

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Evaluación de la remoción de color por adsorción a nivel de laboratorio
en agua de la industria textil utilizando residuos de palma africana

Trabajo de graduación presentado por Alejandro Urruela Godoy en modalidad de
tesis para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química Industrial

Guatemala,

2025

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería




Evaluación de la remoción de color por adsorción a nivel de laboratorio
en agua de la industria textil utilizando residuos de palma africana

Trabajo de graduación presentado por Alejandro Urruela Godoy en modalidad de
tesis para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química Industrial

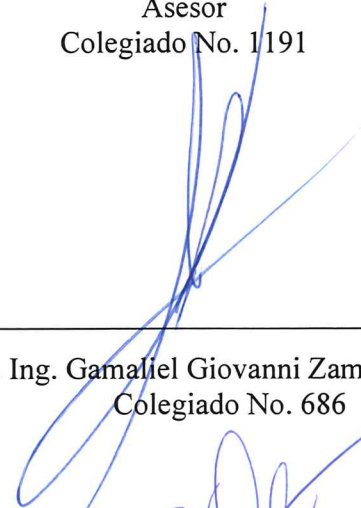
Guatemala,

2025


Vo. Bo.:

(f) 
MSc. Ing. Luis Ernesto Núñez Gonzáles
Asesor
Colegiado No. 1191

Tribunal examinador:

(f) 
MSc. Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano
Colegiado No. 686

(f) 
MSc. Ing. Carmen Alicia Ortíz Pineda
Colegiado No. 693

(f) 
MSc. Ing. Luis Ernesto Núñez Gonzáles
Colegiado No. 1191

Fecha de aprobación: Guatemala, 9 de diciembre de 2025

PREFACIO

“Todo lo puedo en Cristo que me fortalece.” — Filipenses 4:13

Este trabajo de graduación lo dedico, en primer lugar, a Dios, fuente de vida, sabiduría y fortaleza, por su infinito amor y por acompañarme en cada paso de este camino académico y personal. También se lo dedico a la Virgen María, madre amorosa que con su intercesión y cuidado me ha sostenido y guiado en los momentos de dificultad y en las alegrías de mi vida.

Quiero agradecerle a mi mamá, Ana Cristina Godoy de Urruela, por su apoyo incondicional, por su cariño inmenso y por ser la mejor mamá del mundo. Esta tesis también le pertenece a ella, porque sin su guía, sus oraciones y su ternura no habría llegado hasta aquí. Este logro es un reflejo del amor y la entrega que siempre le han caracterizado.

Quiero agradecerle a mi papá, Alejandro Urruela Aguirre, por su cariño sincero, por enseñarme con su ejemplo lo que significa trabajar por lo que uno quiere, por darme todo sin esperar nada a cambio y por ser el mejor papá del mundo. Le agradezco también por su guía constante, que me ha orientado en los momentos más importantes de mi vida y en la realización de este logro académico.

Quiero agradecerle a mi hermano, Jorge Eduardo Urruela Godoy, por ser una guía en mi vida y un ejemplo de persona a seguir. Su apoyo, sus consejos y su forma de enfrentar la vida me han inspirado profundamente, y este logro académico también refleja el impacto positivo que ha tenido en mí.

Quiero agradecerle a mi hermanita, Paulina Urruela Godoy, por enseñarme con su ejemplo lo que significa querer y poder alcanzar las metas dando siempre el 100%. Su esfuerzo y dedicación me inspiran a ser mejor cada día, y este trabajo también lleva parte de la motivación que ella me transmite.

Quiero agradecerles a mis abuelas, Marialice Cofiño de Godoy y Florence Aguirre de Urruela, por estar siempre para mí, por su cariño inagotable y por cada palabra de aliento que me

han regalado. Su presencia en mi vida ha sido un apoyo invaluable y un recordatorio constante de la fuerza y ternura que solo una abuela puede dar. Este logro también es suyo, porque en cada paso de este camino sentí el respaldo de su amor.

Quiero agradecerles a todos mis familiares que, de una u otra forma, me han ayudado a lo largo de este proceso para poder llevar a cabo esta tesis. Cada gesto de apoyo, cada palabra de ánimo y cada muestra de cariño han sido fundamentales para mantenerme firme y seguir adelante hasta alcanzar esta meta.

Quiero agradecerles a mis amigos de la universidad, en especial a Gabriela, Marysolina, Natalia, Astrid, Andrés, Diego y Santiago, por ser más que compañeros de clase: por ser verdaderos amigos. Gracias por acompañarme en este camino, por ayudarme en los momentos difíciles y por tantas risas compartidas que muchas veces fueron la razón para querer ir a la universidad. Este logro también les pertenece, porque su amistad hizo que el recorrido fuera más llevadero y lleno de recuerdos inolvidables.

Quiero agradecerles a mis amigos del colegio, en especial a Santiago, Garrick, Estuardo, Alejandro, Mateo, Rodrigo, Julián, André, Andrés, Marko, Juan Diego y Samantha, por su amistad sincera y constante a lo largo de tantos años. A pesar de las distancias y de los caminos distintos que cada uno tomó en la universidad, su apoyo y compañía han seguido presentes, recordándome siempre que la verdadera amistad trasciende el tiempo y las circunstancias.

Quiero agradecerles también a todas aquellas personas que estuvieron pendientes de mí y que, con sus palabras de aliento y su interés genuino por cómo avanzaba la tesis, me motivaron a seguir adelante. A cada amigo y persona cercana que, desde distintos espacios de mi vida, me recordó la importancia de no rendirme y de dar siempre lo mejor de mí, les agradezco profundamente, pues su apoyo silencioso pero constante también fue parte de la fuerza que me trajo hasta aquí.

Quiero agradecerle a la Universidad del Valle de Guatemala, que durante todos estos años fue mi segunda casa y el espacio donde tuve la oportunidad de crecer tanto académica como personalmente. En especial, agradezco al Departamento de Ingeniería Química, al director de departamento Ing. Gamaliel Zambrano, a la Ing. Carmen Ortiz y al Ing. José Lam por su apoyo

durante la elaboración de esta tesis. Extiendo también mi agradecimiento a todo el personal del Laboratorio de Operaciones Unitarias: Cristián, José, Héctor y Verónica, quienes con su paciencia y ayuda hicieron posible el desarrollo de los experimentos que dieron vida a este proyecto.

Finalmente, quiero dar un especial agradecimiento a mi asesor de tesis, Ing. Luis Núñez, por toda su ayuda, guía y paciencia a lo largo de este proceso. Su dedicación, sus consejos y su acompañamiento constante fueron fundamentales para que este trabajo pudiera realizarse. Más allá de lo académico, agradezco también las muchas otras cosas que me enseñó y el tiempo que me brindó, que hicieron de esta experiencia un verdadero aprendizaje de vida.

ÍNDICE

PREFACIO

LISTA DE CUADROS x

LISTA DE FIGURAS xix

LISTA DE ECUACIONES xxvi

RESUMEN

I. INTRODUCCIÓN..... 1

II. OBJETIVOS 3

A. Objetivo general 3

B. Objetivos específicos 3

III. JUSTIFICACIÓN..... 4

IV. MARCO TEÓRICO 6

A. Industria textil y contaminación del agua 6

B. Industria textil en Guatemala 10

C. Colorantes textiles 14

D. Procesos de tratamientos de aguas residuales 20

E. Adsorción 22

F. Coagulación-floculación 30

G. Filtración biológica..... 32

H. Oxidación avanzada..... 35

I. Biorremediación (enzimática)..... 37

J. Palma africana como material adsorbente..... 39

K. Producción de palma africana en Guatemala 45

L. Isotermas de Adsorción..... 46

M. Espectrofotometría UV-VIS..... 52

N. ANOVA y Tukey..... 52

V. ANTECEDENTES	54
VI. METODOLOGÍA	61
A. Primera fase: Caracterizar los residuos de palma africana (fibra y cuesco)	61
B. Segunda fase: Definir los posibles métodos de acondicionamiento de la materia prima	62
C. Tercera fase: Acciones previas a todos los pretratamientos con los residuos	64
D. Cuarta Fase: Preparación de los colorantes.....	66
E. Quinta Fase: Preparación de las combinaciones	68
F. Sexta fase: Determinación de la combinación más eficiente para la remoción de color	74
G. Séptima fase: Curva de calibración	76
H. Octava fase: Determinación de adsorbente necesario.....	77
I. Novena fase: Elaboración de las curvas de Langmuir con la mejor combinación de los residuos de palma africana y carbón activado comercial	78
VII. RESULTADOS	81
VIII. DISCUSIÓN.....	95
IX. CONCLUSIONES	106
X. RECOMENDACIONES.....	107
XI. BIBLIOGRAFÍA.....	108
XII. ANEXOS	119
A. Datos originales	119
B. Datos calculados	132
C. Datos de placa.....	208
D. Cálculos de muestras	210
E. Análisis de error.....	221
F. Balance de masa y energía	230
G. Ilustraciones.....	231
XIII. APÉNDICE	239
XIV. GLOSARIO.....	307

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1:	Comparación integral de métodos tradicionales de remoción de color y viabilidad del uso de residuos de palma africana como alternativa.....	82
Cuadro 2:	Evaluación ponderada de métodos tradicionales de remoción de color y su viabilidad de aplicación con residuos de palma africana.....	83
Cuadro 3:	Diseño experimental del análisis factorial total (4x3x2) aplicado al estudio de adsorción de colorantes.....	84
Cuadro 4:	Resultados de la prueba ANOVA (4x3x2) del % de remoción de color: efectos principales e interacciones, ordenados por contribución a la variabilidad (%).	86
Cuadro 5:	Clasificación de combinaciones experimentales según su media de remoción de color.....	90
Cuadro 6:	Parámetros del modelo de Langmuir obtenidos a partir del promedio, para los tratamientos con residuos de palma africana (HAML) y carbón activado comercial con colorante directo.....	94
Cuadro 7:	Lecturas espectrofotométricas iniciales (A_0) de cada colorante a 100 mg/L, antes del proceso de adsorción.....	119
Cuadro 8:	Lecturas espectrofotométricas finales (A) obtenidas tras el proceso de adsorción con residuos de palma africana tratados mediante hidrólisis básica, para distintas combinaciones experimentales	120
Cuadro 9:	Lecturas espectrofotométricas finales (A) obtenidas tras el proceso de adsorción con residuos de palma africana tratados mediante hidrólisis ácida, para distintas combinaciones experimentales	122
Cuadro 10:	Lecturas espectrofotométricas finales (A) obtenidas tras el proceso de adsorción con carbón activado elaborado a partir de residuos de palma	

africana, para distintas combinaciones experimentales con colorante directo	124
Cuadro 11: Lecturas espectrofotométricas finales (A) obtenidas tras el proceso de adsorción con residuos de palma africana sin pretratamiento, para distintas combinaciones experimentales	126
Cuadro 12: Lecturas individuales de absorbancia obtenidas por espectrofotometría UV-Vis para la elaboración de la curva de calibración del colorante directo....	127
Cuadro 13: Lecturas de absorbancia obtenidas para determinar la dosis óptima de adsorbente (HAML) en soluciones con 100 mg/L de colorante directo	128
Cuadro 14: Lecturas de absorbancia sin corrección de blanco para la construcción de la isoterma de Langmuir con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo	129
Cuadro 15: Lecturas de absorbancia sin corrección de blanco para la construcción de la isoterma de Langmuir con carbón activado comercial y colorante directo	130
Cuadro 16: Métodos tradicionales de remoción de color y posibilidad de sustitución con residuos orgánicos.....	133
Cuadro 17: Participación del residuo orgánico en la remoción de color por método tradicional	134
Cuadro 18: FODA para el método de adsorción utilizando residuos orgánicos.....	135
Cuadro 19: FODA para el método de coagulación-floculación utilizando residuos orgánicos.....	137
Cuadro 20: FODA para el método de oxidación avanzada utilizando residuos orgánicos modificados como catalizadores.....	138
Cuadro 21: FODA para el método de biorremediación enzimática utilizando residuos orgánicos.....	139
Cuadro 22: Dimensionamiento de insumos por 1 kg de residuo de palma africana (fibra-cuesco) para su acondicionamiento según método de tratamiento	141

