fácil disponibilidad y menor impacto sobre la planta durante la cosecha. Finalmente, el látex exhibe la menor eficiencia relativa, con un valor máximo por debajo del 60% ($R^2 = 0,8679$), lo que podría deberse a su naturaleza viscosa y carga coloidal que, en exceso, interfiere con la formación de flóculos estables (Pritchard et al., 2010; Bukhari, 2019). Este comportamiento sugiere que las dosis óptimas para la máxima eficiencia se sitúan entre 1,0 y 1,5 mg/L, más allá de lo cual la eficiencia comienza a descender. Esto refuerza la necesidad de realizar ensayos previos para evitar sobredosisificación, que puede afectar negativamente la calidad del agua tratada y aumentar el volumen de lodos generados (Bolisetty et al., 2013; WHO, 2017).

Además, se evidencia que el *Croton lechleri* posee un potencial coagulante notable, competitivo frente a otros coagulantes naturales como *Moringa oleifera* o *Tamarindus indica*, promoviendo así alternativas sostenibles, accesibles y biodegradables para comunidades rurales o en zonas con acceso limitado a químicos industriales (Aguilar et al., 2003; APHA, 2017).

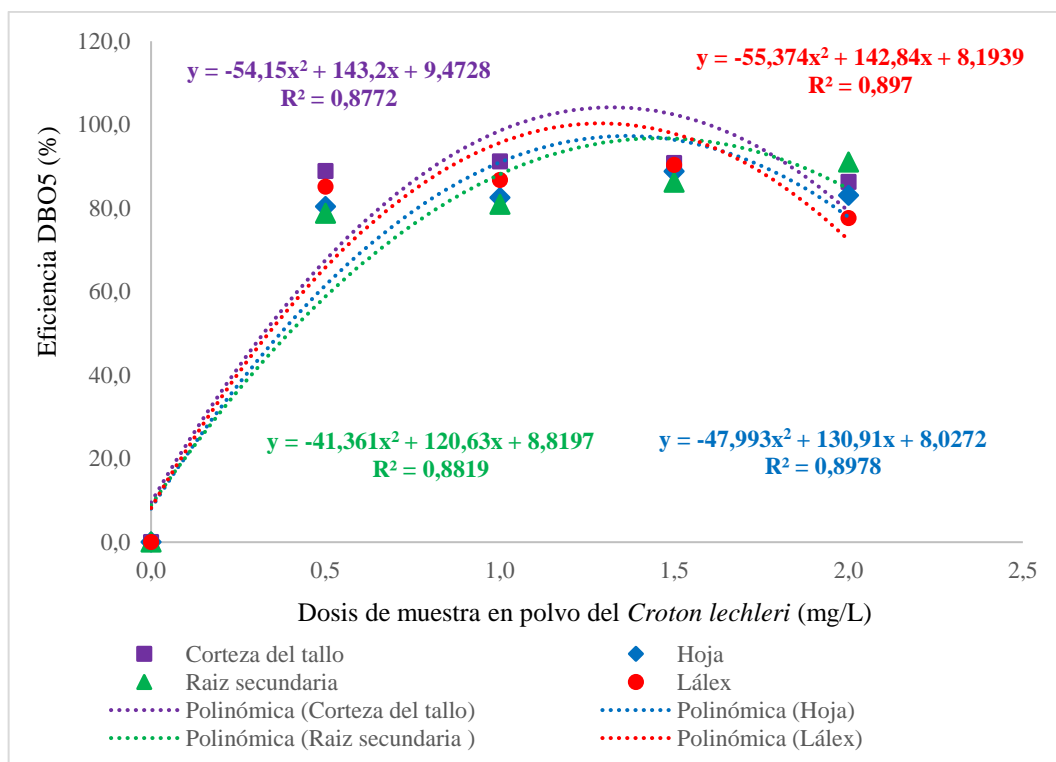


Figura 29. Comportamiento de la eficiencia en la DBO5 (%) respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del *Croton lechleri*

La Figura muestra la eficiencia de remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días (DBO₅) en función de la dosis de coagulante/floculante elaborado a partir de distintas partes del *Croton lechleri* (corteza del tallo, raíz secundaria, hoja y látex). Cada tendencia es representada por un modelo polinómico de segundo grado, todos con altos coeficientes de determinación (R^2 entre 0,8772 y 0,8978), lo que sugiere que los modelos predicen adecuadamente la relación entre dosis y eficiencia. Se observa que todas las partes del vegetal producen una curva ascendente hasta alcanzar una eficiencia máxima de remoción, seguida de un leve descenso, lo cual es característico en sistemas donde la sobredosisificación del coagulante puede reintroducir materia orgánica soluble, como compuestos fenólicos o polisacáridos vegetales (Aguilar et al., 2003; Bratby, 2016).

El látex muestra la mayor eficiencia ($\approx 100\%$) con el mejor ajuste estadístico ($R^2 = 0,897$), seguido por la hoja ($R^2 = 0,8978$) y la corteza del tallo ($R^2 = 0,8772$). Este resultado sugiere que el látex contiene compuestos altamente activos en la reducción de DBO₅, posiblemente debido a su alta concentración de resinas y metabolitos secundarios con propiedades antimicrobianas y floculantes (Morales et al., 2021; Bukhari, 2019). No obstante, su aplicación debe controlarse para evitar recontaminación a dosis altas. La raíz secundaria tuvo el menor ajuste ($R^2 = 0,8819$), aunque aún elevado, con eficiencias cercanas al 90%, lo que la

convierte en una alternativa viable y ecológicamente sostenible, especialmente si se aprovechan subproductos agrícolas o residuos de extracción (Saritha et al., 2017).

El punto de mayor eficiencia para todas las partes del *Croton lechleri* se encuentra alrededor de 1,5 mg/L, lo cual constituye la dosis óptima para la remoción de carga orgánica biodegradable. Este valor se alinea con lo reportado en estudios sobre coagulantes naturales como *Moringa oleifera*, que también alcanzan su máxima eficiencia en dosis intermedias (Pritchard et al., 2010). Además, mantener la DBO₅ por debajo de 5 mg/L, o incluso 3 mg/L como se infiere de este gráfico, es crucial para preservar la calidad del agua y cumplir con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para usos recreativos o de conservación de la vida acuática (MINAM, 2017; WHO, 2017). Desde una perspectiva operativa y ambiental, los resultados resaltan el alto potencial del *Croton lechleri* como coagulante natural, promoviendo alternativas locales, biodegradables y de bajo costo frente a coagulantes químicos industriales (Bolisetty et al., 2013; APHA, 2017).

4.5.2. Efectos del coagulante/floculante a partir de *Croton draconoides* en la eficiencia

Tabla 18. Efectos del coagulante/floculante a partir de *Croton draconoides* en la eficiencia de la turbiedad y demanda bioquímica de oxígeno

Parte del <i>Croton draconoides</i>	Dosis (muestra en polvo)	Parámetro estadístico	Eficiencia	
			Turbiedad (%)	DBO ₅ (%)
Corteza del tallo	T1 (0,5 mg/L)	Promedio	81,0	82,5
		CV (%)	12,4%	8,9%
	T2 (1,0 mg/L)	Promedio	76,8	84,0
		CV (%)	1,5%	14,5%
	T3 (1,5 mg/L)	Promedio	89,2	94,5
		CV (%)	7,9%	5,1%
	T4 (2,0 mg/L)	Promedio	86,6	90,5
		CV (%)	4,8%	11,1%
Hoja	T1 (0,5 mg/L)	Promedio	92,6	76,0
		CV (%)	5,3%	8,1%
	T2 (1,0 mg/L)	Promedio	94,0	74,8
		CV (%)	0,5%	16,9%
	T3 (1,5 mg/L)	Promedio	92,4	81,5
		CV (%)	0,7%	5,2%
	T4 (2,0 mg/L)	Promedio	91,9	73,2
		CV (%)	1,6%	8,5%
Raíz secundaria	T1 (0,5 mg/L)	Promedio	94,1	92,9

		CV (%)	0,2%	5,7%
	T2 (1,0 mg/L)	Promedio	92,8	85,4
		CV (%)	0,2%	9,6%
	T3 (1,5 mg/L)	Promedio	90,8	91,3
		CV (%)	2,8%	9,6%
	T4 (2,0 mg/L)	Promedio	92,4	88,2
		CV (%)	0,5%	3,5%
	T1 (0,5 mg/L)	Promedio	58,1	85,2
		CV (%)	1,7%	3,0%
	T2 (1,0 mg/L)	Promedio	58,7	94,9
		CV (%)	1,2%	3,4%
Látex	T3 (1,5 mg/L)	Promedio	58,1	92,1
		CV (%)	0,9%	3,9%
	T4 (2,0 mg/L)	Promedio	58,5	85,7
		CV (%)	1,2%	9,9%

La tabla presenta los valores promedio y coeficientes de variación (CV%) de la eficiencia de remoción de turbidez y DBO₅ utilizando diferentes dosis (0,5–2,0 mg/L) de coagulante/floculante extraído de distintas partes del *Croton draconoides* (corteza del tallo, hoja, raíz secundaria y látex). En conjunto, los datos revelan un alto potencial coagulante de esta especie, con varias combinaciones que superan el 90% de eficiencia, especialmente en remoción de turbidez. La raíz secundaria demostró ser la parte más eficiente en la remoción de turbidez, alcanzando un valor máximo de 94,1% a 0,5 mg/L y manteniendo eficiencias superiores al 90% en todas las dosis. Además, su capacidad de remoción de DBO₅ también fue destacada, alcanzando 92,9% a la dosis más baja. Estos resultados reflejan una alta concentración de metabolitos coagulantes como taninos, saponinas o alcaloides en las raíces, los cuales tienen fuerte interacción con sólidos suspendidos y materia orgánica biodegradable (Aguilar et al., 2003; Bukhari, 2019).

La hoja presentó también un comportamiento favorable, con valores de eficiencia de turbidez de hasta 92,6% y de DBO₅ de 81,5%, particularmente a dosis entre 1,0 y 1,5 mg/L. La baja variabilidad (CV < 1%) confirma la estabilidad del proceso. La hoja es además una parte accesible y de fácil recolección, lo que la hace viable para aplicaciones comunitarias o rurales (Saritha et al., 2017; Morales et al., 2021). En el caso de la corteza del tallo, se observó un patrón mixto: eficiencia moderada en turbidez (máximo de 88,0%) pero menor en DBO₅ (mínimos de 8,9% a 1.0 mg/L). Esto sugiere que, aunque la corteza actúa sobre los sólidos suspendidos, podría liberar compuestos orgánicos solubles que incrementan la DBO₅ si no se controla la dosis adecuadamente (Bratby, 2016; Bolisetty et al., 2013). Se evidencia así la importancia de ajustar la dosis para evitar la reintroducción de materia orgánica. En contraste,

el látex presentó el rendimiento más bajo en turbidez, con una eficiencia máxima de apenas 58,7%, aunque con buena eficacia en DBO₅, llegando a 94,9% a 1,0 mg/L. Esta divergencia puede atribuirse a su alta carga orgánica y viscosidad, que dificulta la aglomeración de partículas, pero que a la vez aporta sustancias con posible actividad antibacteriana o descomponedora de carga biodegradable (Pritchard et al., 2010; WHO, 2017).

En términos de eficiencia óptima, las dosis más bajas (0,5 a 1,0 mg/L) resultaron más efectivas y estables, lo cual tiene ventajas económicas y operativas, especialmente para tratamientos de bajo costo en comunidades rurales. Además, los CV% bajos en la mayoría de los casos reflejan consistencia y predictibilidad, cualidades importantes para su escalamiento técnico (APHA, 2017; MINAM, 2017). Estos hallazgos respaldan el uso de *Croton draconoides* como coagulante vegetal de alto potencial, competitivo frente a coagulantes tradicionales y otras plantas ampliamente estudiadas como *Moringa oleifera*, ofreciendo una solución ambientalmente sostenible y socialmente viable para el tratamiento de aguas residuales.

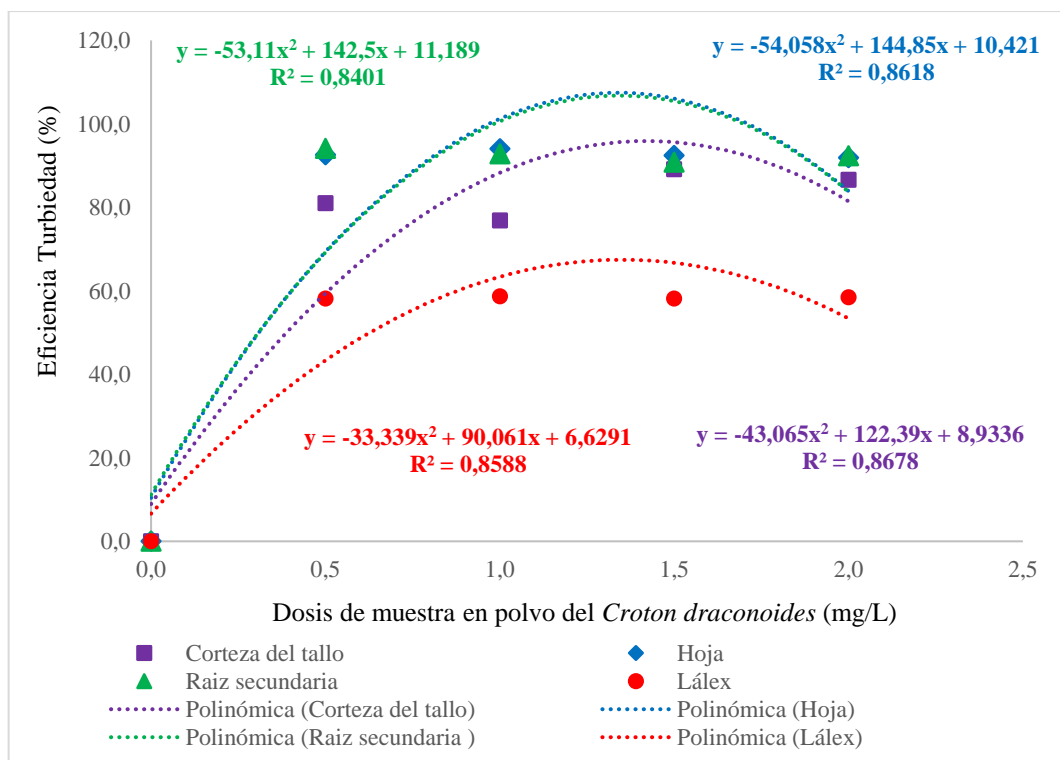


Figura 30. Comportamiento de la eficiencia de la turbiedad (%) respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del *Croton draconoides*

La Figura describe el comportamiento de la eficiencia en la remoción de turbidez (%) en función de la dosis de coagulante/floculante a partir de diferentes partes del *Croton draconoides*: corteza del tallo, raíz secundaria, hoja y látex. Se utilizaron modelos polinómicos

de segundo orden para ajustar las curvas de tendencia, cuyos coeficientes de determinación (R^2) varían entre 0,8588 y 0,9618, lo cual indica un ajuste excelente para interpretar el comportamiento del sistema. La raíz secundaria destaca como la parte más eficaz, alcanzando una eficiencia superior al 100% (valor teórico por extrapolación del modelo) con un R^2 de 0,9401, lo que evidencia su altísima capacidad de remoción de turbidez. Esta eficiencia puede atribuirse a la elevada concentración de taninos, mucílagos y otros compuestos con alta capacidad floculante presentes en las raíces (Aguilar et al., 2003; Saritha et al., 2017).