Cuadro 23: Estimación de costos de insumos para el acondicionamiento de 1 kg de residuo de palma africana (fibra–cuesco) según método de tratamiento.....	143
Cuadro 24: Valoración comparativa del costo de insumos por tratamiento, a partir del acondicionamiento de residuos de palma africana.....	145
Cuadro 25: Caracterización de los residuos de palma africana utilizados en el estudio	147
Cuadro 26: Criterios de evaluación para la comparación de métodos de remoción de color y su viabilidad de uso con residuos de palma africana	148
Cuadro 27: Porcentaje de remoción de color obtenido para las combinaciones con pretratamiento de hidrólisis básica.....	149
Cuadro 28: Porcentaje de remoción de color obtenido para las combinaciones con pretratamiento de hidrólisis ácida	151
Cuadro 29: Porcentaje de remoción de color obtenido para las combinaciones con pretratamiento de carbón activado a base de palma africana.....	153
Cuadro 30: Porcentaje de remoción de color obtenido para las combinaciones sin pretratamiento	155
Cuadro 31: Estadísticos descriptivos generales de la remoción de color considerando todas las combinaciones experimentales (n = 384).....	156
Cuadro 32: Estadísticos descriptivos de la remoción de color (% m/m) para cada nivel experimental.....	157
Cuadro 33: Análisis de varianza (ANOVA) para los factores y sus interacciones en la remoción de color	159
Cuadro 34: Análisis de varianza para las interacciones entre factores, ordenadas por su contribución a la variabilidad explicada (según suma de cuadrados).....	160
Cuadro 35: Resultados del análisis de la varianza (ANOVA) para los factores los factores evaluados en la remoción de color.....	161
Cuadro 36: Medias y efectos principales por nivel experimental para cada factor evaluado en la remoción de color.....	162

Cuadro 37: Influencia porcentual promedio de los factores pretratamiento, molienda y colorante sobre la remoción media de color	163
Cuadro 38: Estadísticos descriptivos de remoción de color por combinación experimental	164
Cuadro 39: Comparaciones múltiples de Tukey para los niveles del factor pretratamiento	166
Cuadro 40: Comparaciones múltiples de Tukey para los niveles del factor molienda..	167
Cuadro 41: Comparación de Tukey entre los niveles del factor colorante	168
Cuadro 42: Promedio de lecturas espectrofotométricas para soluciones estándar de colorante directo utilizadas en la construcción de la curva de calibración .	172
Cuadro 43: Ensayo preliminar para la selección de la concentración de adsorbente utilizada en la construcción de la isoterma de Langmuir.....	174
Cuadro 44: Lecturas espectrofotométricas corregidas por blanco promedio para la construcción de la isoterma de Langmuir con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo	175
Cuadro 45: Concentración de equilibrio (C_e) estimada a partir de la curva de calibración para el tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo	177
Cuadro 46: Capacidad de adsorción en equilibrio (q_e) obtenida para el tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo	179
Cuadro 47: Relación C_e/q_e para el tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo.....	180
Cuadro 48: Valores promedio de C_e y C_e/q_e para el tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo	181
Cuadro 49: Parámetros del modelo de Langmuir obtenidos a partir del promedio de las tres repeticiones del tratamiento con residuos de palma africana (HAMLCD)	183

Cuadro 50: Lecturas espectrofotométricas corregidas por blanco promedio para la construcción de la isoterma de Langmuir con carbón activado comercial y colorante directo.....	184
Cuadro 51: Concentración de equilibrio (C_e) estimada a partir de la curva de calibración para el carbón activado comercial y colorante directo.....	186
Cuadro 52: Capacidad de adsorción en equilibrio (q_e) obtenida para carbón activado comercial y colorante directo.....	187
Cuadro 53: Relación C_e/q_e para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo	189
Cuadro 54: Valores promedio de C_e y C_e/q_e para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo.....	190
Cuadro 55: Parámetros del modelo de Langmuir obtenidos a partir del promedio de las tres repeticiones del carbón activado comercial	192
Cuadro 56: Valores de la Muestra 1 de C_e y C_e/q_e para el tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo	192
Cuadro 57: Valores de la Muestra 2 de C_e y C_e/q_e para el tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo	194
Cuadro 58: Valores de la Muestra 3 de C_e y C_e/q_e para el tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo	196
Cuadro 59: Parámetros del modelo de Langmuir obtenidos de cada una de las muestras del tratamiento con residuos de palma africana (HAMLCD).....	198
Cuadro 60: Valores de la Muestra 1 de C_e y C_e/q_e para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo.....	199
Cuadro 61: Valores de la Muestra 2 de C_e y C_e/q_e para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo.....	201
Cuadro 62: Valores de la Muestra 3 de C_e y C_e/q_e para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo.....	203

Cuadro 63: Parámetros del modelo de Langmuir obtenidos a partir de cada una de las muestras del carbón activado comercial	205
Cuadro 64: Datos de placa del tamizador	208
Cuadro 65: Datos de placa de la balanza	208
Cuadro 66: Datos de placa de la balanza analítica.....	208
Cuadro 67: Espectrofotómetro UV-VIS	209
Cuadro 68: Datos de placa del horno secador.....	209
Cuadro 69: Datos de placa del shaker.....	209
Cuadro 70: Resultados del tamizaje para la muestra HBSM – Corrida 1.....	239
Cuadro 71: Resultados del tamizaje para la muestra HBSM – Corrida 2.....	239
Cuadro 72: Resultados del tamizaje para la muestra HBSM – Corrida 3.....	240
Cuadro 73: Porcentaje promedio retenido por tamiz para residuos HBSM	240
Cuadro 74: Resultados del tamizaje para la muestra HBML – Corrida 1	241
Cuadro 75: Resultados del tamizaje para la muestra HBML – Corrida 2	241
Cuadro 76: Resultados del tamizaje para la muestra HBML – Corrida 3	242
Cuadro 77: Porcentaje promedio retenido por tamiz para residuos HBML	242
Cuadro 78: Resultados del tamizaje para la muestra HBMM – Corrida 1	243
Cuadro 79: Resultados del tamizaje para la muestra HBMM – Corrida 2	243
Cuadro 80: Resultados del tamizaje para la muestra HBMM – Corrida 3	244
Cuadro 81: Porcentaje promedio retenido por tamiz para residuos HBMM	244
Cuadro 82: Resultados del tamizaje para la muestra HASM – Corrida 1	245
Cuadro 83: Resultados del tamizaje para la muestra HASM – Corrida 2	245
Cuadro 84: Resultados del tamizaje para la muestra HASM – Corrida 3	246
Cuadro 85: Porcentaje promedio retenido por tamiz para residuos HASM	246
Cuadro 86: Resultados del tamizaje para la muestra HAML – Corrida 1	247

Cuadro 87: Resultados del tamizaje para la muestra HAML – Corrida 2	247
Cuadro 88: Resultados del tamizaje para la muestra HAML – Corrida 3	248
Cuadro 89: Porcentaje promedio retenido por tamiz para residuos HAML	248
Cuadro 90: Resultados del tamizaje para la muestra HAMM – Corrida 1	249
Cuadro 91: Resultados del tamizaje para la muestra HAMM – Corrida 2	249
Cuadro 92: Resultados del tamizaje para la muestra HAMM – Corrida 3	250
Cuadro 93: Porcentaje promedio retenido por tamiz para residuos HAMM.....	250
Cuadro 94: Resultados del tamizaje para la muestra SPSM – Corrida 1.....	251
Cuadro 95: Resultados del tamizaje para la muestra SPSM – Corrida 2.....	251
Cuadro 96: Resultados del tamizaje para la muestra SPSM – Corrida 3.....	252
Cuadro 97: Porcentaje promedio retenido por tamiz para residuos SPSM.....	252
Cuadro 98: Resultados del tamizaje para la muestra SPML – Corrida 1	253
Cuadro 99: Resultados del tamizaje para la muestra SPML – Corrida 2	253
Cuadro 100:Resultados del tamizaje para la muestra SPML – Corrida 3	254
Cuadro 101:Porcentaje promedio retenido por tamiz para residuos SPML	254
Cuadro 102:Resultados del tamizaje para la muestra SPMM – Corrida 1	255
Cuadro 103:Resultados del tamizaje para la muestra SPMM – Corrida 2	255
Cuadro 104:Resultados del tamizaje para la muestra SPMM – Corrida 3	256
Cuadro 105:Porcentaje promedio retenido por tamiz para residuos SPMM	256
Cuadro 106:Resultados del tamizaje para la muestra CASM – Corrida 1.....	257
Cuadro 107:Resultados del tamizaje para la muestra CASM – Corrida 2.....	257
Cuadro 108:Resultados del tamizaje para la muestra CASM – Corrida 3.....	258
Cuadro 109:Porcentaje promedio retenido por tamiz para residuos CASM	258
Cuadro 110:Resultados del tamizaje para la muestra CAML – Corrida 1	259
Cuadro 111:Resultados del tamizaje para la muestra CAML – Corrida 2	259

Cuadro 112:Resultados del tamizaje para la muestra CAML – Corrida 3	260
Cuadro 113:Porcentaje promedio retenido por tamiz para residuos CAML	260
Cuadro 114:Resultados del tamizaje para la muestra CAMM – Corrida 1	261
Cuadro 115:Resultados del tamizaje para la muestra CAMM – Corrida 2	261
Cuadro 116:Resultados del tamizaje para la muestra CAMM – Corrida 3	262
Cuadro 117:Porcentaje promedio retenido por tamiz para residuos CAMM	262
Cuadro 118:Resultados del tamizaje para la muestra carbón activado comercial (origen vegetal) pulverizado – Corrida 1.....	263
Cuadro 119:Resultados del tamizaje para la muestra carbón activado comercial (origen vegetal) pulverizado – Corrida 2.....	263
Cuadro 120:Resultados del tamizaje para la muestra carbón activado comercial (origen vegetal) pulverizado – Corrida 3.....	264
Cuadro 121:Porcentaje promedio retenido por tamiz para carbón activado comercial (origen vegetal) pulverizado	264
Cuadro 122:Porcentaje de remoción promedio para cada combinación experimental, ordenadas de mayor a menor remoción	265
Cuadro 123:Resultados de la prueba de comparaciones múltiples de Tukey para las combinaciones experimentales	267
Cuadro 124:Lecturas de absorbancia sin corrección de blanco para la construcción de la isoterma de Langmuir con carbón activado comercial y colorante directo. Sin filtrar	273
Cuadro 125:Lecturas espectrofotométricas corregidas por blanco promedio para la construcción de la isoterma de Langmuir con carbón activado comercial y colorante directo. Sin filtrar	274
Cuadro 126:Concentración de equilibrio (C_e) estimada a partir de la curva de calibración para el carbón activado comercial y colorante directo. Sin filtrar	275

Cuadro 127: Capacidad de adsorción en equilibrio (q_e) obtenida para carbón activado comercial y colorante directo. Sin filtrar	276
Cuadro 128: Relación C_e/q_e para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo. Sin filtrar	277
Cuadro 129: Valores promedio de C_e y C_e/q_e para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo. Sin filtrar	278
Cuadro 130: Valores de la Muestra 1 de C_e y C_e/q_e para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo. Sin filtrar	279
Cuadro 131: Valores de la Muestra 2 de C_e y C_e/q_e para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo. Sin filtrar	280
Cuadro 132: Valores de la Muestra 3 de C_e y C_e/q_e para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo. Sin filtrar	281
Cuadro 133: Valores de todas las mediciones de C_e y C_e/q_e para el tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo.....	284
Cuadro 134: Valores de todas las mediciones de C_e y C_e/q_e para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo	288

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Huella hídrica estimada de distintos productos.....	8
Figura 2:	Exportaciones de materia prima textil por Guatemala en 2024: Valor FOB y participación porcentual.....	12
Figura 3:	Valor y proporción de las principales prendas de vestir exportadas por Guatemala en 2024 (US\$ FOB y porcentaje del Top 10).....	13
Figura 4:	Métodos de remoción de color y método seleccionado	81
Figura 5:	Distribución general de la remoción de color en todas las combinaciones experimentales.....	85
Figura 6:	Efecto promedio de los factores pretratamiento, molienda y colorante sobre la remoción media de color	87
Figura 7:	Remoción promedio de color (%) para cada nivel de pretratamiento, molienda y colorante	88
Figura 8:	Contribución de cada nivel experimental a la remoción promedio de color.	89
Figura 9:	Representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo, a partir de los valores promedio obtenidos experimentalmente	92
Figura 10:	Representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo, a partir de los valores promedio obtenidos experimentalmente	93
Figura 11:	Diagrama de procesos del procedimiento seguido para definir el método de acondicionamiento más adecuado para los residuos de palma africana	132
Figura 12:	Distribución general de los valores de remoción de color	168

Figura 13:	Distribución de los valores de remoción de color según el pretratamiento aplicado.....	169
Figura 14:	Distribución de los valores de remoción de color según el tipo de molienda aplicado.....	170
Figura 15:	Distribución de los valores de remoción de color según el tipo de colorante utilizado.....	171
Figura 16:	Curva de calibración construida a partir del promedio de lecturas espectrofotométricas para soluciones estándar de colorante directo	173
Figura 17:	Construcción de la representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo, a partir de los valores promedio obtenidos experimentalmente	182
Figura 18:	Construcción de la representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo, a partir de los valores promedio obtenidos experimentalmente	191
Figura 19:	Construcción de la representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo, a partir de los valores de la Muestra 1 obtenidos experimentalmente.....	193
Figura 20:	Construcción de la representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo, a partir de los valores de la Muestra 2 obtenidos experimentalmente.....	195
Figura 21:	Construcción de la representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo, a partir de los valores de la Muestra 3 obtenidos experimentalmente.....	197

Figura 22:	Construcción de la representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo, a partir de los valores de la Muestra 1 obtenidos experimentalmente	200
Figura 23:	Construcción de la representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo, a partir de los valores de la Muestra 2 obtenidos experimentalmente	202
Figura 24:	Construcción de la representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo, a partir de los valores de la Muestra 3 obtenidos experimentalmente	204
Figura 25:	Representación no lineal del modelo de Langmuir utilizando los parámetros promedio del tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo	206
Figura 26:	Representación no lineal del modelo de Langmuir utilizando los parámetros promedio del tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo	207
Figura 27:	Balance de masa y energía para los residuos de palma africana después del lavado	230
Figura 28:	Imagen de las hidrólisis y activación de los residuos de palma en la campana	231
Figura 29:	Imagen del carbón activado a base de residuos de palma.....	231
Figura 30:	Imagen de la preparación de muestras	232
Figura 31:	Muestras en el shaker.....	232
Figura 32:	Imagen de la combinación HBMLCD después de la adsorción	233
Figura 33:	Imagen de la combinación HBMLCR después de la adsorción	233

Figura 34:	Imagen de la combinación HAMLCD después de la adsorción	233
Figura 35:	Imagen de la combinación HAMMCD después de la adsorción	234
Figura 36:	Imagen de la combinación HASMCD después de la adsorción	234
Figura 37:	Imagen de la combinación HASMCR después de la adsorción	234
Figura 38:	Imagen de la combinación CAMLCD después de la adsorción	235
Figura 39:	Imagen de la combinación CAMLCR después de la adsorción	235
Figura 40:	Imagen de la combinación SPMLCD después de la adsorción	235
Figura 41:	Imagen de la combinación SPMLCR después de la adsorción.....	236
Figura 42:	Imagen de una de las muestras vista desde más cerca	236
Figura 43:	Imagen de la solución madre de colorante directo 100 mg/L.....	237
Figura 44:	Imagen de las diluciones del colorante	237
Figura 45:	Imagen de las muestras de HAMLCD después de la adsorción para la isoterma de Langmuir	237
Figura 46:	Imagen de las muestras del carbón activado comercial después de la adsorción para la isoterma de Langmuir	238
Figura 47:	Construcción de la representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo, a partir de los valores promedio obtenidos experimentalmente. Sin filtrar	278
Figura 48:	Construcción de la representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo, a partir de los valores de la Muestra 1 obtenidos experimentalmente. Sin filtrar.....	279

Figura 49:	Construcción de la representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo, a partir de los valores de la Muestra 2 obtenidos experimentalmente. Sin filtrar.....	280
Figura 50:	Construcción de la representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo, a partir de los valores de la Muestra 3 obtenidos experimentalmente. Sin filtrar.....	281
Figura 51:	Representación no lineal del modelo de Langmuir utilizando los parámetros Muestra 1 del tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo.	282
Figura 52:	Representación no lineal del modelo de Langmuir utilizando los parámetros Muestra 2 del tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo.	282
Figura 53:	Representación no lineal del modelo de Langmuir utilizando los parámetros Muestra 3 del tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo.	283
Figura 54:	Construcción de la representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo, a partir de los valores de todas las muestras obtenidos experimentalmente..	285
Figura 55:	Representación no lineal del modelo de Langmuir utilizando los parámetros de todas las muestras del tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo.....	285
Figura 56:	Representación no lineal del modelo de Langmuir utilizando los parámetros Muestra 1 del tratamiento carbón activado comercial y colorante directo .	286
Figura 57:	Representación no lineal del modelo de Langmuir utilizando los parámetros Muestra 2 del tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo	286

Figura 58: Representación no lineal del modelo de Langmuir utilizando los parámetros Muestra 3 del tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo	287
Figura 59: Construcción de la representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo, a partir de los valores de todas las muestras obtenidos experimentalmente	289
Figura 60: Representación no lineal del modelo de Langmuir utilizando los parámetros de todas las muestras del tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo.....	289
Figura 61: Código en R utilizado para el análisis estadístico.....	290
Figura 62: Continuación del código en R utilizado para el análisis estadístico	290
Figura 63: Continuación del código en R utilizado para el análisis estadístico	291
Figura 64: Continuación del código en R utilizado para el análisis estadístico	291
Figura 65: Continuación del código en R utilizado para el análisis estadístico	292
Figura 66: Continuación del código en R utilizado para el análisis estadístico	292
Figura 67: Continuación del código en R utilizado para el análisis estadístico	293
Figura 68: Continuación del código en R utilizado para el análisis estadístico	293
Figura 69: Continuación del código en R utilizado para el análisis estadístico	294
Figura 70: Continuación del código en R utilizado para el análisis estadístico	294
Figura 71: Continuación del código en R utilizado para el análisis estadístico	295
Figura 72: Continuación del código en R utilizado para el análisis estadístico	295
Figura 73: Cotización del hidróxido de sodio (NaOH) Merck.....	296

Figura 74:	Continuación de la cotización del hidróxido de sodio (NaOH) Merck	296
Figura 75:	Cotización del ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄) Merck	297
Figura 76:	Continuación de la cotización del ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄) Merck	297
Figura 77:	Cotización del ácido fosfórico (H ₃ PO ₄) Merck	298
Figura 78:	Continuación de la cotización del ácido fosfórico (H ₃ PO ₄) Merck.....	298
Figura 79:	Cotización del inóculo Xtreme Gardening	299
Figura 80:	Cotización de la urea, Merck	300
Figura 81:	Continuación de la cotización de la urea, Merck.....	300
Figura 82:	Cotización de potasio dihidrogenofosfato (KH ₂ PO ₄), Merck	301
Figura 83:	Continuación de la cotización de potasio dihidrogenofosfato (KH ₂ PO ₄), Merck	301
Figura 84:	Cotización del cloruro férrico (FeCl ₃), Merck	302
Figura 85:	Continuación de la cotización del cloruro férrico (FeCl ₃), Merck.....	302
Figura 86:	Cotización del agua desmineralizada, Salvavidas (18.9L)	303
Figura 87:	Ficha técnica carbón activado vegetal pulverizado (comercial).....	304
Figura 88:	Continuación de la ficha técnica.....	305
Figura 89:	Continuación de la ficha técnica.....	306

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1:	Nota individual de cada criterio	210
Ecuación 2:	Puntaje total sobre 3	210
Ecuación 3:	Nota de cada tratamiento en porcentaje	210
Ecuación 4:	Costo de la cantidad de insumo necesario	210
Ecuación 5:	Costo total de los insumos.....	211
Ecuación 6:	Porcentaje de retención en cada plato de la tamizadora	211
Ecuación 7:	Cálculo del diámetro efectivo (D_{10}), Diametro D_{30} y Diametro D_{60}	211
Ecuación 8:	Coefficiente de uniformidad (C_u).....	213
Ecuación 9:	Coefficiente de curvatura (C_c).....	214
Ecuación 10:	Porcentaje de remoción de las lecturas espectrofotométricas	214
Ecuación 11:	Efecto sobre la media global de cada nivel	215
Ecuación 12:	Efecto absoluto sobre la media global	215
Ecuación 13:	Influencia porcentual promedio de los factores sobre la remoción media de color	215
Ecuación 14:	Corrección de las lecturas espectrofotométricas por el blanco	215
Ecuación 15:	Concentración de equilibrio (C_e) estimada a partir de la curva de calibración.....	216
Ecuación 16:	Capacidad de adsorción en equilibrio (q_e).....	216
Ecuación 17:	Relación C_e/q_e	217
Ecuación 18:	Capacidad máxima de adsorción (Q_m)	217
Ecuación 19:	Constante de Langmuir (K_L)	218
Ecuación 20:	Forma no lineal de la isoterma de Langmuir	218
Ecuación 21:	Requerimiento mínimo del proceso	219