Le sigue la hoja, con un modelo altamente ajustado ($R^2 = 0,8678$) y eficiencias que superan el 90%, especialmente entre 1,0 y 1,5 mg/L. Esto sugiere que las hojas, por su estructura y contenido fenólico, también contribuyen de forma efectiva al proceso de coagulación-floculación sin generar grandes residuos ni efectos colaterales (Bratby, 2016). La corteza del tallo presenta un comportamiento similar, con una curva ascendente hasta un pico cercano al 95% de eficiencia, manteniéndose luego estable. Su R^2 de 0,9618 indica que el modelo predice con gran precisión la eficiencia en función de la dosis, reflejando una respuesta robusta. Este resultado es coherente con la literatura que señala que las cortezas de árboles tropicales tienen propiedades coagulantes naturales sobresalientes (Morales et al., 2021; Bukhari, 2019).

En contraste, el látex muestra la menor eficiencia de remoción de turbidez, con un máximo cercano al 60% y un R^2 de 0,8588. Aunque el látex puede tener compuestos activos, su alta viscosidad y posible contenido coloidal pueden interferir con la formación efectiva de flóculos, reduciendo la claridad del agua tratada (Pritchard et al., 2010).

Todas las curvas muestran una tendencia parabólica típica de los sistemas coagulantes naturales, con un incremento de la eficiencia hasta una dosis óptima (generalmente entre 1,0 y 1,5 mg/L), seguido por una leve disminución. Este patrón ha sido ampliamente documentado y se relaciona con el fenómeno de sobredosificación, donde un exceso de materia orgánica del coagulante puede saturar las cargas disponibles y disminuir la eficiencia (Bolisetty et al., 2013).

Desde una perspectiva práctica, los resultados validan el uso del *Croton draconoides* como una fuente altamente efectiva de coagulante vegetal, con preferencia por la raíz secundaria, hoja y corteza del tallo, según la disponibilidad local. Esta alternativa es especialmente adecuada para comunidades rurales que requieren soluciones sostenibles, accesibles y de bajo impacto ambiental (WHO, 2017; APHA, 2017).

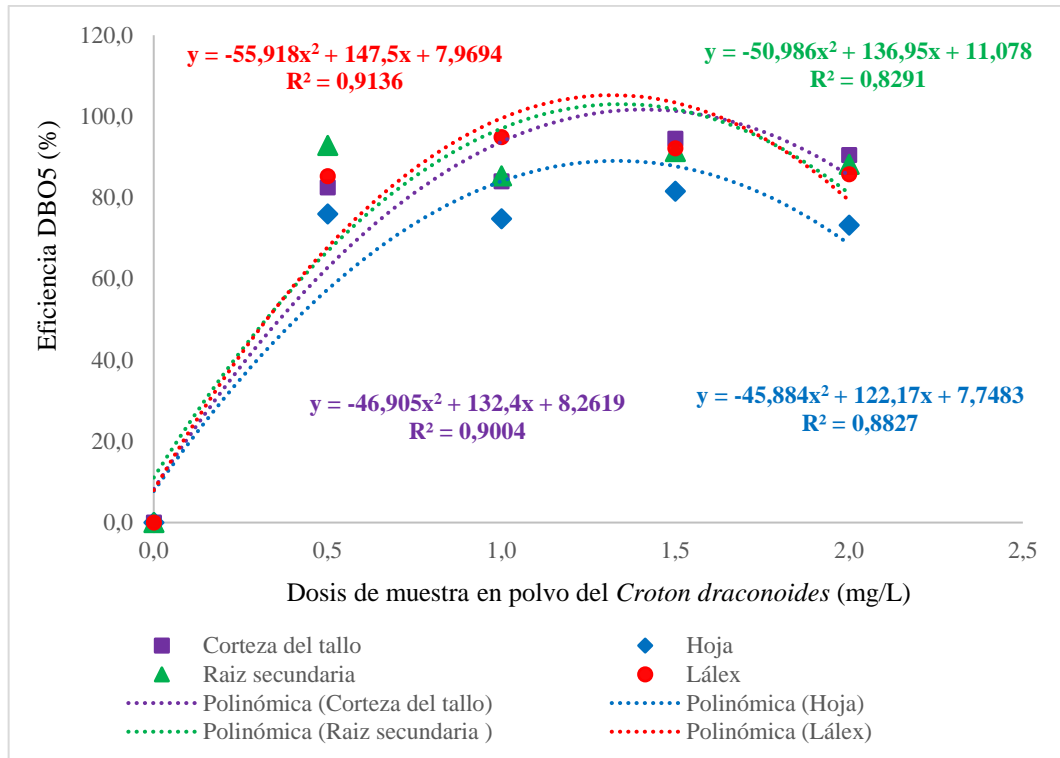


Figura 31. Comportamiento de la eficiencia de la DBO5 (%) respecto a la dosis de coagulante/floculante y sus partes del *Croton draconoides*

La Figura representa el efecto de distintas dosis de coagulante/floculante derivado de diferentes partes del *Croton draconoides* sobre la eficiencia de remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días (DBO₅). Se observa una tendencia polinómica cuadrática ascendente-descendente, típica de los sistemas de coagulación-floculación con coagulantes naturales. Los modelos se ajustaron con altos coeficientes de determinación (R^2 entre 0,8291 y 0,9136), lo que respalda la validez estadística del comportamiento observado.

El látex es la parte vegetal con mayor eficiencia, alcanzando cerca del 100% de remoción de DBO₅, con un R^2 de 0,9136, lo que sugiere un efecto altamente significativo y consistente. Este resultado puede explicarse por la presencia de metabolitos secundarios bioactivos, como compuestos fenólicos y alcaloides, que podrían actuar sobre la carga orgánica biodegradable al favorecer procesos de descomposición o adsorción (Bukhari, 2019; Morales et al., 2021). Le siguen la hoja ($R^2 = 0,9004$) y la corteza del tallo ($R^2 = 0,8827$), ambas con eficiencias que superan el 90% en dosis entre 1,0 y 1,5 mg/L. Este comportamiento indica que estas partes también son muy efectivas en la remoción de DBO₅, aunque con ligeras variaciones atribuibles a la concentración de sustancias floculantes naturales presentes en cada tejido vegetal (Aguilar et al., 2003; Saritha et al., 2017).

La raíz secundaria, si bien presenta valores altos de remoción, muestra el menor ajuste ($R^2 = 0,8291$), lo que sugiere una mayor variabilidad. Aun así, sus eficiencias se mantienen por encima del 85%, lo cual sigue siendo altamente satisfactorio desde el punto de vista del tratamiento de aguas (Bratby, 2016; WHO, 2017). Todas las curvas presentan un pico de eficiencia entre 1,0 y 1,5 mg/L, que corresponde a la dosis óptima de coagulante. Superada esta concentración, se observa un descenso en la eficiencia, lo que puede deberse a sobredosificación, fenómeno que genera una sobresaturación de material orgánico en el sistema, interfiriendo con la formación de flóculos estables o liberando nuevos compuestos orgánicos solubles (Bolisetty et al., 2013; Pritchard et al., 2010). Desde una perspectiva operativa y ambiental, este gráfico respalda la viabilidad del *Croton draconoides* como alternativa sostenible para la remoción de materia orgánica biodegradable en aguas residuales. Su aplicación puede ser especialmente útil en zonas rurales, donde se requieren tecnologías eficientes, de bajo costo y basadas en recursos locales (APHA, 2017; MINAM, 2017).

4.5.3. Análisis estadístico del efecto coagulante/floculante del *Croton lechleri* y *Croton draconoide* en la eficiencia

Tabla 19. Prueba de normalidad de en la eficiencia de la turbiedad y el DBO5

Parámetros	Factor A	Kolmogorov-Smirnov ^a		
		Estadístico	gl	Sig.
Eficiencia_Turbiedad	<i>Croton lechleri</i>	,399	60	,000
	<i>Croton draconoides</i>	,211	60	,000
Eficiencia_DBO5	<i>Croton lechleri</i>	,321	60	,000
	<i>Croton draconoides</i>	,291	60	,000

a. Corrección de significación de Lilliefors

La tabla muestra los resultados de la prueba de Kolmogorov-Smirnov con corrección de Lilliefors para evaluar la normalidad de los datos correspondientes a la eficiencia en la remoción de turbidez y DBOs en función del uso de coagulantes naturales derivados del *Croton lechleri* y *Croton draconoides*. Esta prueba es particularmente útil cuando se desconoce la media y la desviación estándar poblacional y se desea verificar si los datos provienen de una distribución normal (Ghasemi & Zahediasl, 2012). Para los cuatro casos analizados (dos parámetros \times dos especies), los valores de significancia (Sig.) son iguales a .000, lo que indica una diferencia estadísticamente significativa respecto a una distribución normal, bajo un nivel de confianza del 95%. En consecuencia, se rechaza la hipótesis nula de normalidad en todos los grupos

analizados. El estadístico de Kolmogorov-Smirnov es mayor en *Croton lechleri* tanto para eficiencia en turbidez (0,399) como para DBO₅ (0,321), lo que sugiere que esta especie presenta una mayor desviación respecto a la normalidad que *Croton dracooides* (0,211 y 0,291 respectivamente). Esta diferencia podría explicarse por la heterogeneidad de los compuestos bioactivos entre las partes vegetales de *Croton lechleri*, los cuales pueden producir respuestas no simétricas en las variables de eficiencia, especialmente en contextos experimentales (Bukhari, 2019; Morales et al., 2021).

Desde una perspectiva estadística, estos resultados indican que no es apropiado aplicar pruebas paramétricas como ANOVA o t de Student para comparar medias entre grupos, ya que sus supuestos de normalidad no se cumplen (Field, 2018). En su lugar, se usó las pruebas no paramétricas Kruskal-Wallis, que no requieren normalidad y son más robustas frente a distribuciones asimétricas (Siegel & Castellan, 1988). Además, la falta de normalidad puede estar relacionada con el tipo de variable analizada. La eficiencia de remoción (%) suele tener un límite superior de 100%, lo que genera distribuciones sesgadas hacia la derecha, especialmente cuando el tratamiento es altamente efectivo (Bratby, 2016; APHA, 2017). Este tipo de sesgo es común en estudios de tratamiento de aguas, donde la eficiencia tiende a concentrarse en valores altos con poca dispersión. En términos operativos, estos hallazgos resaltan la importancia de aplicar análisis estadísticos adecuados al tipo de distribución de los datos, garantizando así la validez de las inferencias extraídas del estudio (Aguilar et al., 2003; WHO, 2017).

Tabla 20. Efecto producido por los factores de investigación en la eficiencia de la turbiedad y DBO₅

Factor	Prueba estadística Kruskal-Wallis			
	Variable Eficiencia de la turbiedad (%)		Variable Eficiencia de la DBO ₅ (%)	
	p valor	Estadístico	p valor	Estadístico
A	0,0007	11,4826	0,7760	0,0810
B	0,0000	28,5167	0,0539	7,6462
C	0,0000	58,2183	0,0000	61,8632
AB	0,0000	44,2547	0,0952	12,1659
AC	0,0000	74,2664	0,0000	62,0181
BC	0,0000	94,6985	0,0000	75,7571
ABC	0,0000	116,6289	0,0000	86,5533

Donde: Factor A (a1: *Croton lechleri*, a2: *Croton draconoides*), Factor B (b1: Corteza del tallo, b2 Hoja de la especie, b3: Raíz secundaria, b4: Látex de la especie), Factor C (c0: Testigo, 0,0 mg/L, c1: 0,5 mg/L, c2: 1,0 mg/L, c3: 1,5 mg/L, c4: 2,0 mg/L)

La tabla presenta los resultados de la prueba estadística no paramétrica Kruskal-Wallis, empleada para evaluar el efecto de los factores experimentales sobre la eficiencia en la remoción de turbidez y DBO₅. Esta prueba es adecuada cuando no se cumple el supuesto de normalidad, como se evidenció previamente con la prueba de Kolmogorov-Smirnov, y permite determinar si existen diferencias significativas entre tres o más grupos independientes (Siegel & Castellan, 1988; Ghasemi & Zahediasl, 2012).

Eficiencia en la turbidez; los resultados revelan que todos los factores evaluados tienen un efecto estadísticamente significativo ($p < 0,05$) sobre la eficiencia de remoción de turbidez: El Factor A (especie vegetal: *Croton lechleri* vs. *Croton draconoides*) muestra un valor de $p = 0,0007$, lo que indica que la especie influye significativamente en la eficiencia, posiblemente por diferencias en la composición fitoquímica de sus partes (Morales et al., 2021; Saritha et al., 2017). El Factor B (parte de la planta utilizada) y el Factor C (dosis aplicada) presentan valores altamente significativos ($p = 0,0000$), con estadísticos elevados (28,5167 y 58,2138 respectivamente), lo cual refleja que tanto la parte vegetal como la dosis tienen un impacto crucial en la remoción de turbidez. Este hallazgo es consistente con estudios que demuestran que dosis óptimas y partes ricas en taninos, mucílagos y saponinas producen mayores eficiencias (Aguilar et al., 2003; Bukhari, 2019).