Ecuación 22:	Consumo eléctrico del horno	220
Ecuación 23:	Calor perdido.....	220
Ecuación 24:	Incertidumbre de cálculos que involucran sumas y restas	221
Ecuación 25:	Incertidumbre de cálculos que involucran multiplicaciones o divisiones....	221
Ecuación 26:	Media o promedio	222
Ecuación 27:	Desviación estándar	222
Ecuación 28:	Intervalo de confianza	223
Ecuación 29:	Cuartiles	223
Ecuación 30:	Grados de libertad	224
Ecuación 31:	Suma de cuadrados del factor A (Sum sq).....	224
Ecuación 32:	Suma de cuadrados del error (Residuales).....	225
Ecuación 33:	Cuadrado medio (Mean sq).....	225
Ecuación 34:	Valor F (F value).....	226
Ecuación 35:	Valor P (Pr(>F)).....	227
Ecuación 36:	Porcentaje de Variabilidad.....	227
Ecuación 37:	Comparaciones múltiples de Tukey HSD	228
Ecuación 38:	Coefficiente de determinación (R^2)	228

RESUMEN

La industria textil es una de las principales contribuyentes a la contaminación de los cuerpos de agua debido al uso intensivo de colorantes sintéticos. Estos presentan una alta solubilidad y resistencia a los tratamientos convencionales. En este trabajo se evaluó, a nivel de laboratorio la remoción de color en agua simulada mediante el uso de residuos de palma africana como adsorbente, con el fin de compararlo con carbón activado comercial. El estudio se organizó en tres etapas: (i) Selección del método de remoción mediante una comparación de alternativas tradicionales (adsorción, coagulación-floculación, filtración biológica, oxidación avanzada y biorremediación) y su viabilidad de aplicación con residuos de palma africana. La adsorción obtuvo el puntaje más alto ($2.90/3 \approx 96.66\%$). Por esto se priorizó para los ensayos experimentales. (ii) Se aplicaron pretratamientos de hidrólisis básica, hidrólisis ácida, conversión en carbón activado y uso sin pretratamiento, en combinación con distintos métodos de molienda y dos tipos de colorantes representativos de la industria. Para identificar los factores y niveles más influyentes, se desarrolló un diseño factorial completo $4 \times 3 \times 2$ con análisis de varianza (ANOVA) y prueba de Tukey. Los resultados mostraron que el pretratamiento es el factor más influyente con una variabilidad de 88.65%. Y que el nivel de hidrólisis ácida fue el de mayor efecto positivo en la remoción, alcanzando una remoción promedio de 65.92% (m/m). Mientras que la hidrólisis básica generó un desempeño negativo. La mejor combinación experimental correspondió a hidrólisis ácida, molienda con licuadora y colorante directo, con una remoción de 78.19% (m/m). (iii) La combinación que presentó los mejores resultados se utilizó para construir isotermas de Langmuir, obteniendo una capacidad máxima de adsorción de 13.90 mg/g para los residuos de palma africana, superior al valor de 4.14mg/g del carbón activado comercial. Se concluyó que, bajo las condiciones aplicadas, los residuos de palma africana pretratados mostraron mayor adsorción de colorante que el carbón activado comercial vegetal pulverizado. Se recomienda validar estos resultados con aguas residuales reales de la industria, utilizar carbón activado comercial granular y probar diferentes formas de agitación.

I. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo desarrolla y aplica una metodología para la preparación de residuos de palma africana como un posible sustituto de materiales comerciales en la adsorción de colorantes provenientes de la industria textil a nivel de laboratorio. En Guatemala, al igual que en muchos otros países en vías de desarrollo, la industria textil tiene una gran importancia económica. Sin embargo, también es una de las principales fuentes de contaminación hídrica. Gracias al vertido de aguas residuales cargadas con compuestos químicos persistentes de baja degradación (Fundesa, 2024; MARN, 2006). Entre ellos, los colorantes sintéticos ocupan un lugar relevante debido a su alta solubilidad, resistencia a la degradación y efectos sobre los ecosistemas acuáticos (Holkar et al., 2016; Hunger, 2003).

La contaminación del agua por colorantes textiles constituye un problema ambiental a nivel global. Earth.org estima que cerca del 20% de la contaminación acuática industrial está vinculada a proceso de tintura y acabado textil. Estos compuestos no solo alteran la calidad visual del agua, sino que también disminuyen la penetración de luz solar en los cuerpos receptores. Esto causa una interferencia con la fotosíntesis de las plantas y pueden ser tóxicos para los organismos que habitan en el cuerpo acuático (Abid et al., 2012; Organización Mundial de la Salud, s. f.). La persistencia de los colorantes en el agua se debe a que están compuestas de estructuras químicas estables y grupos funcionales que los hacen resistentes a la biodegradación convencional (Zollinger, 2004).

Para el tratamiento de aguas residuales existen diversos métodos tradicionales, los cuales incluyen procesos físicos, químicos y biológicos. Sin embargo, cada uno de ellos presenta limitaciones importantes. Los biológicos, no son eficaces frente a compuestos no biodegradables como colorantes (Tchobanoglous et al., 2003). Los procesos químicos generan subproductos adicionales. La adsorción con carbón activado, el adsorbente por excelencia, aunque es muy eficiente, es costosa y requiere regeneración (Babel & Kurniawan, 2003; Crini, 2006).

Gracias a esto, el uso de materiales alternativos de bajo costo, especialmente los residuos agroindustriales lignocelulósicos, han cobrado interés por su abundancia, bajo costo y potencial de adsorción tanto física como química (Foo & Hameed, 2010). La palma africana (*Elais*

guineensis) es ampliamente cultivada en Guatemala, debido al aceite que produce. Sin embargo, genera grandes volúmenes de residuos y subproductos fibrosos que en muchos casos no son valorizados adecuadamente y son utilizados como combustibles en calderas (GREPALMA, 2023). Su aprovechamiento como adsorbente no solo mitigaría un problema ambiental, sino que también fomentaría la economía circular al integrar un desecho agrícola en un proceso de tratamiento de aguas residuales.

El presente trabajo de graduación propone evaluar a nivel de laboratorio el desempeño de los residuos de palma africana sometidos a diferentes pretratamientos, comparando su capacidad de remoción de color con la de un material adsorbente comercial. El estudio busca aportar evidencia experimental sobre la viabilidad de aprovechar subproductos locales como sustituto al carbón activado en el tratamiento de aguas residuales textiles simuladas. Esto con el propósito de generar alternativas sostenibles y económicamente factibles para el sector industrial.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Comparar la remoción de pigmentos del agua residual utilizada en el proceso de teñido de la industria textil, usando residuos de palma africana y carbón activado.

B. Objetivos específicos

1. Definir posibles métodos de acondicionamiento necesario de la materia prima para su transformación, como sustituto de material comercial en la reducción de color en agua simulada de la industria textil.
2. Realizar un análisis factorial de las principales variables que intervienen en el proceso de remoción de color para determinar las que sean significativamente influyentes en la adsorción.
3. Elaborar las curvas de Langmuir para determinar los coeficientes de transferencia de masa de las condiciones que maximizan la remoción de color y compararlas con un material adsorbente comercial.

III. JUSTIFICACIÓN

Uno de los retos ambientales más persistentes y complejos a nivel mundial, es la contaminación de los recursos hídricos por vertidos de la industria textil. Los colorantes sintéticos, los cuales, con ampliamente utilizados por su viveza y estabilidad, tienen el defecto que poseen una gran resistencia a la degradación. Esto dificulta su eliminación mediante métodos convencionales y prolonga su tiempo de presencia los cuerpos de agua (Babu, Parande & Kumar, 2007; European Parliamentary Research Service, 2019). Estos efluentes limitan la penetración de la luz solar y alteran los procesos fotosintéticos en los cuerpos receptores, afectando la vida que pueda existir allí. Además de afectar la calidad estética del agua.

La industria textil tiene una gran relevancia económica, a nivel global. Se estima que tiene un valor de 1.11 billones de dólares con una proyección de crecimiento sostenido para la próxima década (Grand View Research, 2024). Entre las prendas más comercializadas predominan las que requieren procesos de teñido más intenso. El negro y el azul son algunos de los colores más utilizados por su alta demanda en el mercado y las propiedades de fijación y resistencia (Kadolph, 2010). El colorante directo es ampliamente utilizado para fibras celulósicas como el algodón en camisas y textiles ligeros de exportación. Por otro lado, el colorante reactivo es utilizado para productos como pantalones o jeans de algodón, que requieren alta solides y resistencia al desgaste (Hunger, 2003; Zollinger, 2004).

En la economía guatemalteca, la industria de vestuario y textiles constituye uno de los sectores más estratégicos e importantes para el país. Aporta cerca del 8.6% del producto interno bruto y el 23.4% de la producción manufacturera, con exportaciones que alcanzaron los US\$ 2,023 millones en 2023. Además de generar aproximadamente 180,000 empleos directos e indirectos (Fundesa, 2024). Los principales productos de exportación de esta industria en Guatemala incluyen camisas *knit* de algodón (US\$ 710.6 millones; 59.73 % de la ropa exportada) y pantalones o shorts de algodón, artículos que requieren el uso de colorantes directos y reactivos al momento de su producción. Esto refuerza la necesidad de realizar el estudio con métodos más eficientes para el tratamiento de aguas residuales con altas cargas de estos compuestos, considerando su impacto ambiental y relevancia económica del sector (VESTEX, 2024).

Asimismo, el cultivo de la palma africana ha tenido un notable crecimiento en Guatemala. En el 2003 se cultivaban alrededor de 31,000 hectáreas y en el 2020 se reportaron más de 170,000. Lo que evidentemente ha significado un incremento extraordinario en la generación de subproductos y residuos agroindustriales (PalmAgro, 2021). Un racimo de palma africana pesa en promedio entre 15 y 25 kg, de los cuales únicamente alrededor del 22–23 % corresponde a aceite crudo, mientras que el 77–78 % restante son residuos como la fibra de mesocarpio, el cuesco, el raquis y otros subproductos (Corley & Tinker, 2016). Entre estos, la fibra de mesocarpio y el cuesco molido se producen en grandes volúmenes y, aunque poseen un potencial de valorización, se suelen destinar con usos energéticos o son descartados como abono natural sin un aprovechamiento integral (Corley & Tinker, 2016). Evaluar la aplicación de estos residuos como un material adsorbente para la remoción de colorantes no solo les daría un valor agregado, sino que también podría contribuir a reducir o complementar la dependencia de adsorbentes comerciales como el carbón activado.

En este contexto la presente investigación evalúa a nivel de laboratorio, el uso de residuos de palma africana, específicamente una mezcla de fibra de mesocarpio y cuesco molido, como adsorbente en la remoción de colorantes textiles. Y compara su desempeño con el carbón activado comercial. El material residual fue sometido a distintos pretratamientos químicos. Su capacidad de adsorción se cuantificó mediante espectrofotometría UV-Vis. También, se aplicó un análisis factorial para identificar las variables de mayor influencia en el proceso, completando la construcción de isotermas de adsorción con las variables que mejor rendimiento presenten. La propuesta se enmarca en un enfoque de sostenibilidad, ya que tiene el potencial de llevar a estudios que fomenten el uso de residuos de palma como posible aplicación para reducir la contaminación hídrica con la valorización de subproductos agroindustriales y fomentando la economía circular. Además, no se han documentado estudios previos que utilicen este residuo para el tratamiento de aguas de la industria textil en Guatemala, lo que hace que el trabajo presente un carácter novedoso en el ámbito nacional.

IV. MARCO TEÓRICO

A. Industria textil y contaminación del agua

1. ¿Qué es la industria textil?

La industria textil comprende todas las actividades que están involucradas en la producción de fibras, hilos y tejidos, además de los productos finales como la ropa, tapicería o textiles técnicos. Esta cadena inicia con la obtención de la materia prima, las cuales pueden ser naturales como el algodón y la lana, o sintéticas como el poliéster o el nylon. El proceso continúa con el hilado, tejido, teñido, acabado y confección (Kadolph, 2010).

La industria ha evolucionado desde prácticas artesanales hasta procesos altamente tecnificados y globalizados. Su presencia es clave en el desarrollo económico de muchas naciones, especialmente aquellas con disponibilidad de mano de obra intensiva y acceso a mercados internacionales (Ellen MacArthur Foundation, 2017). La industria textil es una fuente de empleo y exportaciones muy importante, lo que la convierte en una fuente económica muy relevante, tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo.

La industria textil abarca una cadena de producción compleja que inicia con la obtención de materia prima, ya sea de origen natural (como el algodón, la lana o el lino) o sintético (como el poliéster y el nylon). Estas, se someten a un proceso de limpieza y preparación antes de ser transformadas en fibras hiladas. Una vez finalizada la limpieza, las fibras son tejidas o tricotadas para formar telas mediante técnicas como el tejido plano o de punto. Una vez obtenida la tela base, se aplica una serie de tratamientos químicos o físicos conocidos como los acabados, que incluyen el blanqueo, teñido, estampado y suavizado del material (Kadolph, 2010; European Parliamentary Research Service, 2019).

La relevancia productiva de la industria está acompañada de una alta carga ambiental. La transformación textil requiere grandes volúmenes de agua y productos químicos, especialmente en procesos como el teñido, lavado y el acabado de las telas, lo cual genera aguas residuales con compuestos orgánicos persistentes, metales pesados y

colorantes difíciles de degradar (Babu, Parande & Kumar, 2007; European Parliamentary Research Service, 2019). Debido a esto, la industria textil se ha identificado como una de las más contaminantes a nivel global.

2. Importancia económica de la industria textil a nivel global

La industria textil representa un segmento económico de gran relevancia en la economía mundial. En 2024, el mercado global de textiles alcanzó aproximadamente US 1.11 billones, con una proyección de crecimiento hasta US 1.61 billones en 2033, mostrando una tasa compuesta anual (CAGR) estimada en 4.2 % durante el periodo 2025-2033 (Grand View Research, 2024). Esta expansión se debe en gran parte a tendencias como la *fast fashion*, el aumento del consumo en economías emergentes, y una creciente preferencia por prendas asequibles y de rápida rotación (Grand View Research, 2024).

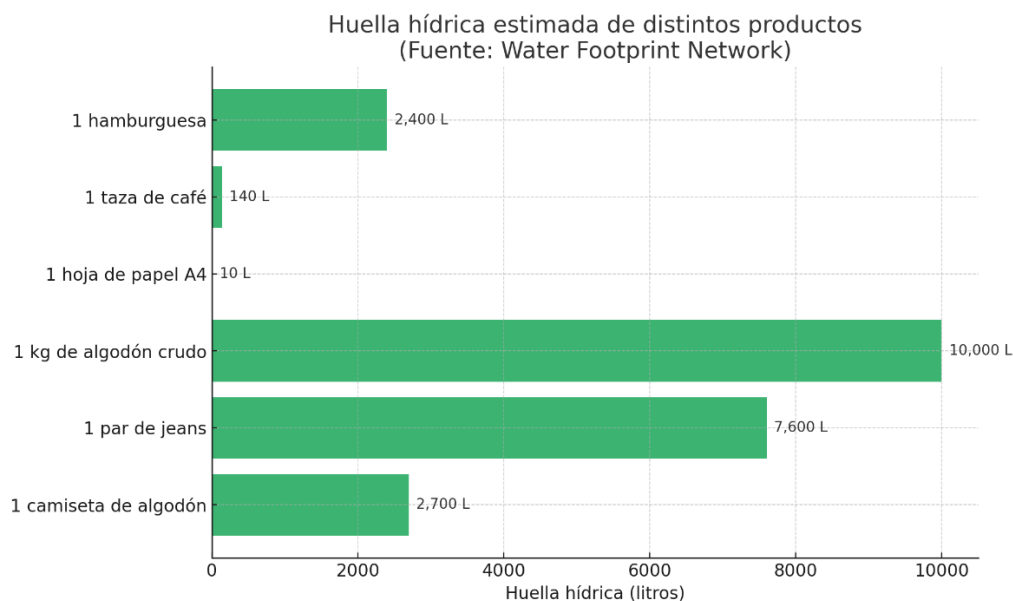
La industria tiene un rol significativo en el comercio internacional. En 2022, las exportaciones textiles mundiales sumaron cerca de US 339 mil millones, aunque hubo una caída del 4.2 % respecto al año anterior, principalmente por la disminución de la demanda de equipos de protección (PPE) tras la pandemia (FASH455, 2023). Geográficamente, Asia-Pacífico acaparó aproximadamente 49.5 % de los ingresos del mercado textil en 2024, mientras que China lidera la producción y exportación global, seguido por Bangladesh, India y Turquía (Grand View Research, 2024; FASH455, 2023). En cuanto al empleo, el sector textil y de confección da trabajo a más de 430 millones de personas en todo el mundo y representa aproximadamente el 1.6 % del PIB global, con un valor de US 1.84 billones en 2025 (UniformMarket, 2025)

3. Consumo de agua y sustancias químicas

La industria textil es una de las más intensivas en el uso de agua. En promedio, se utilizan cerca de 93,000 millones de m³ de agua al año a nivel global para procesos de cultivo, teñido y acabado de telas (Common Objective, 2021; Healthy Materials Lab, 2025). Particularmente, el cultivo del algodón requiere entre 5,961 y 10,000 L de agua por kilogramo de fibra, y puede llegar hasta 22,500 L/kg en regiones áridas (Picoli et al., 2023).

Un ejemplo ilustrativo de esta demanda hídrica es la producción de una sola camiseta de algodón, la cual necesita aproximadamente 2,700 litros de agua considerando todo el ciclo de vida del producto. La cantidad de 2,700 litros se incluye desde la siembra hasta el teñido y acabado, esto según lo ha calculado la *Water Footprint Network* (Hoekstra & Chapagain, 2008; Water Footprint Network, s.f.). Como se muestra en la Figura 1, la huella hídrica de una camiseta de algodón es considerablemente alta en comparación con otros productos de consumo (Water Footprint Network, s.f.).

Figura 1: Huella hídrica estimada de distintos productos



Nota: Elaboración propia (2025) con datos de Water Footprint Network (s.f.).

<https://waterfootprint.org/en/resources/interactive-tools/product-gallery/>

Además del agua, los procesos textiles emplean una gran variedad de productos químicos como colorantes, fijadores, tensioactivos, metales pesados y blanqueantes. Estos agentes no siempre se fijan en los tejidos; se estima que 20 % del agua residual industrial proviene de tintura y acabado textil (European Parliament Research Service, 2019). El vertido de estos efluentes sin tratamiento genera fosas de contaminación, con compuestos persistentes que dañan los ecosistemas y afectan la salud humana. Asimismo, la industria aporta cerca del 20 % de la contaminación acuática industrial mundial (Earth.org, 2023).

4. Características de las aguas residuales textiles

Las aguas que vienen de la industria textil se caracterizan por tener compuestos altamente contaminantes. Como los colorantes, sólidos suspendidos y alta carga de demanda biológica de oxígeno (DBO). Los principales parámetros son:

- Colorantes: Se han reportado concentraciones entre 10 y 800mg/L, aunque se han llegado a registrar 3,776 mg/L en aguas no tratadas. Especialmente en sistemas con tintes reactivos o básicos. (Holkar et al., 2016; Koprivanac et al., 1993). Los colorantes no solo aportan una coloración visible al agua, sino que también dificultan la penetración de luz solar en ecosistemas acuáticos, interfiriendo con la fotosíntesis y afectando negativamente a la vida acuática (Abid et al., 2012).
- DQO: Los valores de demanda química de oxígeno oscilan entre 413 y 7,000 mg O₂/L, dependiendo de la concentración de contaminantes y procesos específicos (MDPI, 2024; Patel & Vashi, 2010).
- DBO: Suele presentar cifras comparables o ligeramente menores que la DQO debido a la presencia de compuestos biodegradables y no biodegradables. Sin embargo, suele ser menos mencionada que la DQO (Patel & Vashi, 2010).
- DBO: Suele presentar cifras comparables o ligeramente menores que la DQO debido a la presencia de compuestos biodegradables y no biodegradables. Sin embargo, suele ser menos mencionada que la DQO (Patel & Vashi, 2010).
- Sólidos: Presentan elevadas cantidades de sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos disueltos totales (SDT), contribuyendo significativamente a la turbidez y complejidad del tratamiento (Holkar et al., 2016).

5. Impactos ambientales del vertido sin tratamiento

Verter aguas residuales textiles sin tratamiento representa una grave amenaza para el ecosistema, sobre todo al acuático. La coloración intensa producida por los colorantes sintéticos reduce la penetración de luz. Esto hace que se inhiba la fotosíntesis y provoca la

disminución en la producción de oxígeno. Lo cual causa repercusiones negativas en la flora y fauna acuática (Environmental and Health Effects of Textile Industry Wastewater, 2012).

Las aguas suelen contener compuestos tóxicos, en altos niveles, como metales pesados (cromo, plomo, cadmio), cloruros y compuestos químicos oxidantes, que pueden bioacumularse y causar daños en la cadena alimenticia. Esto puede afectar la reproducción y salud de organismos acuáticos y presentar riesgos sanitarios para los humanos (Holkar et al., 2016; Organización Mundial de la Salud, s. f.). Los ríos expuestos a aguas residuales no tratadas de la industria textil han registrado disminuciones significativas en la biodiversidad. Los organismos más tolerantes se vuelven dominantes, resultado de la contaminación crónica (Frontiers in Environmental Science, 2021).

B. Industria textil en Guatemala

1. Relevancia económica y social

La industria textil y de vestuarios en Guatemala es uno de los sectores más estratégicos para la economía nacional. La industria representa el 8.6 % del Producto Interno Bruto del país y el 23.4 % de la producción manufacturera, consolidándose como el mayor generador de divisas dentro del sector industrial. Además, genera aproximadamente 180,000 empleos directos e indirectos, con una alta participación femenina, de aproximadamente el 46%, en la fuerza laboral (Fundesa, 2024). En Guatemala existen más de 500 empresas, que abarcan desde hilanderías, tejedurías y plantas de teñido, hasta empresas de confección, bordado, acabado y proveedores de maquinaria. Esta integración vertical permite ofrecer servicios de manufactura completos bajo esquemas de *full package* y *quick response*, lo cual ha sido clave para atraer marcas internacionales. Como indica el informe: “The sector is organized into a value chain that includes yarn and fabric production, textile finishing, garment manufacturing and inputs supply” (Fundesa, 2024, p.10). En términos comerciales, las exportaciones del sector alcanzaron los US\$2,023 millones en 2023, lo que representa el 13.7 % de todas las exportaciones del país, siendo Estados Unidos su principal destino. “La combinación de capacidades industriales, ubicación geográfica y acceso preferencial a mercados como el

estadounidense ha posicionado a Guatemala como un destino atractivo para el *nearshoring* en América Latina” (Fundesa, 2024, p.9).