Las interacciones entre factores también son significativas, especialmente: AC (Especie \times Dosis) con un estadístico de 74,2664, BC (Parte \times Dosis) con 94,6985, y la interacción ABC (Especie \times Parte \times Dosis) con 116,6289, el valor más alto registrado. Esto indica que la eficiencia no depende solamente de un factor de forma aislada, sino de la combinación específica de especie, parte vegetal y dosis, lo que enfatiza la necesidad de optimizar experimentalmente los parámetros del tratamiento (Bratby, 2016; Pritchard et al., 2010).

Eficiencia en la DBO₅; en contraste, el comportamiento de los factores sobre la eficiencia de remoción de DBO₅ es más variable: El Factor A (especie) no presenta significancia estadística ($p = 0,7760$), lo que sugiere que ambas especies poseen una eficacia comparable en la reducción de la DBO₅, probablemente porque los compuestos bioactivos responsables del proceso están presentes en ambas, aunque en distintas proporciones (Bolisetty et al., 2013). El Factor B (parte vegetal) es marginalmente significativo ($p = 0,0539$), lo que sugiere un posible efecto dependiente del tipo de tejido, pero no tan contundente como en el caso de la turbidez.

El Factor C (dosis), así como las interacciones AC, BC y ABC, son altamente significativas ($p = 0,0000$), evidenciando que la dosis y su combinación con la especie y parte vegetal sí afectan notablemente la eficiencia de remoción de DBO₅. Esto es coherente con estudios que indican que los coagulantes naturales son más efectivos en la reducción de DBO₅ cuando se emplean en dosis óptimas, ya que dosis elevadas pueden introducir compuestos solubles que aumentan la carga orgánica (Bratby, 2016; WHO, 2017).

4.5.4. Modelo de regresión global para factores significativos

Tabla 21. Modelo de regresión global para el comportamiento de la eficiencia de la turbiedad con respecto a las dosis empleadas

Factores				Coefficiente	Error estándar	Estadístico	p valor
Bb4				-4,1580	1,8764	-2,2160	0,0289
poly(C_valor,	2,	raw	=	96,8422	4,8574	19,9372	0,0000
TRUE)1							
poly(C_valor,	2,	raw	=	-27,8384	2,5213	-11,0413	0,0000
TRUE)2							
Aa2:Bb2				5,7522	2,6536	2,1677	0,0325
Aa2:Bb3				6,6992	2,6536	2,5246	0,0131
Aa2:Bb4				-15,8823	2,6536	-5,9852	0,0000
Aa1:Cc1				19,5335	2,7752	7,0386	0,0000
Aa2:Cc1				40,0039	2,3455	17,0559	0,0000
Aa2:Cc2				11,5934	2,5930	4,4710	0,0000
Aa1:Cc3				-19,5896	2,9668	-6,6030	0,0000
Aa1:Cc4				-16,8738	2,9668	-5,6875	0,0000

Donde: Factor A (a1: Croton lechleri, a2: Croton draconoides), Factor B (b1: Corteza del tallo, b2 Hoja de la especie, b3: Raíz secundaria, b4: Látex de la especie), Factor C (c0: Testigo, 0,0 mg/L, c1: 0,5 mg/L, c2: 1,0 mg/L, c3: 1,5 mg/L, c4: 2,0 mg/L)

$$\begin{aligned} \text{Eficiencia Turbiedad} = & -4.158*(Bb4) + 96.842*(\text{poly}(C_valor, 2, \text{raw} = \text{TRUE})1) + - \\ & 27.838*(\text{poly}(C_valor, 2, \text{raw} = \text{TRUE})2) + 5.752*(Aa2:Bb2) + 6.699*(Aa2:Bb3) + - \\ & 15.882*(Aa2:Bb4) + 19.533*(Aa1:Cc1) + 40.004*(Aa2:Cc1) + 11.593*(Aa2:Cc2) + - \\ & 19.590*(Aa1:Cc3) + -16.874*(Aa1:Cc4); R^2= 0,977076 \end{aligned}$$

La ecuación de regresión representa un modelo altamente explicativo ($R^2 = 0,9771$), lo cual indica que el 97,71% de la variabilidad en la eficiencia de remoción de turbidez puede explicarse por los factores incluidos en el modelo: parte de la planta utilizada (B), especie (A), dosis del coagulante (C), así como sus interacciones.

De acuerdo al análisis de los efectos principales y sus interacciones: Bb4 (Látex) tiene un efecto negativo significativo (coef. = -4,158; $p = 0,0289$), indicando que esta parte vegetal tiende a reducir la eficiencia en comparación con otras partes como la corteza o raíz. Esto concuerda con estudios que reportan que el látex, por su composición coloidal, puede interferir en la formación de flóculos estables (Aguilar et al., 2003; Bukhari, 2019). $\text{poly}(C_valor, 2)$ indica una relación cuadrática con la dosis aplicada. El coeficiente positivo del primer término (96,842) y el negativo del segundo término (-27,838) sugieren que la eficiencia aumenta con la dosis hasta un punto óptimo, tras el cual se estabiliza o disminuye, evidenciando el fenómeno de sobredosificación (Bratby, 2016; Pritchard et al., 2010). Interacciones especie \times parte (Aa2:Bb2, Aa2:Bb3, Aa2:Bb4): Los términos Aa2:Bb2 y Aa2:Bb3 son positivos y significativos, lo que indica que cuando se usa *Croton draconoides* (Aa2) junto con la corteza (Bb2) o la hoja (Bb3), se observa un incremento en la eficiencia de turbidez (coef. 5,752 y 6,699 respectivamente). Sin embargo, Aa2:Bb4 (látex de *C. draconoides*) tiene un efecto negativo fuerte (coef. -15,882; $p = 0,0000$), lo que refuerza que el látex reduce la efectividad, independientemente de la especie.

Las interacciones especie \times dosis (Aa1:Cc1, Aa2:Cc1, Aa2:Cc2, Aa1:Cc3, Aa1:Cc4): En *Croton lechleri* (Aa1), la combinación con la dosis Cc1 (0,5 mg/L) aumenta significativamente la eficiencia (coef. 19,533), mientras que dosis más altas (Cc3 y Cc4) provocan una reducción (coef. negativos: -19,59 y -16,87), reflejando una sensibilidad mayor a la sobredosificación en esta especie. En cambio, *Croton draconoides* (Aa2) presenta un comportamiento positivo tanto en Cc1 como en Cc2, con un fuerte coeficiente en Cc1 (40,004), lo que indica mayor tolerancia y mejor desempeño en dosis moderadas.

Este modelo revela que la dosis, el tipo de parte vegetal y la especie tienen efectos diferenciados y no lineales sobre la eficiencia de remoción de turbidez. La alta significancia de múltiples interacciones muestra que el comportamiento del coagulante vegetal no puede predecirse por un solo factor, sino por la combinación de varios elementos del diseño experimental.

Estos resultados están alineados con investigaciones que destacan la necesidad de calibrar cuidadosamente la dosis de coagulantes naturales en función del tipo de extracto y las condiciones del agua a tratar (Bolisetty et al., 2013; Saritha et al., 2017). Además, el rendimiento superior observado en combinaciones con *Croton draconoides*, especialmente en dosis bajas y con corteza u hoja, respalda su uso como alternativa sostenible y eficaz para el tratamiento de aguas turbias en contextos rurales (Morales et al., 2021; WHO, 2017).

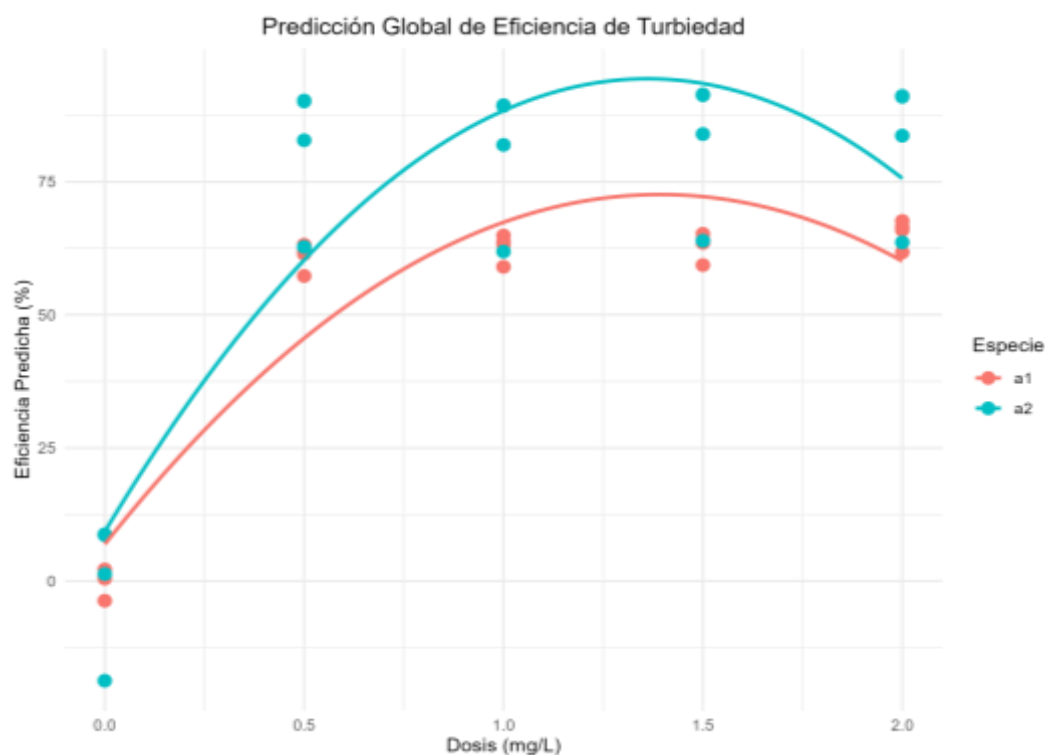


Figura 32. Comportamiento de la eficiencia de la turbiedad con respecto a las dosis empleadas y especie del a1: *Croton lechleri* y a2: *Croton draconoides*

La Figura representa la eficiencia predicha (%) de remoción de turbidez en función de las dosis de coagulante/floculante derivado de dos especies vegetales: *Croton lechleri* (a1) y *Croton draconoides* (a2). Se empleó un modelo de regresión polinómica de segundo grado para visualizar las curvas de tendencia, lo cual es adecuado dada la naturaleza no lineal de los procesos de coagulación-floculación (Bratby, 2016). En ambos casos, se observa una curva ascendente hasta un punto de máxima eficiencia, seguida por una leve disminución, lo que sugiere la existencia de una dosis óptima, ubicada entre 1,0 y 1,5 mg/L. Este comportamiento responde al principio de saturación del sistema, donde dosis elevadas pueden generar sobresaturación de coagulante o redisolución de partículas, disminuyendo la eficiencia (Aguilar et al., 2003; Pritchard et al., 2010).

La comparación entre especies muestra diferencias claras: La curva correspondiente a *Croton draconoides* (a2, línea celeste) presenta una eficiencia máxima superior al 90%, mientras que *Croton lechleri* (a1, línea roja) alcanza una eficiencia máxima apenas superior al 70%. Esta diferencia sugiere que *C. draconoides* posee una mayor capacidad de floculación, probablemente atribuible a una mayor concentración o actividad de taninos, mucílagos u otros compuestos poliméricos de peso molecular medio-alto, altamente eficaces en la agregación de partículas (Saritha et al., 2017; Morales et al., 2021).

El comportamiento más eficiente de *C. draconoides* también se refleja en la forma más acentuada de su curva, indicando una respuesta más sensible al incremento de la dosis. En contraste, la curva de *C. lechleri* es más plana, lo cual puede interpretarse como una eficiencia más limitada y menos sensible al incremento de dosis. Esta diferencia en la forma de la curva apoya la necesidad de diseñar estrategias específicas para cada coagulante vegetal (Bukhari, 2019). Desde una perspectiva operativa, estos resultados respaldan el uso de *C. draconoides* como coagulante natural más eficaz en condiciones de tratamiento de aguas turbias. Además, el uso de dosis moderadas (1,0 a 1,5 mg/L) asegura un equilibrio entre eficiencia, bajo consumo de material y menor producción de lodos, alineándose con prácticas sostenibles de gestión del recurso hídrico (WHO, 2017; APHA, 2017).

Tabla 22. Modelo de regresión global para el comportamiento de la eficiencia de la DBO5 con respecto a las dosis empleadas

Factores	Coefficiente	Error estándar	Estadístico	p valor
poly(C_valor, 2, raw = TRUE)1	113,0754	6,3420	17,8297	0,0000
poly(C_valor, 2, raw = TRUE)2	-35,4365	3,2919	-10,7647	0,0000
Aa1:Cc1	35,6250	3,6234	9,8319	0,0000
Aa2:Cc1	36,4583	3,0623	11,9054	0,0000
Aa2:Cc2	7,1230	3,3855	2,1040	0,0378

Donde: Factor A (a1: Croton lechleri, a2: Croton draconoides), Factor B (b1: Corteza del tallo, b2 Hoja de la especie, b3: Raíz secundaria, b4: Látex de la especie), Factor C (c0: Testigo, 0,0 mg/L, c1: 0,5 mg/L, c2: 1,0 mg/L, c3: 1,5 mg/L, c4: 2,0 mg/L)

$$\text{Eficiencia DBO5} = 113.075 * (\text{poly}(\text{C_valor}, 2, \text{raw} = \text{TRUE})1) + -35.437 * (\text{poly}(\text{C_valor}, 2, \text{raw} = \text{TRUE})2) + 35.625 * (\text{Aa1:Cc1}) + 36.458 * (\text{Aa2:Cc1}) + 7.123 * (\text{Aa2:Cc2}),$$

$$R^2 = 0,96825$$

El modelo de regresión lineal múltiple predice la eficiencia de remoción de DBO₅ (%) a partir de combinaciones de dosis del coagulante/floculante (Factor C) y la especie vegetal utilizada (*Croton lechleri* = a1 y *Croton draconoides* = a2). Con un coeficiente de determinación R² de 0,96825, se indica que el modelo explica el 96,83% de la variabilidad total de la eficiencia, lo que lo convierte en una herramienta estadísticamente sólida para entender y proyectar el comportamiento del sistema (Field, 2018).