2. Tipo de productos fabricados y exportados

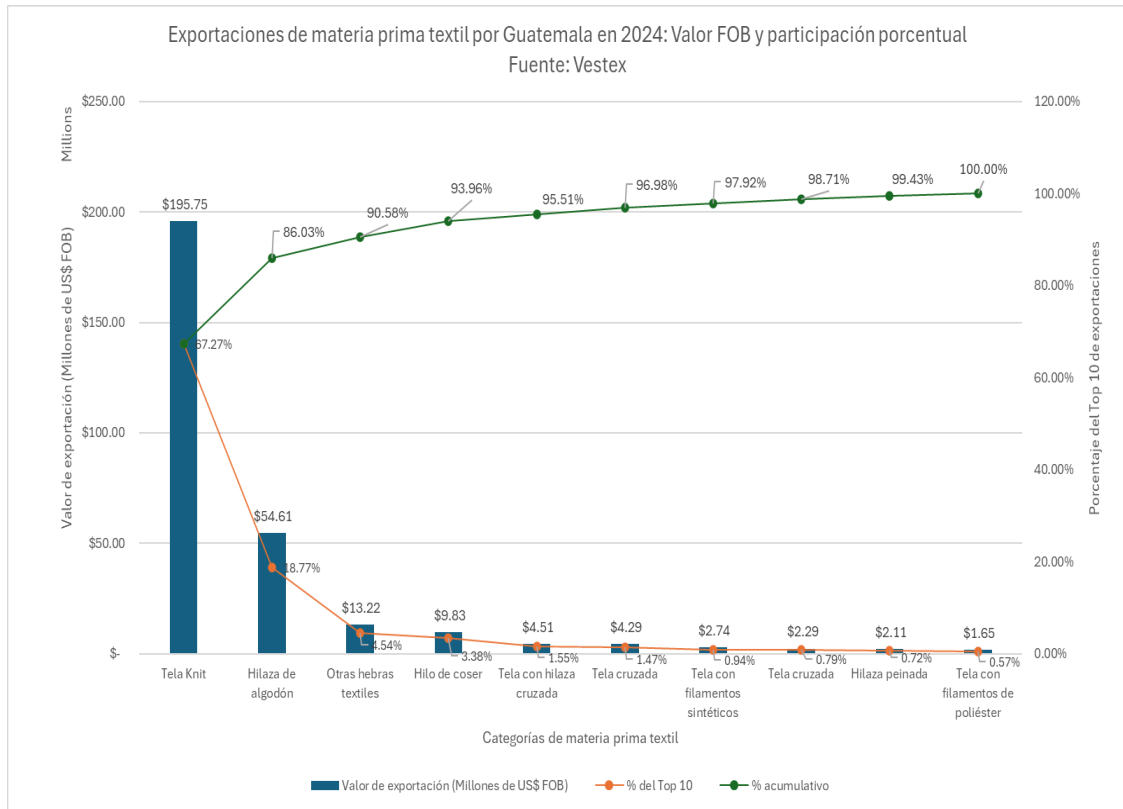
La industria textil y de vestuario en Guatemala se ha consolidado como un sector clave dentro de las exportaciones del país, no solo por su volumen, sino también por la especialización en determinados productos. Según datos de VESTEX (2024), las principales exportaciones del sector pueden clasificarse en dos grandes categorías: materia prima textil y prendas de vestir terminadas. Ambas están dominadas por productos elaborados a partir de algodón y tejidos tipo *knit*.

En el ámbito de materia prima, la tela *knit* fue el producto más exportado en 2024, con un valor *Free on Board* (FOB) o libre a bordo de US\$195.75 millones, lo cual representó el 67.27 % del total de las exportaciones en esta categoría. Le siguen la hilaza de algodón (US\$54.61 millones, 18.77 %) y otras hebras textiles (US\$13.22 millones, 4.54 %). Estos tres productos concentran más del 90 % del total exportado en materias primas, lo que refleja una alta concentración en pocos productos, orientados en su mayoría al procesamiento de algodón (véase **Figura 1**).

Las camisas *knit* de algodón, son la principal prenda de exportación en esta categoría con mucha diferencia. Se generaron US\$710.60 millones, equivalentes al 59.73 % del total de exportaciones de ropa, seguidas por las camisas *knit* sintéticas (US\$265.60 millones, 22.32 %) y pantalones o shorts de algodón (US\$74.05 millones, 6.22 %). Como en el caso anterior, los tres productos más representativos concentran más del 88 % del valor total exportado en confecciones (véase **Figura 2**). Esto sugiere que la industria guatemalteca está fuertemente orientada a la exportación de básicos de gran volumen, especialmente de tejidos *knit*, como camisetas y ropa casual.

Esta concentración no solo define la estructura productiva y comercial del país, sino que también tiene implicaciones ambientales relevantes. Por ejemplo, el uso predominante de algodón y tintes oscuros como el índigo en jeans y camisetas puede asociarse a un alto consumo de agua y generación de residuos industriales.

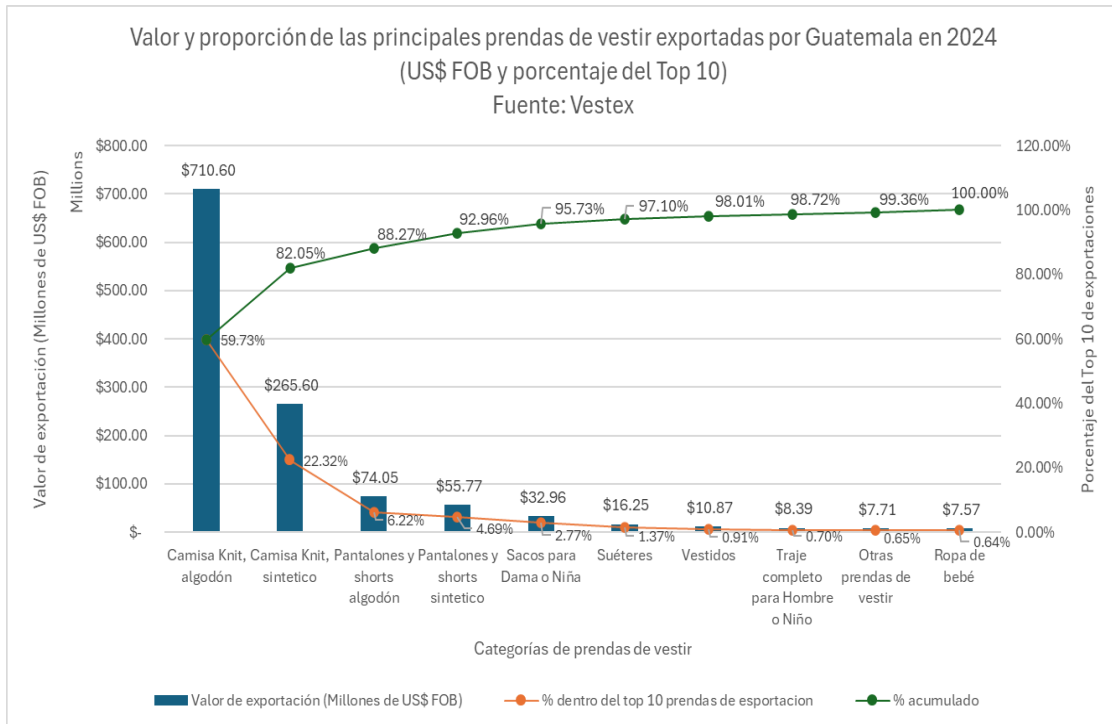
Figura 2: Exportaciones de materia prima textil por Guatemala en 2024: Valor FOB y participación porcentual



Nota: Elaboración propia (2025) con datos de VESTEX (2024).

<https://vestex.com.gt/estadisticas/>

Figura 3: Valor y proporción de las principales prendas de vestir exportadas por Guatemala en 2024 (US\$ FOB y porcentaje del Top 10)



Nota: Elaboración propia (2025) con datos de VESTEX (2024).

<https://vestex.com.gt/estadisticas/>

3. Problemáticas ambientales reportadas

La industria textil guatemalteca ha sido señalada como una de las actividades manufactureras con mayor impacto ambiental. Esto debido al uso intensivo de agua y la descarga de aguas residuales sin el tratamiento adecuado, entre muchas otras. Muchas de las fábricas textiles se ubican cerca de fuentes de agua como ríos o lagos, lo que incrementa el riesgo de la contaminación directa. Según el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN), existen antecedentes de descargas de efluentes sin el cumplimiento de normativas ambientales, afectando cuerpos de agua como el río Villalobos, río Las Vacas y el lago de Amatitlán, ambos en áreas urbanas con alta concentración de actividad textil.

4. Legislación y control ambiental

En Guatemala, la legislación ambiental relacionada con descargas industriales está regulada principalmente por el Acuerdo Gubernativo 236-2006, también conocido como el reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos. Esta normativa establece los límites máximos permisibles para efluentes líquidos industriales. El objetivo de esta normativa es proteger la salud pública y los ecosistemas acuáticos. Se regulan parámetros como el pH, demanda biológica de oxígeno (DBO5), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales, color, nitrógeno, fósforo y metales pesados. Estos valores son críticos para evitar los severos impactos de la industria textil sobre los cuerpos acuáticos por los efluentes con altas cargas orgánicas y presencia de colorantes de sus aguas residuales.

El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) es la autoridad encargada de aplicar esta normativa. El MARN opera a través de inspecciones, licencias ambientales y requerimientos de monitoreo. Sin embargo, diversas evaluaciones técnicas han señalado deficiencias en la fiscalización y cumplimiento. Especialmente en sectores industriales con alta densidad, como lo puede ser el textil. La falta de infraestructura de tratamiento y la débil capacidad sancionatoria han permitido que muchas empresas operen sin cumplir completamente con los parámetros establecidos.

C. Colorantes textiles

1. ¿Qué son los colorantes textiles?

Los colorantes textiles son sustancias químicas, generalmente orgánicas, que se utilizan para proporcionar color a diferentes tipos de fibras, como algodón, poliéster, lana o nylon. Los colorantes se disuelven en el medio de aplicación y se fijan a las fibras por mecanismos físicos o químicos, como enlaces covalentes, interacciones iónicas o difusión. Están diseñados, por su estructura molecular, para absorber selectivamente ciertas longitudes de onda visible, esto genera la percepción de color (Hunger, 2003).

En la industria textil, hay colores que presentan mayor frecuencia de uso debido a las preferencias del consumidor y tendencias del mercado. El color negro es ampliamente el color más popular en la moda contemporánea, especialmente en camisas, ropa formal y prendas básicas. Representa cerca del 30 % de las elecciones del consumidor (Big Brand Wholesale, s.f.). Por otro lado, el azul, en especial el azul marino, ocupa el segundo lugar en términos de popularidad, y forma parte de las opciones más comercializadas en ropa casual y formal. Más del 50 % de las personas encuestadas en diversos países lo identifican como su color favorito (Big Brand Wholesale, s.f.). Esta alta prevalencia de negro y azul en textiles implica un uso intensivo de colorantes sintéticos asociados a estos tonos.

2. Clasificación general

Los colorantes textiles se clasifican según su base en su afinidad con los distintos tipos de fibras y el mecanismo químico mediante el cual se fijan al sustrato. Esta clasificación es esencial para la industria textil, ya que determina tanto el proceso de teñido como la resistencia del color frente a los lavados, la luz y otros agentes externos (Hunger, 2003; Zollinger, 2004). La gran diversidad de colorantes permite una enorme gama de aplicaciones en la industria, pero también implica diferencias significativas en el comportamiento ambiental. En especial en lo que respecta a la degradabilidad, la toxicidad y la resistencia al tratamiento convencional de aguas residuales (Zollinger, 2004).