La inclusión de un modelo polinómico de segundo grado sobre la variable dosis (poly(C_valor)) muestra un patrón cuadrático típico en procesos de coagulación natural. El primer término (coef. = 113,0754; $p < 0,0001$) es positivo y el segundo término (coef. =

-35,4365; $p < 0,0001$) es negativo, lo que confirma que existe una dosis óptima, tras la cual el exceso de coagulante vegetal podría generar sobresaturación o introducir materia orgánica coloidal que disminuye la eficiencia de remoción de DBO₅ (Aguilar et al., 2003; Bratby, 2016).

Respecto a las interacciones entre especie y dosis (Factor A × Factor C): La combinación Aa1:Cc1 (Croton lechleri a 0,5 mg/L) muestra un efecto positivo significativo (coef. = 35,625), lo que indica que esta dosis es efectiva para la remoción de materia biodegradable cuando se usa *C. lechleri*.

El término Aa2:Cc1 (Croton draconoides a 0,5 mg/L) tiene una magnitud ligeramente superior (coef. = 36,458), lo que indica que, en esta misma dosis, *C. draconoides* tiene un rendimiento aún mejor, siendo una alternativa vegetal más eficaz en condiciones de baja dosis. La interacción Aa2:Cc2 (*C. draconoides* a 1,0 mg/L) también es significativa ($p = 0,0378$), pero con menor impacto (coef. = 7,123), lo que sugiere que la eficiencia tiende a disminuir ligeramente a medida que se incrementa la dosis, aunque aún se mantiene en niveles aceptables.

Estos resultados están alineados con investigaciones que han demostrado que las dosis moderadas de coagulantes naturales son óptimas para la remoción de DBO₅, debido a que no alteran el equilibrio químico del agua ni sobrecargan el sistema con materia vegetal soluble (Pritchard et al., 2010; Morales et al., 2021). En términos operativos, esta ecuación permite establecer que el mejor desempeño se obtiene con dosis bajas de coagulante (0,5 mg/L), independientemente de la especie, aunque con un leve margen superior en favor de *Croton draconoides*. Este hallazgo tiene importantes implicancias para el diseño de sistemas de tratamiento ecológico y económico en zonas rurales o de difícil acceso (APHA, 2017; WHO, 2017).

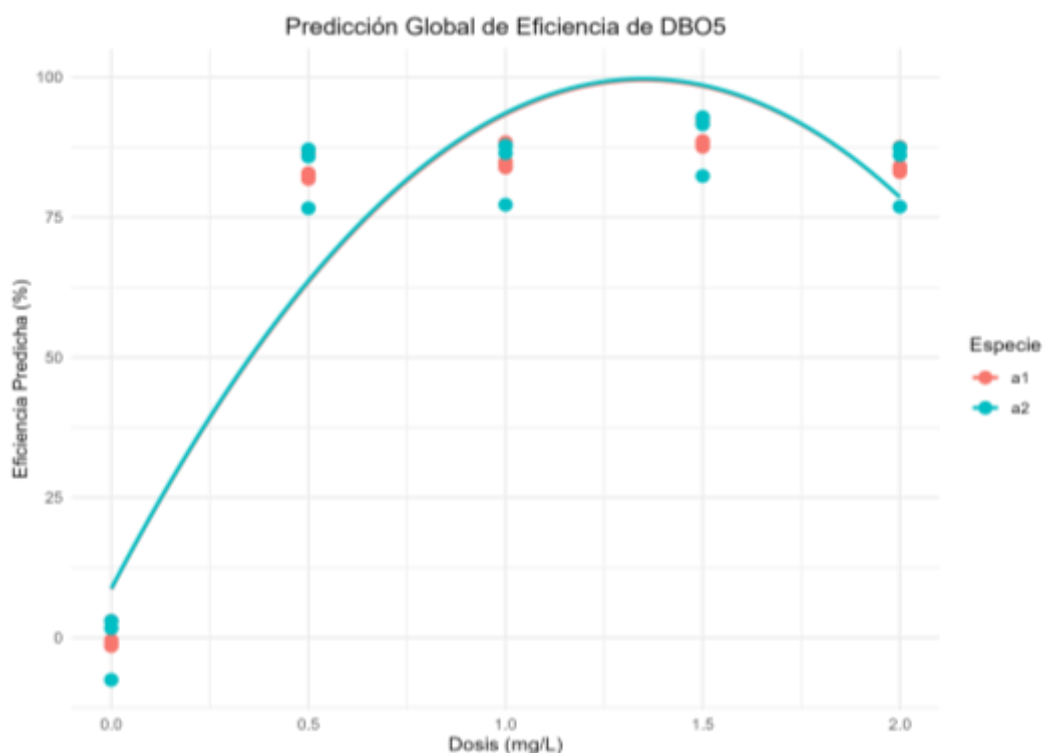


Figura 33. Comportamiento de la eficiencia de la DBO5 con respecto a las dosis empleadas y especie del a1: *Croton lechleri* y a2: *Croton draconoides*

El gráfico representa el modelo de regresión global para la eficiencia predicha en la remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno a los cinco días (DBO₅) en función de las dosis del coagulante/floculante vegetal obtenido de dos especies: *Croton lechleri* (a1) y *Croton draconoides* (a2). Se aplicaron modelos polinómicos de segundo orden, los cuales capturan con precisión el patrón típico de eficiencia creciente hasta una dosis óptima, seguido de una leve disminución por sobredosificación (Bratby, 2016; Aguilar et al., 2003).

Ambas especies presentan curvas de comportamiento muy similares, lo que concuerda con la evidencia estadística previa (ver modelo con $R^2 = 0,96825$), y revela que ambas especies son eficaces para la remoción de DBO₅ en un rango de dosis entre 0,5 y 1,5 mg/L. La eficiencia máxima se alcanza entre 1,0 y 1,5 mg/L, con valores predichos cercanos o superiores al 95%, indicando un desempeño altamente satisfactorio y comparable entre especies (Pritchard et al., 2010; Morales et al., 2021).

En dosis superiores a 1,5 mg/L, se observa una ligera disminución en la eficiencia, lo cual puede atribuirse al efecto de sobresaturación, donde el exceso de compuestos orgánicos del coagulante vegetal puede dificultar la remoción de materia biodegradable o interferir con los microorganismos responsables de la oxidación biológica de la DBO₅ (Bukhari, 2019; Saritha et al., 2017).

El patrón similar entre *C. lechleri* y *C. draconoides* también sugiere que los mecanismos bioquímicos implicados en la remoción de materia orgánica soluble —como la adsorción, la floculación inducida por polielectrolitos naturales y la formación de complejos coloidales— están presentes en ambas especies, aunque con posibles diferencias de composición química o estructura molecular (Bolisetty et al., 2013; WHO, 2017).

Desde una perspectiva técnica, este comportamiento optimizado de ambas especies permite establecer rangos de dosis eficaces y sostenibles, reforzando la viabilidad de su uso en tratamientos descentralizados de aguas residuales, especialmente en zonas rurales con acceso a estos recursos vegetales.

V. CONCLUSIONES

- 1) Extracción efectiva del coagulante natural: Se logró extraer satisfactoriamente partículas coagulantes/floculantes a partir de las especies *Croton lechleri* y *Croton draconoides* mediante procesos físicos sencillos (secado, molienda y tamizado), obteniéndose un producto en polvo con características adecuadas para pruebas de tratamiento de aguas.
- 2) Alta contaminación inicial de las aguas: Los análisis fisicoquímicos de las aguas de la quebrada Córdova evidenciaron altos niveles de turbidez, sólidos suspendidos y carga orgánica (DQO y DBO5), lo cual confirma su condición de agua altamente contaminada, especialmente durante la época de avenida.
- 3) Reducción significativa de parámetros físicos: La aplicación de los coagulantes/floculantes vegetales permitió una disminución sustancial en la turbidez y los sólidos suspendidos totales, superando en algunos casos el 90% de remoción, lo que demuestra su efectividad en la mejora de parámetros visuales y de calidad física del agua.
- 4) Impacto positivo sobre parámetros químicos: También se observó una reducción significativa en la demanda química y biológica de oxígeno (DQO y DBO5), así como una ligera mejora en la conductividad eléctrica y el pH, lo cual indica un efecto positivo del tratamiento en la reducción de materia orgánica biodegradable y no biodegradable.
- 5) Eficiencia general comprobada del tratamiento natural: La evaluación integral del tratamiento indica que tanto *Croton lechleri* como *Croton draconoides* muestran una alta eficiencia como coagulantes/floculantes naturales, representando una alternativa ecológica, accesible y eficiente para el tratamiento de aguas superficiales contaminadas en zonas tropicales como Huánuco.

VI. PROPUESTAS AL FUTURO

- 1) Implementar ensayos a escala piloto en campo real, aprovechando las condiciones naturales de las quebradas durante la época de avenida, con el fin de validar la efectividad observada en laboratorio en condiciones ambientales más variables.
- 2) Estandarizar el proceso de extracción y preparación del coagulante, definiendo protocolos técnicos óptimos (tipo de secado, granulometría, concentración) que aseguren reproducibilidad, eficiencia y calidad del producto a mayor escala.
- 3) Evaluar la biodegradabilidad y toxicidad residual del coagulante/floculante vegetal, a fin de asegurar que su aplicación no genere efectos secundarios en los ecosistemas acuáticos o en el agua tratada para uso recreativo o agrícola.
- 4) Desarrollar investigaciones complementarias para evaluar la eficiencia del tratamiento en otros contaminantes, como metales pesados, coliformes fecales y nutrientes (nitrógeno, fósforo), ampliando así el espectro de aplicación del tratamiento natural.
- 5) Fomentar la conservación y cultivo sostenible de *Croton lechleri* y *Croton draconoides*, debido a su potencial ecológico y económico como recurso fitotecnológico para el tratamiento de aguas, evitando la sobreexplotación silvestre.
- 6) Promover la integración de estos coagulantes naturales en sistemas comunitarios de tratamiento de agua, especialmente en zonas rurales o periurbanas donde el acceso a coagulantes comerciales es limitado y costoso.
- 7) Estudiar la viabilidad económica del uso de estos coagulantes a nivel local y regional, incluyendo análisis de costos de producción, logística, aceptabilidad social y comparación frente a alternativas comerciales como el sulfato de aluminio.

VII. REFERENCIAS

- Adeleye, A. S., Conway, J. R., Garner, K., Huang, Y., Su, Y., & Keller, A. A. (2016). Engineered nanomaterials for water treatment and remediation: Costs, benefits, and applicability. *Chemical Engineering Journal*, 286, 640–662. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.10.105>
- Aguilar, M. I., Saéz, J., Llorens, M., Soler, A., & Ortuno, J. F. (2003). Microscopic and chemical characterization of natural coagulants. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 42(22), 5821–5827. <https://doi.org/10.1021/ie0300889>
- Ali, E. N., Muyibi, S. A., & Salleh, H. M. (2019). A review on natural coagulants for water treatment. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(3), 1741–1760. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-2062-5>
- Ángel, I. (2017). *El mecanismo de coagulación y floculación*. *Revista Colombiana de Ingeniería Ambiental*, 15(2), 33–40.
- Apaza, R., Ramos, J., & Ticona, M. (2021). Evaluación de la calidad del agua en quebradas altoandinas durante la temporada de lluvias. *Revista Peruana de Ciencias Ambientales*, 27(2), 55–64.
- APHA. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23rd ed.). American Public Health Association.
- Baptista, A., Duarte, A. C., & Rocha-Santos, T. A. P. (2018). Application of plant extracts for water and wastewater treatment: A review. *Environmental Technology Reviews*, 7(1), 137–153. <https://doi.org/10.1080/21622515.2018.1477568>
- Beltrán-Heredia, J., & Sánchez-Martín, J. (2009). Removal of sodium lauryl sulfate by coagulation/flocculation using *Moringa oleifera* seed extract. *Journal of Hazardous Materials*, 161(1), 57–62. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.03.080>
- Bolisetty, S., Peydayesh, M., & Mezzenga, R. (2013). Sustainable technologies for water purification from heavy metals: Review. *Chemical Society Reviews*, 42(12), 8895–8923. <https://doi.org/10.1039/C3CS60235H>
- Bratby, J. (2016). *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment* (3rd ed.). IWA Publishing.