Entre las categorías más comunes de colorantes se encuentran los directos, reactivos, ácidos, básicos, dispersos, sulfurosos, *vat dyes* y azoicos. Cada uno tiene características específicas de solubilidad, estructura química y compatibilidad con diferentes fibras. Por ejemplo, los colorantes reactivos son ideales para fibras celulósicas como el algodón, ya que forman enlaces covalentes permanentes con la fibra. Los colorantes dispersos se utilizan para poliéster, ya que son prácticamente insolubles en agua y se fijan mediante difusión dentro de la fibra. Los colorantes ácidos son típicamente usados en fibras proteicas como lana o seda, aprovechando la carga iónica de la fibra para formar enlaces electrostáticos.

3. Propiedades de los colorantes sintéticos

Los colorantes sintéticos son compuestos orgánicos diseñados para generar color mediante la absorción selectiva de ciertas longitudes de onda de la luz visible. Su estructura molecular está compuesta por grupos cromóforos, que son los responsables del color (como azo $-N=N-$, antraquinona o ftalocianina), y grupos auxocromos, que modifican la intensidad y solubilidad del tinte (como $-OH$, $-SO_3H$, $-NH_2$). (Zollinger, 2004, p.72).

Una de sus principales características son su alta afinidad por las fibras textiles específicas. Esto les permite tener una fijación más durable, aunque varía según el tipo de colorante. Por ejemplo, los colorantes reactivos se enlazan covalentemente a fibras celulósicas como el algodón, mientras que los dispersos se introducen por difusión en el poliéster (Hunger, 2003).

Algunos colorantes contienen estructuras tóxicas o carcinogénicas, como los compuestos *azo* que pueden liberar aminas aromáticas bajo ciertas condiciones. Esto ha generado preocupación ambiental y ha impulsado regulaciones más estrictas en diversos países sobre su uso y disposición final. (Zollinger, 2004, p.74)

4. Colorantes directos

i. Definición y características

Los colorantes directos son tintes sintéticos aniónicos que se aplican directamente sobre las fibras celulósicas como algodón, rayón o lino, sin necesidad de mordientes químicos (Hunger, 2003). Debido a su estructura lineal y plana, estos colorantes presentan una alta afinidad física con las fibras vegetales, lo que permite una buena cobertura del color, aunque con resistencia limitada al lavado. Los colorantes directos mayormente pertenecen a las familias de los azoicos y catiónicos. Pero también pueden ser estructuras basadas en trifenilmetano o ftalocianina. Su alta solubilidad en agua y su disponibilidad en una amplia gama de tonos los han convertido en una opción económica y ampliamente utilizada en la industria textil para la producción masiva de tejidos teñidos (Zollinger, 2004).

ii. Mecanismo de fijación a fibras

Los colorantes directos se fijan a fibras celulósicas como el algodón mediante interacciones físicas no covalentes. Principalmente por puentes de hidrogeno y fuerzas de Van der Waals (Hunger, 2003). Estas interacciones se dan entre los grupos hidroxilo de la celulosa y los grupos funcionales del colorante, que suelen incluir grupos sulfonato para mejorar la solubilidad y la afinidad con la fibra (Zollinger, 2004). Aunque no forman enlaces covalentes, la fijación puede ser reforzada con tratamientos posteriores que mejoran su resistencia a los lavados.

iii. Dificultades en su remoción

Los colorantes directos son difíciles y complejos de eliminar de las aguas residuales debido a su alta solubilidad, su estructura molecular estable y la ausencia de enlaces covalentes con las fibras. Esto les permite permanecer disueltos en el agua, incluso después del proceso de teñido. Además, su resistencia a la degradación biológica limita la eficacia de tratamientos convencionales, por lo que frecuentemente se requieren métodos avanzados como adsorción o procesos de oxidación (Zollinger, 2004).

iv. Direct Black 22

El Direct Black 22 es un colorante azoico aniónico o catiónico ampliamente utilizado en la industria textil para teñir fibras celulósicas como algodón, lino o rayón. Se caracteriza por su color negro intenso, alta solubilidad en agua y buena afinidad con la fibra, lo que permite su aplicación directa sin necesidad de mordientes (Zollinger, 2004). Su estructura contiene múltiples grupos *azo* (-N=N-) y grupos sulfonato (-SO₃⁻) que mejoran su solubilidad y fijación mediante interacciones no covalentes como puentes de hidrógeno y fuerzas de Van der Waals. Su estructura molecular extensa favorece la adsorción física a la fibra, pero también le confiere alta estabilidad química, lo que dificulta su degradación en tratamientos convencionales (Hunger, 2003).

En el apartado ambiental, el Direct Black 22 ha sido reportado como un colorante persistente y tóxico, con el potencial de generar subproductos carcinogénicos (como aminas aromáticas) si se llegara a degradar parcialmente en condiciones anaerobias (Holkar et al., 2016). Su eliminación eficiente requiere procesos avanzados como adsorción, oxidación química o tecnologías de membrana, ya que presenta una resistencia significativa a la biodegradación (Zollinger, 2004).

5. Colorantes reactivos

i. Definición y características

Los colorantes reactivos se caracterizan por su capacidad de formar enlaces covalentes permanentes con las fibras celulósicas como el algodón. Esto les da una alta solidez contra el lavado y la luz (Hunger, 2003). Esta reacción ocurre entre los grupos funcionales del colorante (como halotriazina o vinilsulfona) y los grupos hidroxilo de la celulosa, generalmente en medio alcalino (Zollinger, 2004).

Son valorados por su alta durabilidad, pero no todo el colorante aplicado reacciona con la fibra. Una parte significativa permanece en la solución y se descarga en los efluentes. Esto genera una alta carga contaminante en las aguas residuales.

ii. Mecanismo de reacción con fibras celulósicas

Los colorantes reactivos se fijan a fibras celulósicas como el algodón mediante una reacción química de sustitución nucleofílica, en la que los grupos hidroxilo (-OH) de la celulosa reaccionan con los grupos reactivos del colorante, como halotriazina o vinilsulfona. Esta reacción ocurre normalmente en un medio alcalino y a temperaturas moderadas, lo que facilita la apertura del grupo reactivo y la formación de un enlace covalente estable con la fibra (Zollinger, 2004).

El resultado de la reacción es una unión química permanente que otorga al tejido una excelente resistencia al lavado y al frote, superior a la de los colorantes que se fijan solo por interacciones físicas. Sin embargo, esta reacción no siempre es completamente eficiente, ya que parte del colorante puede hidrolizarse antes de reaccionar con la fibra, disminuyendo el rendimiento del teñido y generando mayor carga contaminante en el efluente. (Hunger, 2003, p. 37)

iii. Dificultades en su remoción

Debido a su estructura molecular, la cual está diseñada para resistir la degradación, los vuelve persistentes en los medios acuáticos. Muchos colorantes reactivos pueden pasar si ser alterados por tratamientos biológicos convencionales. Esto no solo dificulta su remoción física o química, sino que además permite que mantengan su color y propiedades tóxicas por largos períodos, afectando ecosistemas acuáticos y dificultando el reuso del agua (Hunger, 2003).

Por lo que para remover estos colorantes se necesitan tecnologías más avanzadas de adsorción con materiales especiales con procesos de oxidación avanzada o filtración por membranas. Esto eleva significativamente los costos y la complejidad operativa de las plantas de tratamiento.

iv. Reactive Blue 203

El Reactive Blue 203 es un colorante reactivo bifuncional de tonalidad azul muy oscura, utilizado principalmente para teñir fibras celulósicas como algodón y viscosa. Pertenece a la familia de los colorantes vinilsulfónicos, lo que le permite formar enlaces covalentes estables con la celulosa en condiciones alcalinas, otorgando excelente solidez al lavado y a la fricción. (Zollinger, 2004, p.153)

Su estructura contiene al menos un grupo cromóforo antraquinónico o similar, responsable de su color intenso, así como grupos sulfonato ($-\text{SO}_3^-$) que

mejoran su solubilidad en agua. Gracias a esta composición, el Reactive Blue 203 es muy eficaz en procesos industriales donde se requiere alta uniformidad de color y resistencia. Sin embargo, al igual que otros colorantes reactivos, su eficiencia de fijación es limitada, por lo que una fracción considerable se pierde en el agua residual (Zollinger, 2004).

D. Procesos de tratamientos de aguas residuales

1. Métodos físicos

Los métodos físicos en el tratamiento de aguas residuales se basan en principios mecánicos o físicos para separar contaminantes sólidos del agua. Generalmente son la primera etapa en las plantas de tratamiento y su objetivo principal es remover materiales que pueden interferir en los procesos posteriores. Como lo pueden ser sólidos grandes, arenas, aceites, grasas, partículas en suspensión (Metcalf & Eddy, 2014). En esta etapa no se modifica la composición química del agua, pero una etapa esencial para proteger etapas posteriores del tratamiento. Reducen la carga contaminante inicial y previenen daños en equipos más sensibles. Aunque no eliminan colorantes ni compuestos disueltos, sí son clave en sistemas que tratan efluentes textiles, al facilitar la remoción de residuos sólidos y fibras (Tchobanoglous et al., 2003).

2. Métodos químicos

Los métodos químicos en el tratamiento de aguas residuales consisten en la aplicación de reactivos o compuestos químicos que provocan reacciones específicas con los contaminantes presentes. Esto se hace para neutralizarlos, descomponerlos, aglutinarlos o transformarlos en formas menos dañinas. Estos procesos suelen aplicarse en combinación con tratamientos físicos y biológicos, especialmente cuando se busca remover sustancias no biodegradables o difíciles de separar por medios mecánicos (Metcalf & Eddy, 2014).

Para las aguas residuales de la industria textil, estos métodos son especialmente importantes para tratar colorantes y productos auxiliares que no pueden ser eliminados por

medios biológicos o físicos. Esto los convierte en una herramienta clave para cumplir con normativas ambientales más estrictas (Tchobanoglous et al., 2003).

La adsorción es un proceso fisicoquímico mediante el cual una sustancia se adhiere a la superficie de un sólido adsorbente, y se utiliza principalmente para eliminar compuestos orgánicos no biodegradables y colorantes del agua. (Metcalf & Eddy, 2014, p. 997)

3. Métodos biológicos

Los métodos biológicos son procesos de tratamiento de aguas residuales que utilizan microorganismos para degradar y estabilizar la materia orgánica disuelta o en suspensión. Estos procesos simulan mecanismos naturales, pero en condiciones controladas que aceleran la remoción de contaminantes orgánicos biodegradables (Metcalf & Eddy, 2014).

Estos métodos son eficaces para reducir la DBO, sólidos orgánicos y nutrientes. Pero tienen limitaciones ante compuestos tóxicos o no biodegradables, como los colorantes sintéticos, detergentes industriales o metales pesados. Por eso, en aguas textiles, el tratamiento biológico se suele combinar con procesos fisicoquímicos avanzados (Tchobanoglous et al., 2003)

4. Etapas del tratamiento de aguas residuales

i. Tratamiento primario: remoción de sólidos gruesos

El tratamiento primario es la primera etapa estructurada en una planta de tratamiento de aguas residuales. Su objetivo principal es la remoción de sólidos suspendidos gruesos y materia sedimentable mediante procesos físicos. Aunque no reduce significativamente la carga orgánica disuelta, sí disminuye la cantidad de sólidos y grasas que podrían interferir en etapas posteriores (Metcalf & Eddy, 2014).