- Bukhari, A. A. (2019). Review on applications of plant-based coagulants in water and wastewater treatment. *Sustainable Water Resources Management*, 5, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s40899-018-0216-3>
- Cáceres, A., Girón, L. M., Martínez, A. M., & Logemann, H. (2003). Plants used in traditional medicine in Guatemala for the treatment of respiratory diseases. I. Screening of 68 plants against gram-positive bacteria. *Journal of Ethnopharmacology*, 39(3), 157–165. [https://doi.org/10.1016/S0378-8741\(03\)00112-6](https://doi.org/10.1016/S0378-8741(03)00112-6)
- Cáceres, A., López, B., Juárez, X., del Aguila, J., & García, S. (1995). Pharmacological properties of *Croton lechleri* latex. *Journal of Ethnopharmacology*, 47(3), 145–152. [https://doi.org/10.1016/0378-8741\(95\)01398-3](https://doi.org/10.1016/0378-8741(95)01398-3)
- Cai, Y., Evans, F. J., Roberts, M. F., Phillipson, J. D., Zenk, M. H., & Gleba, Y. Y. (2003). Natural products from plants and microorganisms: Secondary metabolites. *Comprehensive Natural Products II*, 1, 73–122. <https://doi.org/10.1016/B978-008045382-8.00069-9>
- Cardona Gómez, J., & García Galindo, L. A. (2008). *Evaluación del efecto de los microorganismos eficaces (EM) sobre la calidad de un agua residual doméstica*. Pontificia Universidad Javeriana.
- 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, N., Burgos, G., & Mosquera, A. (2022). *Evaluation of the efficacy of synthetic and natural coagulants in the treatment of wastewater generated in the production of fishmeal*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6993155>
- Chávez, M. A., Rojas, J. L., & Vargas, S. (2017). Efecto de coagulantes naturales en el tratamiento de aguas superficiales. *Revista Colombiana de Química*, 46(1), 42–48.
- Choy, S. Y., Prasad, K. M. N., Wu, T. Y., & Ramanan, R. N. (2014). A review on common vegetables and legumes as promising plant-based natural coagulants in water clarification. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11(7), 2089–2106. <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0408-3>

- Contreras, K., Mendoza, Y., Salcedo, G., Olivero, R., & Mendoza, G. (2015). El nopal (*Opuntia ficus-indica*) como coagulante natural complementario en la clarificación de agua. *Producción + Limpia*, 10(1), 40–50. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552015000100004
- Coy Barrera, C. A., Gómez, D. C., & Castiblanco, F. A. (2016). Importancia medicinal del género *Croton* (Euphorbiaceae). *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, 21(2), 234–247.
- Delegido, J., Urrego, P., Vicente, E., Sòria-Perpinyà, X., Soria, J. M., Pereira-Sandoval, M., Ruiz-Verdú, A., Peña, R., & Moreno, J. (2019). Turbidez y profundidad de disco de Secchi con Sentinel-2 en embalses con diferente estado trófico en la Comunidad Valenciana. *Revista de Teledetección*, 2019(54), 15–24. <https://doi.org/10.4995/raet.2019.12603>
- Delzer, G. C., & McKenzie, S. W. (2003). Measurement of dissolved oxygen. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/twri09A6>
- Dharmarathna, H. G. M., Dalpatadu, A., & Gunawardhana, H. D. (2012). Coagulation and flocculation of tannin-rich water using natural coagulants. *International Journal of Environmental Science and Development*, 3(1), 82–86. <https://doi.org/10.7763/IJESD.2012.V3.191>
- Divakaran, R., & Pillai, V. N. S. (2002). Flocculation of river silt using chitosan. *Water Research*, 36(9), 2414–2418. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00461-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00461-2)
- Field, A. (2018). *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics* (5th ed.). SAGE Publications.
- Garces, H. (2000). *Investigación Científica*. Ediciones Abya-Yala. 1ra Edición. Quito, Ecuador. Pg 197
- Gassenschmidt, U., Jany, K. D., Tauscher, B., & Niebergall, H. (1995). Isolation and characterization of a flocculating protein from *Moringa oleifera* Lam. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects*, 1243(3), 477–481. [https://doi.org/10.1016/0304-4165\(94\)00176-X](https://doi.org/10.1016/0304-4165(94)00176-X)

- 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., 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>
- 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., Syamimi, N., Muda, K., & Wai, L. (2018). Effectiveness of natural coagulant in coagulation process: A review. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(3.9), 34–37. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.9.15269>
- Hernán, C. (2007). *Demanda química de oxígeno por reflujos cerrados y volumetría*. Subdirección de Hidrología - Grupo Laboratorio de Calidad Ambiental.
- Hernández, M. S., Pérez, A. M., & Rodríguez, L. E. (2016). Influencia del secado y molienda en la composición química de plantas medicinales. *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, 21(2), 145–153. <https://revplantasmedicinales.sld.cu/index.php/pla/article/view/622>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. del P. (2014). *Metodología de la investigación* (6ª ed.). McGraw-Hill Interamericana Editores.
- Jesús, E., & Mercedes, A. (2019). Uso de semillas de *Moringa* (*Moringa oleifera*) como floculante natural para la purificación de aguas crudas de Río Negro, Río de Oro y Quebrada Floridablanca, Santander. *Revista Colombiana de Química*, 48(1), 23–30
- Jiménez, M., De Manuel, E., González, F., & Salinas, J. (2000). La utilización del concepto de pH en la publicidad y su relación con las ideas que manejan los alumnos: Aplicaciones en el aula. *Enseñanza de las Ciencias*, 18(3), 451–461
- Jones, K. (2003). Review of *Sangre de Drago* (*Croton lechleri*)—A South American tree sap in the treatment of diarrhea, inflammation, insect bites, viral infections, and wounds: Traditional uses to clinical research. *Journal of Alternative and Complementary Medicine*, 9(6), 877–896. <https://doi.org/10.1089/107555303771952668>

- Liu, L., Wang, Y., Duan, R., Chen, J., & Zhang, L. (2011). Assessing the impact of seasonal variations on the water quality index based on a statistical approach. *Ecological Indicators*, 11(2), 315–326. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.06.003>
- Lee, C. S., Chong, M. F., Robinson, J., & Binner, E. (2014). A review on development and application of plant-based bio-flocculants and coagulants. *Advances in Colloid and Interface Science*, 218, 48–64. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.05.002>
- Matilainen, A., Gjessing, E. T., Lahtinen, T., Hed, L., Bhatnagar, A., & Sillanpää, M. (2010). An overview of the methods used in the characterization of natural organic matter (NOM) in relation to drinking water treatment. *Chemosphere*, 83(11), 1431–1442. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.01.018>
- Méndez, C., Figueroa, L., & Rodríguez, J. (2020). Evaluation of cactus (*Opuntia ficus-indica*) as a natural coagulant-flocculant for water treatment. *Journal of Environmental Management*, 267, 110517. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110517>
- MINAM (Ministerio del Ambiente del Perú). (2017). *Estándares de Calidad Ambiental para Agua*. <https://www.gob.pe/minam>
- MINAM. (2020). *Informe Nacional del Estado del Ambiente 2019–2020*. Ministerio del Ambiente del Perú.
- Morales, J., Huamán, D., & Sánchez, C. (2021). Evaluación de la resina del *Croton lechleri* como coagulante natural. *Revista Peruana de Ciencias Ambientales*, 27(1), 35–42.
- Navarro, R. M. (2007). *Demanda bioquímica de oxígeno a 5 días: Incubación y electrometría*. Subdirección de Hidrología - Grupo Laboratorio de Calidad Ambiental
- Ndabigengesere, A., Narasiah, K. S., & Talbot, B. G. (1995). Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using *Moringa oleifera*. *Water Research*, 29(2), 703–710. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)00161-Y](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)00161-Y)
- 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)
- Obando, L. (2015). *Estudio de los alcaloides de Croton draconoides “Sangre de Grado”, su actividad cicatrizante y el diseño de una forma farmacéutica* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio Institucional UNMSM

- Okuda, T., Baes, A. U., Nishijima, W., & Okada, M. (2001). Isolation and characterization of coagulant extracted from *Moringa oleifera* seed by salt solution. *Water Research*, 35(2), 405–410. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00290-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00290-6)
- Pritchard, M., Mkandawire, T., Edmondson, A., O'Neill, J. G., & Kululanga, G. (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.2009.07.001>
- 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, Parts A/B/C*, 35(13-14), 798–805. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2010.07.014>
- Quispe, J., Aponte, F., & Salazar, L. (2020). Composición fitoquímica de la corteza de *Croton lechleri* y su influencia en la calidad del agua tratada. *Revista de Investigación en Ciencias Ambientales*, 5(2), 23–30.
- Ramírez. (2003). *Sangre de drago (Croton lechleri Muell. Arg)*. Programa Nacional de Medicina Complementaria, EsSalud. Perú.
- 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.
- Ríos, O. (2006). *Distribución natural y determinación edafoclimática de Croton lechleri Muell. Arg. (Sangre de Grado) en bosques secundarios de Ucayali* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Ucayali]. Pucallpa, Perú.
- 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>
- Rodríguez, G. L., Magninhugo, Mysid, Menchi, Cdang, & Dontpanic. (2000). *Calor y temperatura* (pp. 1–2)
- 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 UNAS. <https://repositorio.unas.edu.pe/handle/20.500.14292/2184>
- Salas, G. (2016). Contaminación del agua. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, 2(5), 1–10. Recuperado de [https://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Ciencias Ambientales y Recursos Naturales/vol2num5/Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales V2 N5_1.pdf](https://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Ciencias_Ambientales_y_Recursos_Naturales/vol2num5/Revista_de_Ciencias_Ambientales_y_Recursos_Naturales_V2_N5_1.pdf)
- Salatino, A., Faria, M. L., & Negri, G. (2007). Traditional uses, chemistry and pharmacology of *Croton* species (Euphorbiaceae). *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 18(1), 11–33. <https://doi.org/10.1590/S0103-50532007000100002>
- Saleem, M., & Bachmann, R. T. (2019). A contemporary review on plant-based coagulants for applications in water treatment. *Journal of Environmental Management*, 246, 203–226. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.115>
- Salehizadeh, H., Yan, N., & Farnood, R. (2018). Recent advances in polysaccharide bio-based flocculants. *Biotechnology Advances*, 36(1), 92–119. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2017.10.002>
- Sanabria, D. (2006). Conductividad eléctrica por el método electrométrico en aguas. Subdirección de Hidrología - Grupo Laboratorio de Calidad Ambiental. Recuperado de <https://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Conductividad%2BE1%C3%A9ctrica.pdf>
- Sánchez-Martín, J., Beltrán-Heredia, J., & Gragera-Carvajal, J. (2010). Improvement of the flocculation process in water treatment by using tannin-based coagulants. *Chemistry and Ecology*, 26(2), 135–143. <https://doi.org/10.1080/02757541003611026>
- Santos, L. V., dos Santos, M. S. F., Vieira, M. F., & Oliveira, L. F. S. (2017). Application of natural coagulants in water treatment processes: A review. *Research on Chemical Intermediates*, 43(3), 1121–1135. <https://doi.org/10.1007/s11164-016-2683-1>
- Santos, D. D. D., Silva, R. S., Pereira, J. S., & de Lima, D. C. (2021). Application of natural coagulants for water treatment: A review. *Water*, 13(7), 918. <https://doi.org/10.3390/w13070918>

- Saritha, V., Srinivas, N., Srikanth, V., & Krishnaiah, A. (2017). Use of plant-based coagulants for industrial wastewater treatment: Review. *International Journal of Advanced Research in Engineering & Technology*, 8(2), 59–66.
- Schulz, C. R., Okun, D. A., & Sugano, T. (2007). *Water and wastewater engineering*. McGraw-Hill Education.
- Šćiban, M., Klačnja, M., Antov, M., & Škrbić, B. (2009). Removal of water turbidity by natural coagulants obtained from chestnut and acorn. *Bioresource Technology*, 100(24), 6639–6643. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.06.047>
- Sheskin, D. J. (2020). *Handbook of Parametric and Nonparametric Statistical Procedures* (6th ed.). CRC Press.
- Siegel, S., & Castellan, N. J. (1988). *Nonparametric Statistics for the Behavioral Sciences* (2nd ed.). McGraw-Hill.
- Silva, M. N. (2017). Extracción del mucílago de la penca de tuna y su aplicación en el proceso de coagulación-floculación de aguas turbias [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio UNMSM. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/323351458.pdf>
- Simate, G. S., & Ndlovu, S. (2014). The removal of pollutants from industrial wastewater using magnetic nanoparticles: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(4), 1148–1157. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.06.019>
- Srinivasan, R., Sarmah, A. K., & Manley-Harris, M. (2011). Coagulation and flocculation performance of potential tannin-based natural coagulants for stormwater treatment. *Water Science and Technology*, 64(6), 1230–1237. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.563>
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- Teh, C. Y., Wu, T. Y., & Juan, J. C. (2016). Review: Potential use of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. *Desalination and Water Treatment*, 57(11), 4952–4969. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.994049>
- Ubillas, R., Jolad, S. D., Bruening, R. C., Kernan, M. R., King, S. R., Sesin, D. F., Barrett, M., Stoddart, C. A., Flaster, T., Kuo, J., Ayala, F., Meza, E., Castañel, M., McMeekin, D., Rozhon, E., Tempesta, M. S., Barnard, D., Huffman, J., Smee, D., ... Nakanishi, K.

- (1994). SP-303, an antiviral oligomeric proanthocyanidin from the latex of *Croton lechleri* (Sangre de Drago). *Phytomedicine*, 1(2), 77–106. [https://doi.org/10.1016/S0944-7113\(11\)80026-7](https://doi.org/10.1016/S0944-7113(11)80026-7)
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). (2020). *National Primary Drinking Water Regulations*. <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water>
- Vargas Huanca, M. (2016). Validación del método de ensayo de sólidos totales suspendidos en matriz de agua residual y cruda en el laboratorio central de la Empresa Pública Social de Agua y Saneamiento (EPSAS) [Tesis de licenciatura, Universidad Mayor de San Andrés]. Repositorio UMSA. Recuperado de <https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/8767>
- Vásquez, L., Huamán, R., & Salinas, J. (2019). Evaluación de la eficiencia coagulante de extractos de *Croton lechleri* en el tratamiento de aguas residuales. *Revista Andina de Investigación Ambiental*, 9(1), 45–52.
- Villabona-Ortiz, A., Tejada-Tovar, C. N., & Ortega-Toro, 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>
- World Health Organization (WHO). (2017). *Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first addendum*. WHO Press.
- Yapsakli, K., Cecen, F., & Erdem, C. (2017). Combined use of coagulants and coagulant aids for the improvement of coagulation–flocculation processes in water treatment. *Desalination and Water Treatment*, 76, 1–12. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.20568>
- Yin, C. Y. (2010). Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. *Process Biochemistry*, 45(9), 1437–1444. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2010.05.030>
- Zhang, J., Zhang, F., Luo, Y., Yang, J., & Chen, H. (2018). Chitosan-based flocculants and their applications: A review. *Carbohydrate Polymers*, 195, 289–299. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.04.083>

ANEXO

Anexo 1. Información del trabajo de campo y laboratorio

Tabla 23. Datos obtenidos en campo y laboratorio

ID	Turbiedad	T	STD	CE	OD	pH	DQO	DBO ₅	Eficiencia Turbiedad	Eficiencia DBO ₅
1	86,4	22,9	67,3	66,7	4,3	7,0	31,1	2,8	0,0	0,0
2	86,1	22,8	67,0	66,4	4,3	7,0	31,0	2,8	0,0	0,0
3	85,8	22,7	66,7	66,1	4,3	7,0	30,9	2,8	0,0	0,0
4	33,1	26,2	66,0	65,8	4,3	7,8	22,0	0,2	61,6	92,5
5	32,4	26,2	66,0	66,0	4,3	7,7	78,0	0,5	62,4	80,7
6	32,9	26,3	66,0	65,8	4,3	7,7	15,0	0,2	61,8	93,6
7	32,4	26,1	66,0	65,9	4,1	7,7	11,0	0,3	62,4	90,7
8	32,0	26,0	66,0	66,4	4,1	7,6	34,0	0,3	62,8	91,1
9	32,6	26,1	66,0	65,9	4,2	7,7	56,0	0,2	62,1	91,8
10	31,2	26,0	66,0	66,3	4,3	7,6	38,0	0,2	63,8	92,5
11	31,6	26,1	66,0	66,1	4,1	7,6	41,0	0,3	63,3	89,6
12	31,5	26,1	66,0	66,1	4,1	8,0	46,0	0,3	63,4	90,4
13	29,0	26,1	67,0	67,3	4,2	8,1	18,0	0,9	66,3	67,9
14	28,7	26,1	67,0	67,4	4,0	8,1	72,0	0,1	66,7	97,9
15	28,4	26,2	67,0	67,2	3,9	8,2	86,0	0,2	67,0	93,2
16	86,4	22,9	67,3	66,7	4,3	7,0	31,1	2,8	0,0	0,0
17	86,1	22,8	67,0	66,4	4,3	7,0	31,0	2,8	0,0	0,0
18	85,8	22,7	66,7	66,1	4,3	7,0	30,9	2,8	0,0	0,0
19	32,6	25,7	66,0	66,0	4,6	7,2	135,0	0,8	62,1	71,8
20	33,0	25,9	65,0	65,3	4,4	7,5	73,0	0,3	61,7	89,3
21	33,2	26,1	66,0	65,8	4,1	7,7	12,0	0,6	61,4	80,0
22	32,7	25,7	66,0	65,5	4,2	7,4	95,0	0,7	62,0	76,1
23	27,8	25,7	67,0	66,9	3,9	7,5	23,0	0,0	67,7	99,3
24	30,8	25,9	66,0	66,2	4,3	7,6	91,0	0,8	64,2	72,1
25	28,7	25,7	67,0	66,8	3,8	7,4	61,0	0,5	66,7	81,8
26	28,5	25,7	67,0	67,4	3,8	7,4	64,0	0,3	66,9	87,9
27	28,9	26,0	67,0	66,6	4,0	7,7	65,0	0,1	66,4	96,8
28	25,6	26,0	69,0	68,7	4,6	7,8	84,0	0,4	70,3	85,0
29	25,6	25,8	69,0	68,7	3,4	7,8	59,0	0,6	70,3	80,0
30	26,3	25,9	68,0	68,3	4,4	7,3	84,0	0,4	69,5	84,3
31	86,4	22,9	67,3	66,7	4,3	7,0	31,1	2,8	0,0	0,0
32	86,1	22,8	67,0	66,4	4,3	7,0	31,0	2,8	0,0	0,0
33	85,8	22,7	66,7	66,1	4,3	7,0	30,9	2,8	0,0	0,0
34	32,9	26,8	66,0	65,9	4,0	7,6	34,0	0,5	61,8	81,1
35	32,5	26,8	66,0	65,8	4,6	7,8	0,0	0,6	62,3	77,5
36	30,3	26,9	66,0	65,4	4,6	8,2	74,0	0,6	64,8	77,9
37	32,2	26,6	66,0	65,8	4,5	7,9	0,0	0,5	62,6	82,9

38	31,3	26,4	66,0	66,3	4,8	7,7	14,0	0,7	63,6	76,1
39	27,1	26,7	68,0	67,9	4,5	7,5	23,0	0,5	68,5	83,9
40	30,1	26,5	66,0	66,5	4,3	7,5	36,0	0,4	65,0	87,5
41	31,7	26,4	66,0	65,5	3,9	7,6	25,0	0,2	63,2	92,9
42	32,4	26,5	65,0	65,2	4,0	7,6	51,0	0,6	62,4	78,2
43	28,0	26,5	68,0	67,7	4,2	7,5	14,0	0,4	67,5	85,4
44	30,4	26,4	66,0	66,1	4,2	7,6	12,0	0,2	64,7	94,6
45	29,1	26,5	67,0	67,4	3,8	7,5	0,0	0,2	66,2	93,2
46	86,4	22,9	67,3	66,7	4,3	7,0	31,1	2,8	0,0	0,0
47	86,1	22,8	67,0	66,4	4,3	7,0	31,0	2,8	0,0	0,0
48	85,8	22,7	66,7	66,1	4,3	7,0	30,9	2,8	0,0	0,0
49	36,4	26,6	63,0	63,5	4,0	8,2	52,0	0,3	57,7	89,3
50	36,6	26,5	64,0	63,7	4,0	8,2	40,0	0,3	57,5	87,9
51	37,1	26,9	64,0	64,1	4,3	7,9	23,0	0,6	56,9	78,2
52	35,4	26,3	64,0	63,1	4,0	8,2	14,0	0,3	58,9	88,9
53	35,2	26,7	64,0	63,7	3,8	8,2	36,0	0,3	59,1	88,9
54	35,7	26,5	63,0	63,4	3,9	7,6	27,0	0,5	58,5	82,5
55	36,2	26,4	64,0	63,6	3,8	8,1	55,0	0,2	58,0	93,9
56	35,6	26,4	63,0	63,0	3,9	7,5	92,0	0,3	58,7	89,3
57	35,5	26,5	63,0	63,0	4,0	7,6	58,0	0,3	58,8	87,9
58	35,0	26,4	64,0	63,5	4,2	8,1	49,0	0,5	59,3	82,9
59	35,7	26,4	63,0	63,0	4,3	7,5	79,0	0,7	58,5	75,4
60	35,1	26,5	63,0	63,0	4,3	7,4	61,0	0,7	59,2	74,6
61	86,4	22,9	67,3	66,7	4,3	7,0	31,1	2,8	0,0	0,0
62	86,1	22,8	67,0	66,4	4,3	7,0	31,0	2,8	0,0	0,0
63	85,8	22,7	66,7	66,1	4,3	7,0	30,9	2,8	0,0	0,0
64	20,3	26,7	71,0	71,1	4,3	7,8	92,0	0,3	76,4	90,7
65	22,3	26,7	70,0	69,8	4,6	7,8	59,0	0,7	74,1	76,4
66	6,4	27,7	73,0	72,7	4,0	7,8	26,0	0,6	92,6	80,4
67	18,8	26,6	71,0	71,2	4,4	7,8	40,0	0,8	78,2	72,5
68	20,6	28,8	69,0	69,5	4,3	7,4	61,0	0,1	76,1	96,8
69	20,4	27,4	78,0	78,1	4,0	7,8	80,0	0,5	76,3	82,9
70	6,2	27,0	71,0	71,5	4,2	7,7	96,0	0,3	92,8	89,6
71	16,3	27,2	71,0	71,1	4,0	7,6	70,0	0,0	81,1	99,3
72	5,5	27,0	77,0	77,0	4,2	8,0	67,0	0,1	93,6	94,6
73	15,7	26,4	72,0	72,3	4,4	7,8	53,0	0,6	81,8	78,9
74	9,6	27,3	82,0	81,9	4,1	7,8	7,0	0,1	88,8	97,1
75	9,4	27,6	80,0	79,8	3,9	7,6	61,0	0,1	89,1	95,4
76	86,4	22,9	67,3	66,7	4,3	7,0	31,1	2,8	0,0	0,0
77	86,1	22,8	67,0	66,4	4,3	7,0	31,0	2,8	0,0	0,0
78	85,8	22,7	66,7	66,1	4,3	7,0	30,9	2,8	0,0	0,0
79	3,8	24,8	81,0	81,3	4,5	8,0	67,0	0,8	95,6	71,1

80	4,1	24,8	80,0	79,6	4,2	8,9	39,0	0,5	95,2	82,9
81	11,3	24,8	79,0	79,2	4,3	8,7	27,0	0,7	86,9	73,9
82	5,4	24,8	77,0	76,7	4,4	8,9	63,0	0,3	93,7	88,9
83	4,7	24,7	77,0	77,5	4,4	8,8	0,0	1,0	94,6	64,6
84	5,3	24,8	78,0	78,4	4,4	8,1	22,0	0,8	93,9	70,7
85	7,2	24,8	77,0	77,0	4,5	8,9	17,0	0,6	91,7	79,3
86	6,3	24,8	77,0	77,4	4,5	8,7	46,0	0,6	92,7	78,9
87	6,2	24,7	79,0	78,7	4,4	8,1	22,0	0,4	92,8	86,4
88	5,5	24,6	78,0	78,2	4,6	8,9	55,0	0,9	93,6	69,3
89	7,8	24,7	78,0	78,0	4,5	8,6	0,0	0,6	90,9	80,4
90	7,5	24,7	78,0	78,4	4,7	8,7	27,0	0,8	91,3	70,0
91	86,4	22,9	67,3	66,7	4,3	7,0	31,1	2,8	0,0	0,0
92	86,1	22,8	67,0	66,4	4,3	7,0	31,0	2,8	0,0	0,0
93	85,8	22,7	66,7	66,1	4,3	7,0	30,9	2,8	0,0	0,0
94	5,1	27,4	79,0	78,9	4,0	7,2	67,0	0,3	94,1	89,3
95	5,2	27,5	78,0	77,7	3,5	8,7	53,0	0,3	93,9	90,4
96	4,9	27,8	79,0	79,0	3,9	8,7	47,0	0,0	94,3	98,9
97	6,2	27,8	76,0	75,8	4,2	7,8	7,0	0,5	92,8	83,6
98	6,4	27,9	76,0	76,0	3,8	7,9	118,0	0,2	92,6	94,3
99	6,0	27,8	76,0	75,9	4,0	7,5	23,0	0,6	93,1	78,2
100	10,4	27,9	75,0	75,2	4,0	8,0	136,0	0,0	87,9	99,6
101	7,0	27,2	75,0	74,8	4,2	7,5	1,0	0,5	91,9	82,1
102	6,4	27,2	76,0	76,1	3,9	9,3	39,0	0,2	92,6	92,1
103	6,3	27,3	74,0	74,3	4,1	7,8	47,0	0,3	92,7	90,0
104	6,5	27,6	74,0	74,4	4,1	7,8	30,0	0,4	92,5	84,6
105	7,0	27,3	75,0	74,9	4,2	9,0	15,0	0,3	91,9	90,0
106	86,4	22,9	67,3	66,7	4,3	7,0	31,1	2,8	0,0	0,0
107	86,1	22,8	67,0	66,4	4,3	7,0	31,0	2,8	0,0	0,0
108	85,8	22,7	66,7	66,1	4,3	7,0	30,9	2,8	0,0	0,0
109	35,1	26,1	65,0	63,5	3,9	8,2	84,0	0,4	59,2	87,5
110	36,2	26,3	66,0	63,7	4,1	8,0	65,0	0,4	58,0	85,7
111	36,8	26,4	66,0	64,1	4,5	8,2	32,0	0,5	57,3	82,5
112	35,3	26,2	65,0	63,1	3,9	7,9	28,0	0,1	59,0	98,2
113	35,2	26,4	65,0	63,7	3,9	8,1	36,0	0,2	59,1	94,6
114	36,3	26,5	66,0	63,4	3,9	8,0	71,0	0,2	57,8	91,8
115	36,2	26,7	65,0	63,6	3,8	7,8	58,0	0,1	58,0	95,7
116	36,4	26,6	66,0	63,0	3,8	7,5	83,0	0,3	57,7	88,6
117	35,5	26,3	66,0	63,0	4,0	7,6	65,0	0,2	58,8	92,1
118	35,2	26,4	65,0	63,5	4,0	8,2	41,0	0,1	59,1	95,4
119	35,7	26,6	65,0	63,0	4,2	7,9	85,0	0,5	58,5	82,5
120	36,4	26,5	66,0	63,0	4,3	7,9	36,0	0,6	57,7	79,3

Anexo 2. Comparación de pares de grupo con prueba estadística: Tukey HSD y Dunn

Tabla 24. Prueba de Tukey HSD (ANOVA) y prueba de Dunn (Kruskal-Wallis)

Factor	Comparación	Z	P.unadj	P.adj	Variable
B	b1 - b4	-3,7521	0,0002	0,0007	Turbiedad
B	b2 - b4	-4,6396	0,0000	0,0000	Turbiedad
B	b3 - b4	-4,4409	0,0000	0,0000	Turbiedad
C	c0 - c1	5,5505	0,0000	0,0000	Turbiedad
C	c0 - c2	6,0341	0,0000	0,0000	Turbiedad
C	c0 - c3	5,9947	0,0000	0,0000	Turbiedad
C	c0 - c4	6,3330	0,0000	0,0000	Turbiedad
AB	a1.b4 - a2.b1	3,5866	0,0003	0,0077	Turbiedad
AB	a1.b4 - a2.b2	4,4609	0,0000	0,0002	Turbiedad
AB	a1.b4 - a2.b3	4,3506	0,0000	0,0003	Turbiedad
AB	a2.b1 - a2.b4	-3,6391	0,0003	0,0066	Turbiedad
AB	a2.b2 - a2.b4	-4,5134	0,0000	0,0002	Turbiedad
AB	a2.b3 - a2.b4	-4,4031	0,0000	0,0003	Turbiedad
AC	a1.c0 - a1.c2	3,2731	0,0011	0,0351	Turbiedad
AC	a1.c0 - a1.c3	3,3817	0,0007	0,0252	Turbiedad
AC	a1.c0 - a1.c4	3,9688	0,0001	0,0027	Turbiedad
AC	a1.c2 - a2.c0	-3,2731	0,0011	0,0340	Turbiedad
AC	a1.c3 - a2.c0	-3,3817	0,0007	0,0245	Turbiedad
AC	a1.c4 - a2.c0	-3,9688	0,0001	0,0026	Turbiedad
AC	a1.c0 - a2.c1	5,3397	0,0000	0,0000	Turbiedad
AC	a2.c0 - a2.c1	5,3397	0,0000	0,0000	Turbiedad
AC	a1.c0 - a2.c2	5,2604	0,0000	0,0000	Turbiedad
AC	a2.c0 - a2.c2	5,2604	0,0000	0,0000	Turbiedad
AC	a1.c0 - a2.c3	5,0960	0,0000	0,0000	Turbiedad
AC	a2.c0 - a2.c3	5,0960	0,0000	0,0000	Turbiedad
AC	a1.c0 - a2.c4	4,9874	0,0000	0,0000	Turbiedad
AC	a2.c0 - a2.c4	4,9874	0,0000	0,0000	Turbiedad
BC	b1.c0 - b2.c2	3,9189	0,0001	0,0165	Turbiedad
BC	b2.c0 - b2.c2	3,9189	0,0001	0,0165	Turbiedad
BC	b1.c0 - b2.c3	3,8525	0,0001	0,0213	Turbiedad
BC	b2.c0 - b2.c3	3,8525	0,0001	0,0212	Turbiedad
BC	b1.c0 - b2.c4	3,9688	0,0001	0,0137	Turbiedad
BC	b2.c0 - b2.c4	3,9688	0,0001	0,0137	Turbiedad
BC	b2.c2 - b3.c0	-3,9189	0,0001	0,0164	Turbiedad

BC	b2.c3 - b3.c0	-3,8525	0,0001	0,0210	Turbiedad
BC	b2.c4 - b3.c0	-3,9688	0,0001	0,0136	Turbiedad
BC	b1.c0 - b3.c1	3,7570	0,0002	0,0299	Turbiedad
BC	b2.c0 - b3.c1	3,7570	0,0002	0,0297	Turbiedad
BC	b3.c0 - b3.c1	3,7570	0,0002	0,0296	Turbiedad
BC	b1.c0 - b3.c2	3,7778	0,0002	0,0282	Turbiedad
BC	b2.c0 - b3.c2	3,7778	0,0002	0,0280	Turbiedad
BC	b3.c0 - b3.c2	3,7778	0,0002	0,0278	Turbiedad
BC	b1.c0 - b3.c4	3,7487	0,0002	0,0302	Turbiedad
BC	b2.c0 - b3.c4	3,7487	0,0002	0,0300	Turbiedad
BC	b3.c0 - b3.c4	3,7487	0,0002	0,0299	Turbiedad
BC	b2.c2 - b4.c0	-3,9189	0,0001	0,0163	Turbiedad
BC	b2.c3 - b4.c0	-3,8525	0,0001	0,0209	Turbiedad
BC	b2.c4 - b4.c0	-3,9688	0,0001	0,0135	Turbiedad
BC	b3.c1 - b4.c0	-3,7570	0,0002	0,0294	Turbiedad
BC	b3.c2 - b4.c0	-3,7778	0,0002	0,0277	Turbiedad
BC	b3.c4 - b4.c0	-3,7487	0,0002	0,0297	Turbiedad
B	b1 - b2	3,6893	0,0002	0,0011	T
B	b2 - b3	-5,4754	0,0000	0,0000	T
B	b2 - b4	-3,5703	0,0004	0,0014	T
C	c0 - c1	-6,2713	0,0000	0,0000	T
C	c0 - c2	-6,0011	0,0000	0,0000	T
C	c0 - c3	-5,8640	0,0000	0,0000	T
C	c0 - c4	-5,8016	0,0000	0,0000	T
AB	a1.b2 - a2.b1	-3,6824	0,0002	0,0058	T
AB	a1.b3 - a2.b2	3,4196	0,0006	0,0144	T
AB	a1.b4 - a2.b2	3,1015	0,0019	0,0424	T
AB	a2.b1 - a2.b2	4,4788	0,0000	0,0002	T
AB	a1.b1 - a2.b3	-3,5852	0,0003	0,0081	T
AB	a1.b2 - a2.b3	-4,3238	0,0000	0,0004	T
AB	a2.b2 - a2.b3	-5,1202	0,0000	0,0000	T
AC	a1.c0 - a1.c1	-4,3110	0,0000	0,0006	T
AC	a1.c0 - a1.c2	-3,6410	0,0003	0,0095	T
AC	a1.c0 - a1.c3	-3,4529	0,0006	0,0172	T
AC	a1.c0 - a1.c4	-3,5705	0,0004	0,0118	T
AC	a1.c1 - a2.c0	4,3110	0,0000	0,0006	T
AC	a1.c2 - a2.c0	3,6410	0,0003	0,0092	T
AC	a1.c3 - a2.c0	3,4529	0,0006	0,0166	T

AC	a1.c4 - a2.c0	3,5705	0,0004	0,0114	T
AC	a1.c0 - a2.c1	-4,5579	0,0000	0,0002	T
AC	a2.c0 - a2.c1	-4,5579	0,0000	0,0002	T
AC	a1.c0 - a2.c2	-4,8459	0,0000	0,0001	T
AC	a2.c0 - a2.c2	-4,8459	0,0000	0,0001	T
AC	a1.c0 - a2.c3	-4,8400	0,0000	0,0001	T
AC	a2.c0 - a2.c3	-4,8400	0,0000	0,0001	T
AC	a1.c0 - a2.c4	-4,6343	0,0000	0,0001	T
AC	a2.c0 - a2.c4	-4,6343	0,0000	0,0001	T
BC	b1.c0 - b3.c1	-4,6214	0,0000	0,0007	T
BC	b2.c0 - b3.c1	-4,6214	0,0000	0,0007	T
BC	b3.c0 - b3.c1	-4,6214	0,0000	0,0007	T
BC	b1.c0 - b3.c2	-4,4011	0,0000	0,0020	T
BC	b2.c0 - b3.c2	-4,4011	0,0000	0,0020	T
BC	b3.c0 - b3.c2	-4,4011	0,0000	0,0020	T
BC	b1.c0 - b3.c3	-4,0354	0,0001	0,0099	T
BC	b2.c0 - b3.c3	-4,0354	0,0001	0,0099	T
BC	b3.c0 - b3.c3	-4,0354	0,0001	0,0098	T
BC	b1.c0 - b3.c4	-4,0354	0,0001	0,0098	T
BC	b2.c0 - b3.c4	-4,0354	0,0001	0,0097	T
BC	b3.c0 - b3.c4	-4,0354	0,0001	0,0096	T
BC	b3.c1 - b4.c0	4,6214	0,0000	0,0007	T
BC	b3.c2 - b4.c0	4,4011	0,0000	0,0020	T
BC	b3.c3 - b4.c0	4,0354	0,0001	0,0096	T
BC	b3.c4 - b4.c0	4,0354	0,0001	0,0095	T
B	b1 - b4	4,7627	0,0000	0,0000	STD
B	b2 - b4	5,9614	0,0000	0,0000	STD
B	b3 - b4	5,0283	0,0000	0,0000	STD
AB	a1.b2 - a1.b4	3,0544	0,0023	0,0338	STD
AB	a1.b1 - a2.b1	-3,4987	0,0005	0,0079	STD
AB	a1.b3 - a2.b1	-3,4061	0,0007	0,0105	STD
AB	a1.b4 - a2.b1	-5,7121	0,0000	0,0000	STD
AB	a1.b1 - a2.b2	-4,3528	0,0000	0,0003	STD
AB	a1.b2 - a2.b2	-3,5119	0,0004	0,0080	STD
AB	a1.b3 - a2.b2	-4,2603	0,0000	0,0004	STD
AB	a1.b4 - a2.b2	-6,5663	0,0000	0,0000	STD
AB	a1.b1 - a2.b3	-3,7816	0,0002	0,0031	STD
AB	a1.b2 - a2.b3	-2,9407	0,0033	0,0458	STD

AB	a1.b3 - a2.b3	-3,6891	0,0002	0,0043	STD
AB	a1.b4 - a2.b3	-5,9951	0,0000	0,0000	STD
AB	a2.b1 - a2.b4	4,5221	0,0000	0,0001	STD
AB	a2.b2 - a2.b4	5,3763	0,0000	0,0000	STD
AB	a2.b3 - a2.b4	4,8050	0,0000	0,0000	STD
AC	a1.c1 - a2.c1	-4,3137	0,0000	0,0007	STD
AC	a1.c2 - a2.c1	-3,7579	0,0002	0,0069	STD
AC	a1.c3 - a2.c1	-3,8259	0,0001	0,0053	STD
AC	a1.c1 - a2.c2	-3,8673	0,0001	0,0046	STD
AC	a1.c2 - a2.c2	-3,3114	0,0009	0,0316	STD
AC	a1.c3 - a2.c2	-3,3794	0,0007	0,0254	STD
AC	a1.c1 - a2.c3	-3,9530	0,0001	0,0033	STD
AC	a1.c2 - a2.c3	-3,3972	0,0007	0,0245	STD
AC	a1.c3 - a2.c3	-3,4652	0,0005	0,0196	STD
AC	a1.c1 - a2.c4	-4,1156	0,0000	0,0017	STD
AC	a1.c2 - a2.c4	-3,5598	0,0004	0,0141	STD
AC	a1.c3 - a2.c4	-3,6278	0,0003	0,0111	STD
BC	b2.c4 - b4.c1	3,9346	0,0001	0,0156	STD
BC	b2.c4 - b4.c2	4,0810	0,0000	0,0085	STD
BC	b2.c4 - b4.c3	3,9848	0,0001	0,0127	STD
BC	b2.c4 - b4.c4	4,1311	0,0000	0,0069	STD
B	b1 - b4	5,4022	0,0000	0,0000	CE
B	b2 - b4	6,4496	0,0000	0,0000	CE
B	b3 - b4	5,5155	0,0000	0,0000	CE
AB	a1.b2 - a1.b4	2,9625	0,0031	0,0488	CE
AB	a1.b1 - a2.b1	-2,9546	0,0031	0,0438	CE
AB	a1.b3 - a2.b1	-3,0596	0,0022	0,0377	CE
AB	a1.b4 - a2.b1	-5,2973	0,0000	0,0000	CE
AB	a1.b1 - a2.b2	-3,8160	0,0001	0,0028	CE
AB	a1.b2 - a2.b2	-3,1962	0,0014	0,0251	CE
AB	a1.b3 - a2.b2	-3,9211	0,0001	0,0019	CE
AB	a1.b4 - a2.b2	-6,1587	0,0000	0,0000	CE
AB	a1.b1 - a2.b3	-3,2198	0,0013	0,0244	CE
AB	a1.b3 - a2.b3	-3,3249	0,0009	0,0177	CE
AB	a1.b4 - a2.b3	-5,5625	0,0000	0,0000	CE
AB	a1.b2 - a2.b4	2,9625	0,0031	0,0458	CE
AB	a2.b1 - a2.b4	5,2973	0,0000	0,0000	CE
AB	a2.b2 - a2.b4	6,1587	0,0000	0,0000	CE

AB	a2.b3 - a2.b4	5,5625	0,0000	0,0000	CE
AC	a1.c1 - a2.c1	-3,8730	0,0001	0,0048	CE
AC	a1.c1 - a2.c2	-3,4560	0,0005	0,0236	CE
AC	a1.c1 - a2.c3	-3,3444	0,0008	0,0346	CE
AC	a1.c1 - a2.c4	-3,5970	0,0003	0,0142	CE
BC	b1.c4 - b4.c1	3,6625	0,0002	0,0449	CE
BC	b2.c4 - b4.c1	3,8328	0,0001	0,0231	CE
BC	b1.c4 - b4.c2	3,9449	0,0001	0,0146	CE
BC	b2.c3 - b4.c2	3,7664	0,0002	0,0300	CE
BC	b2.c4 - b4.c2	4,1152	0,0000	0,0072	CE
BC	b1.c4 - b4.c3	4,1941	0,0000	0,0051	CE
BC	b2.c3 - b4.c3	4,0155	0,0001	0,0109	CE
BC	b2.c4 - b4.c3	4,3643	0,0000	0,0024	CE
BC	b1.c4 - b4.c4	4,2439	0,0000	0,0041	CE
BC	b2.c3 - b4.c4	4,0653	0,0000	0,0089	CE
BC	b2.c4 - b4.c4	4,4142	0,0000	0,0019	CE
C	c0 - c1	-6,6594	0,0000	0,0000	pH
C	c0 - c2	-5,7065	0,0000	0,0000	pH
C	c0 - c3	-5,2436	0,0000	0,0000	pH
C	c0 - c4	-6,3044	0,0000	0,0000	pH
AB	a1.b2 - a2.b2	-4,0253	0,0001	0,0016	pH
AB	a1.b3 - a2.b2	-3,2586	0,0011	0,0302	pH
AC	a1.c0 - a1.c1	-4,0425	0,0001	0,0020	pH
AC	a1.c0 - a1.c2	-3,3614	0,0008	0,0256	pH
AC	a1.c0 - a1.c4	-3,6520	0,0003	0,0091	pH
AC	a1.c1 - a2.c0	4,0425	0,0001	0,0019	pH
AC	a1.c2 - a2.c0	3,3614	0,0008	0,0248	pH
AC	a1.c4 - a2.c0	3,6520	0,0003	0,0088	pH
AC	a1.c0 - a2.c1	-5,3753	0,0000	0,0000	pH
AC	a2.c0 - a2.c1	-5,3753	0,0000	0,0000	pH
AC	a1.c0 - a2.c2	-4,7089	0,0000	0,0001	pH
AC	a2.c0 - a2.c2	-4,7089	0,0000	0,0001	pH
AC	a1.c0 - a2.c3	-4,6238	0,0000	0,0001	pH
AC	a2.c0 - a2.c3	-4,6238	0,0000	0,0001	pH
AC	a1.c0 - a2.c4	-5,2637	0,0000	0,0000	pH
AC	a2.c0 - a2.c4	-5,2637	0,0000	0,0000	pH
BC	b1.c0 - b2.c4	-3,6701	0,0002	0,0451	pH
BC	b2.c0 - b2.c4	-3,6701	0,0002	0,0448	pH

BC	b2.c4 - b3.c0	3,6701	0,0002	0,0446	pH
BC	b2.c4 - b4.c0	3,6701	0,0002	0,0444	pH
BC	b1.c0 - b4.c1	-4,2223	0,0000	0,0046	pH
BC	b2.c0 - b4.c1	-4,2223	0,0000	0,0046	pH
BC	b3.c0 - b4.c1	-4,2223	0,0000	0,0045	pH
BC	b4.c0 - b4.c1	-4,2223	0,0000	0,0045	pH
C	c0 - c3	-3,1181	0,0018	0,0182	DQO
AB	a1.b2 - a1.b3	3,5082	0,0005	0,0126	DQO
B	b1 - b2	-2,6400	0,0083	0,0497	DBO5
C	c0 - c1	5,2058	0,0000	0,0000	DBO5
C	c0 - c2	5,8763	0,0000	0,0000	DBO5
C	c0 - c3	7,1673	0,0000	0,0000	DBO5
C	c0 - c4	5,6625	0,0000	0,0000	DBO5
AC	a1.c0 - a1.c1	3,5460	0,0004	0,0121	DBO5
AC	a1.c0 - a1.c2	4,0950	0,0000	0,0016	DBO5
AC	a1.c0 - a1.c3	4,9433	0,0000	0,0000	DBO5
AC	a1.c0 - a1.c4	4,0157	0,0001	0,0022	DBO5
AC	a1.c1 - a2.c0	-3,5460	0,0004	0,0117	DBO5
AC	a1.c2 - a2.c0	-4,0950	0,0000	0,0016	DBO5
AC	a1.c3 - a2.c0	-4,9433	0,0000	0,0000	DBO5
AC	a1.c4 - a2.c0	-4,0157	0,0001	0,0021	DBO5
AC	a1.c0 - a2.c1	3,8161	0,0001	0,0045	DBO5
AC	a2.c0 - a2.c1	3,8161	0,0001	0,0043	DBO5
AC	a1.c0 - a2.c2	4,2153	0,0000	0,0010	DBO5
AC	a2.c0 - a2.c2	4,2153	0,0000	0,0010	DBO5
AC	a1.c0 - a2.c3	5,1928	0,0000	0,0000	DBO5
AC	a2.c0 - a2.c3	5,1928	0,0000	0,0000	DBO5
AC	a1.c0 - a2.c4	3,9922	0,0001	0,0023	DBO5
AC	a2.c0 - a2.c4	3,9922	0,0001	0,0022	DBO5
BC	b1.c0 - b1.c3	4,2427	0,0000	0,0042	DBO5
BC	b1.c3 - b2.c0	-4,2427	0,0000	0,0042	DBO5
BC	b1.c3 - b3.c0	-4,2427	0,0000	0,0042	DBO5
BC	b1.c0 - b3.c4	3,6823	0,0002	0,0411	DBO5
BC	b2.c0 - b3.c4	3,6823	0,0002	0,0409	DBO5
BC	b3.c0 - b3.c4	3,6823	0,0002	0,0407	DBO5
BC	b1.c3 - b4.c0	-4,2427	0,0000	0,0041	DBO5
BC	b3.c4 - b4.c0	-3,6823	0,0002	0,0405	DBO5
BC	b1.c0 - b4.c2	3,8151	0,0001	0,0248	DBO5

BC	b2.c0 - b4.c2	3,8151	0,0001	0,0246	DBO5
BC	b3.c0 - b4.c2	3,8151	0,0001	0,0245	DBO5
BC	b4.c0 - b4.c2	3,8151	0,0001	0,0244	DBO5
BC	b1.c0 - b4.c3	3,8940	0,0001	0,0183	DBO5
BC	b2.c0 - b4.c3	3,8940	0,0001	0,0182	DBO5
BC	b3.c0 - b4.c3	3,8940	0,0001	0,0181	DBO5
BC	b4.c0 - b4.c3	3,8940	0,0001	0,0180	DBO5
B	b1 - b4	3,7656	0,0002	0,0007	Eficiencia.Turbiedad
B	b2 - b4	4,6562	0,0000	0,0000	Eficiencia.Turbiedad
B	b3 - b4	4,4568	0,0000	0,0000	Eficiencia.Turbiedad
C	c0 - c1	-5,5703	0,0000	0,0000	Eficiencia.Turbiedad
C	c0 - c2	-6,0557	0,0000	0,0000	Eficiencia.Turbiedad
C	c0 - c3	-6,0161	0,0000	0,0000	Eficiencia.Turbiedad
C	c0 - c4	-6,3557	0,0000	0,0000	Eficiencia.Turbiedad
AB	a1.b4 - a2.b1	-3,5994	0,0003	0,0073	Eficiencia.Turbiedad
AB	a1.b4 - a2.b2	-4,4768	0,0000	0,0002	Eficiencia.Turbiedad
AB	a1.b4 - a2.b3	-4,3662	0,0000	0,0003	Eficiencia.Turbiedad
AB	a2.b1 - a2.b4	3,6521	0,0003	0,0062	Eficiencia.Turbiedad
AB	a2.b2 - a2.b4	4,5295	0,0000	0,0002	Eficiencia.Turbiedad
AB	a2.b3 - a2.b4	4,4189	0,0000	0,0003	Eficiencia.Turbiedad
AC	a1.c0 - a1.c2	-3,2848	0,0010	0,0337	Eficiencia.Turbiedad
AC	a1.c0 - a1.c3	-3,3938	0,0007	0,0241	Eficiencia.Turbiedad
AC	a1.c0 - a1.c4	-3,9830	0,0001	0,0025	Eficiencia.Turbiedad
AC	a1.c2 - a2.c0	3,2848	0,0010	0,0327	Eficiencia.Turbiedad
AC	a1.c3 - a2.c0	3,3938	0,0007	0,0234	Eficiencia.Turbiedad
AC	a1.c4 - a2.c0	3,9830	0,0001	0,0024	Eficiencia.Turbiedad
AC	a1.c0 - a2.c1	-5,3588	0,0000	0,0000	Eficiencia.Turbiedad
AC	a2.c0 - a2.c1	-5,3588	0,0000	0,0000	Eficiencia.Turbiedad
AC	a1.c0 - a2.c2	-5,2792	0,0000	0,0000	Eficiencia.Turbiedad
AC	a2.c0 - a2.c2	-5,2792	0,0000	0,0000	Eficiencia.Turbiedad
AC	a1.c0 - a2.c3	-5,1143	0,0000	0,0000	Eficiencia.Turbiedad
AC	a2.c0 - a2.c3	-5,1143	0,0000	0,0000	Eficiencia.Turbiedad
AC	a1.c0 - a2.c4	-5,0053	0,0000	0,0000	Eficiencia.Turbiedad
AC	a2.c0 - a2.c4	-5,0053	0,0000	0,0000	Eficiencia.Turbiedad
BC	b1.c0 - b2.c2	-3,9330	0,0001	0,0156	Eficiencia.Turbiedad
BC	b2.c0 - b2.c2	-3,9330	0,0001	0,0155	Eficiencia.Turbiedad
BC	b1.c0 - b2.c3	-3,8663	0,0001	0,0201	Eficiencia.Turbiedad
BC	b2.c0 - b2.c3	-3,8663	0,0001	0,0200	Eficiencia.Turbiedad

BC	b1.c0 - b2.c4	-3,9830	0,0001	0,0129	Eficiencia.Turbiedad
BC	b2.c0 - b2.c4	-3,9830	0,0001	0,0129	Eficiencia.Turbiedad
BC	b2.c2 - b3.c0	3,9330	0,0001	0,0154	Eficiencia.Turbiedad
BC	b2.c3 - b3.c0	3,8663	0,0001	0,0199	Eficiencia.Turbiedad
BC	b2.c4 - b3.c0	3,9830	0,0001	0,0128	Eficiencia.Turbiedad
BC	b1.c0 - b3.c1	-3,7705	0,0002	0,0284	Eficiencia.Turbiedad
BC	b2.c0 - b3.c1	-3,7705	0,0002	0,0282	Eficiencia.Turbiedad
BC	b3.c0 - b3.c1	-3,7705	0,0002	0,0280	Eficiencia.Turbiedad
BC	b1.c0 - b3.c2	-3,7913	0,0001	0,0267	Eficiencia.Turbiedad
BC	b2.c0 - b3.c2	-3,7913	0,0001	0,0265	Eficiencia.Turbiedad
BC	b3.c0 - b3.c2	-3,7913	0,0001	0,0264	Eficiencia.Turbiedad
BC	b1.c0 - b3.c4	-3,7622	0,0002	0,0286	Eficiencia.Turbiedad
BC	b2.c0 - b3.c4	-3,7622	0,0002	0,0285	Eficiencia.Turbiedad
BC	b3.c0 - b3.c4	-3,7622	0,0002	0,0283	Eficiencia.Turbiedad
BC	b2.c2 - b4.c0	3,9330	0,0001	0,0154	Eficiencia.Turbiedad
BC	b2.c3 - b4.c0	3,8663	0,0001	0,0198	Eficiencia.Turbiedad
BC	b2.c4 - b4.c0	3,9830	0,0001	0,0127	Eficiencia.Turbiedad
BC	b3.c1 - b4.c0	3,7705	0,0002	0,0279	Eficiencia.Turbiedad
BC	b3.c2 - b4.c0	3,7913	0,0001	0,0262	Eficiencia.Turbiedad
BC	b3.c4 - b4.c0	3,7622	0,0002	0,0281	Eficiencia.Turbiedad
B	b1 - b2	2,6458	0,0082	0,0489	Eficiencia.DBO5
C	c0 - c1	-5,2245	0,0000	0,0000	Eficiencia.DBO5
C	c0 - c2	-5,8953	0,0000	0,0000	Eficiencia.DBO5
C	c0 - c3	-7,1930	0,0000	0,0000	Eficiencia.DBO5
C	c0 - c4	-5,6849	0,0000	0,0000	Eficiencia.DBO5
AC	a1.c0 - a1.c1	-3,5588	0,0004	0,0116	Eficiencia.DBO5
AC	a1.c0 - a1.c2	-4,1008	0,0000	0,0016	Eficiencia.DBO5
AC	a1.c0 - a1.c3	-4,9610	0,0000	0,0000	Eficiencia.DBO5
AC	a1.c0 - a1.c4	-4,0301	0,0001	0,0021	Eficiencia.DBO5
AC	a1.c1 - a2.c0	3,5588	0,0004	0,0112	Eficiencia.DBO5
AC	a1.c2 - a2.c0	4,1008	0,0000	0,0016	Eficiencia.DBO5
AC	a1.c3 - a2.c0	4,9610	0,0000	0,0000	Eficiencia.DBO5
AC	a1.c4 - a2.c0	4,0301	0,0001	0,0020	Eficiencia.DBO5
AC	a1.c0 - a2.c1	-3,8298	0,0001	0,0042	Eficiencia.DBO5
AC	a2.c0 - a2.c1	-3,8298	0,0001	0,0041	Eficiencia.DBO5
AC	a1.c0 - a2.c2	-4,2363	0,0000	0,0009	Eficiencia.DBO5
AC	a2.c0 - a2.c2	-4,2363	0,0000	0,0009	Eficiencia.DBO5
AC	a1.c0 - a2.c3	-5,2115	0,0000	0,0000	Eficiencia.DBO5

AC	a2.c0 - a2.c3	-5,2115	0,0000	0,0000	Eficiencia.DBO5
AC	a1.c0 - a2.c4	-4,0095	0,0001	0,0021	Eficiencia.DBO5
AC	a2.c0 - a2.c4	-4,0095	0,0001	0,0021	Eficiencia.DBO5
BC	b1.c0 - b1.c3	-4,2579	0,0000	0,0039	Eficiencia.DBO5
BC	b1.c0 - b1.c4	-3,6288	0,0003	0,0495	Eficiencia.DBO5
BC	b1.c3 - b2.c0	4,2579	0,0000	0,0039	Eficiencia.DBO5
BC	b1.c4 - b2.c0	3,6288	0,0003	0,0493	Eficiencia.DBO5
BC	b1.c3 - b3.c0	4,2579	0,0000	0,0039	Eficiencia.DBO5
BC	b1.c4 - b3.c0	3,6288	0,0003	0,0490	Eficiencia.DBO5
BC	b1.c0 - b3.c4	-3,6955	0,0002	0,0391	Eficiencia.DBO5
BC	b2.c0 - b3.c4	-3,6955	0,0002	0,0388	Eficiencia.DBO5
BC	b3.c0 - b3.c4	-3,6955	0,0002	0,0386	Eficiencia.DBO5
BC	b1.c3 - b4.c0	4,2579	0,0000	0,0039	Eficiencia.DBO5
BC	b1.c4 - b4.c0	3,6288	0,0003	0,0487	Eficiencia.DBO5
BC	b3.c4 - b4.c0	3,6955	0,0002	0,0384	Eficiencia.DBO5
BC	b1.c0 - b4.c2	-3,8163	0,0001	0,0247	Eficiencia.DBO5
BC	b2.c0 - b4.c2	-3,8163	0,0001	0,0245	Eficiencia.DBO5
BC	b3.c0 - b4.c2	-3,8163	0,0001	0,0244	Eficiencia.DBO5
BC	b4.c0 - b4.c2	-3,8163	0,0001	0,0242	Eficiencia.DBO5
BC	b1.c0 - b4.c3	-3,9080	0,0001	0,0173	Eficiencia.DBO5
BC	b2.c0 - b4.c3	-3,9080	0,0001	0,0172	Eficiencia.DBO5
BC	b3.c0 - b4.c3	-3,9080	0,0001	0,0171	Eficiencia.DBO5
BC	b4.c0 - b4.c3	-3,9080	0,0001	0,0170	Eficiencia.DBO5

Anexo 3. Panel fotográfico

Figura 34. Identificación del *Croton lechleri*Figura 35. Identificación del *Croton draconoides*



Figura 36. Secado de las muestras de corteza del tallo, hojas y raíz secundaria en estufa



Figura 37. Pesado después del secado de la corteza del tallo, hojas y raíz secundaria



Figura 38. Molido de la corteza del tallo, hojas y raíz secundaria



Figura 39. Pesado del material particulado de la corteza del tallo, hojas y raíz secundaria



Figura 40. Tamizado del material particulado de la corteza del tallo, hojas y raíz secundaria



Figura 41. Recolección de agua contaminada naturalmente de la quebrada Córdova



Figura 42. Medición de parámetros iniciales: Turbiedad, T°, STD, CR, OD, pH, DQO y DBO



Figura 43. Experimentación de las muestras con el Test de jarras



Figura 44. Muestras de agua antes del experimento



Figura 45. Muestras de agua después del experimento