En esta etapa no se eliminan colorantes ni contaminantes solubles. Su función es proteger y optimizar la eficiencia del tratamiento secundario y terciario, reduciendo obstrucciones, desgaste de equipos y costos operativos.

En esta etapa se puede llegar a remover entre el 30 y el 60 % de los sólidos suspendidos totales (SST) y hasta un 35 % de la demanda bioquímica de oxígeno (Tchobanoglous et al., 2003).

ii. Tratamiento secundario: degradación de materia orgánica

El objetivo principal del tratamiento secundario es la remoción de la materia orgánica biodegradable disuelta y coloidal mediante procesos biológicos. Este tratamiento reduce de forma acelerada los procesos naturales de descomposición, empleando microorganismos que consumen compuestos orgánicos. Estos los transforman en productos finales más estables, como dióxido de carbono, agua y biomasa celular (Metcalf & Eddy, 2014).

La eficiencia de este tratamiento contra los contaminantes no biodegradables o tóxicos es limitada. Sin embargo, durante esta etapa se puede llegar a eliminar hasta 85–95 % de la demanda bioquímica de oxígeno y una proporción importante de nitrógeno y fósforo, dependiendo de las condiciones del sistema (Tchobanoglous et al., 2003).

iii. Tratamiento terciario: remoción de contaminantes específicos

El tratamiento terciario, también es conocido como tratamiento avanzado, incluye un conjunto de procesos diseñados para eliminar contaminantes que no son removidos en las etapas primarias ni secundarias. Esto incluye nutrientes, metales pesados, compuestos orgánicos persistentes y colorantes sintéticos (Metcalf & Eddy, 2014).

Estos métodos permiten alcanzar con los estándares ambientales más estrictos o permitir el reúso del agua tratada en procesos industriales. Sin embargo, también implican mayores costos operativos y tecnológicos, por lo que su aplicación suele reservarse para contaminantes prioritarios o zonas con alta sensibilidad ambiental (Tchobanoglous et al., 2003).

E. Adsorción

1. Definición y fundamento del proceso

La adsorción es un proceso fisicoquímico mediante el cual ciertas moléculas o iones presentes en una fase fluida (líquida o gas) se concentran sobre la superficie de un sólido denominado adsorbente. Esto se debe a las interacciones de carácter físico o químico del mismo (Treybal, 1980). En la absorción el componente penetra todo el volumen del material. Sin embargo, en la adsorción se limita a la superficie externa o a los poros del sólido, por lo que la eficiencia depende directamente de la superficie disponible y de las características del material. Este proceso es muy utilizado en ingeniería ambiental, principalmente para la eliminación de contaminantes persistentes. Como lo pueden ser colorantes sintéticos, metales pesados y compuestos orgánicos no biodegradables, que se encuentran presentes en efluentes industriales (Foo & Hameed, 2010).

2. Mecanismos de adsorción: física y química.

El proceso de adsorción involucra tres etapas principales: La primera es la transferencia de masa externa. En esta fase, el adsorbato se desplaza desde el volumen del fluido hasta la superficie del adsorbente. La segunda etapa es la difusión intraparticular. En esta etapa las moléculas migran a través de los poros del material. Por último, la tercera etapa es la fijación superficial. Aquí el adsorbato se retiene en sitios activos mediante interacciones físicas o químicas (Treybal, 1980). En función de la naturaleza de la interacción final, la adsorción puede clasificarse en:

- Adsorción física (fisisorción): ocurre por fuerzas de Van der Waals, no se forman enlaces químicos, es reversible y puede permitir la formación de multicapas. Es típica en procesos de purificación o retención superficial sin modificar la estructura química del contaminante.
- Adsorción química (quimisorción): implica la formación de enlaces covalentes o iónicos entre adsorbente y adsorbato. Es más específica, suele ser irreversible y se limita la formación de monocapa, siendo adecuada cuando se requiere una retención más fuerte o selectiva (Treybal, 1980).

El proceso de adsorción también puede estar limitado por la velocidad de transferencia de masa. En sistemas líquidos, esta limitación es más significativa. Esto se

debe a la menor difusividad en comparación a los sistemas gaseosos. Por ello, es fundamental considerar tanto aspectos termodinámicos (afinidad y equilibrio) como cinéticos (tiempo de contacto, gradiente de concentración, resistencia a la difusión) al diseñar un proceso de adsorción (Treybal, 1980).

3. Interacciones Físicas: Van der Waals y Difusión superficial

La adsorción física se produce cuando las moléculas del adsorbato se adhieren a la superficie del adsorbente mediante fuerzas de Van der Waals. Las fuerzas de Van der Waals son fuerzas intermoleculares débiles y no específicas. Surgen de la atracción de dipolos permanentes, dipolos inducidos y fluctuaciones temporales en la distribución electrónica de la molécula, conocidas como fuerzas de dispersión o de London. Este tipo de interacción es útil para cuando se busca retener compuestos sin alterarlos químicamente. Se utiliza en procesos de purificación, secado o eliminación de contaminantes con bajas concentraciones (Treybal, 1980).

A diferencia de los enlaces covalentes o iónicos, las fuerzas de Van der Waals no implican transferencia ni compartición de electrones. Esto hace que la estructura química del adsorbato permanece intacta. Por esta razón, la fisisorción:

- Es reversible, ya que el adsorbato puede liberarse fácilmente con cambios en temperatura o presión.
- Es más fuerte a bajas temperaturas, ya que el aumento térmico tiende a romper estas interacciones débiles.
- Puede formar multicapas sobre la superficie del sólido, a diferencia de la quimisorción, que suele ser mono molecular (Treybal, 1980).

4. Interacciones químicas: Enlaces covalentes e intercambio iónico

La adsorción química se da cuando las moléculas del adsorbato forman enlaces químicos con los sitios activos del adsorbente. Estas interacciones pueden incluir enlaces covalentes, enlaces o intercambio iónicos, dependiendo de la naturaleza del sólido y del soluto (Treybal, 1980).

Cuando se busca una retención selectiva, una activación superficial o una modificación química del adsorbato, como en procesos catalíticos o de remediación avanzada, la quimisorción es clave. A diferencia de la fisisorción, la adsorción química:

- Generalmente es irreversible, ya que implica una transformación química o una unión más fuerte.
- Requiere energía de activación, por lo que suele presentarse a mayores temperaturas.
- Ocurre con una alta especificidad, ya que solo ciertas moléculas pueden reaccionar con ciertos grupos funcionales de la superficie.
- Se limita normalmente a la formación de una monocapa de adsorbato (Treybal, 1980).

5. Principales adsorbentes comerciales.

Entre los adsorbentes comerciales más utilizados se encuentran el carbón activado, las zeolitas y las resinas de intercambio iónico. El carbón activado es el referente industrial por su alta área superficial y estructura microporosa. Es especialmente eficaz para eliminar colorantes *azo*, antraquinónicos y reactivos (Crini, 2006). Sin embargo, entre sus limitaciones presenta su alto costo, su necesidad de regeneración frecuente y menor selectividad ante compuestos muy polares.

Algunos de los adsorbentes comerciales más empleados destacan:

- Carbón activado: Es el material de referencia en la industria por su alta área superficial (hasta 2000 m²/g) y estructura microporosa, eficaz para eliminar colorantes *azo*, antraquinónicos y reactivos. Su mecanismo de adsorción es predominantemente físico, aunque puede incluir interacciones químicas superficiales (Crini, 2006).
- Zeolitas: Son minerales microporosos con capacidad de intercambio iónico y selectividad por tamaño de molécula, empleados principalmente para remoción de metales y ciertos compuestos orgánicos.

- Resinas de intercambio iónico: polímeros sintéticos con grupos funcionales activos que permiten el intercambio de iones entre la solución y la resina, utilizadas para desmineralización y remoción selectiva de contaminantes cargados.

En las últimas décadas se han investigado el uso de adsorbentes derivados de biomasa como alternativas sostenibles. En especial residuos agroindustriales lignocelulósicos. Estos materiales, como las cascaras de coco o bagazo de caña, son abundantes, de bajo costo y contienen grupos funcionales capaces de interactuar con contaminantes mediante la adsorción física y química. Además, aplicar pretratamientos simples como un lavado, molienda o hidrólisis es posible aumentar su área superficial y exponer sitios activos, mejorando su capacidad de remoción de colorantes (Babel & Kurniawan, 2003).

6. Ventajas y limitaciones del carbón activado como adsorbente

La alta efectividad del carbón activado como adsorbente se le atribuye a una combinación de propiedades químicas y estructurales. Esto lo vuelven un material versátil y confiable en múltiples aplicaciones. Algunas de sus ventajas principales son:

- Alta área superficial específica (hasta 2000 m²/g), que permite una gran capacidad de adsorción por unidad de masa.
- Porosidad bien desarrollada, que facilita el acceso del soluto al interior del material.
- Amplio espectro de adsorción, adecuado para compuestos orgánicos, colorantes, fármacos y pesticidas.
- Disponibilidad comercial y estandarización, lo que permite su aplicación en sistemas industriales a gran escala (Babel & Kurniawan, 2003; Crini, 2006).

Sin embargo, también presenta limitaciones importantes que deben tomarse en cuenta. Estas limitaciones han motivado la búsqueda de adsorbentes alternativos.

Se buscan materiales de bajo costo, sostenibles y económicamente viable en ciertos contextos. Entre las principales limitaciones se encuentran:

- Requiere regeneración, lo que implica procesos térmicos o químicos adicionales que incrementan los costos operativos y pueden deteriorar su estructura con el tiempo.
- Pérdida de eficiencia en soluciones con pH extremos, alta carga de sólidos o presencia de compuestos muy polares o iónicos.
- Baja selectividad, ya que actúa principalmente por adsorción física, sin afinidad específica por ciertos contaminantes (Crini, 2006; Treybal, 1980).
- Eficiencia variable en condiciones externas: Factores como el pH, la temperatura y la presencia de sólidos suspendidos pueden reducir significativamente la capacidad adsorbente, afectando la confiabilidad del proceso en escenarios reales.
- Costo elevado de adquisición y operación, especialmente cuando se requiere tratamiento de grandes volúmenes de agua o cuando se utilizan adsorbentes de alta pureza o grado industrial.
- Infraestructura asociada al mantenimiento y reemplazo, que incluye sistemas de recuperación, reactivación o disposición segura del material agotado, lo cual puede ser inviable para industrias pequeñas o municipios con recursos limitados (Robinson et al., 2001).

7. Biomasa como opción sostenible

El uso de biomasa como material adsorbente ha surgido como una alternativa sostenible frente a los adsorbentes comerciales tradicionales. En especial para el tratamiento de aguas contaminadas con colorantes y otros compuestos orgánicos. El uso de residuos agroindustriales o naturales se basa en su valorización por su abundancia, bajo costo, biodegradables y en muchos casos, eficaces tras tratamientos mínimos (Babel & Kurniawan, 2003).

La biomasa está compuesta principalmente de materiales lignocelulósicos, es decir, estructuras ricas en celulosa, hemicelulosa y lignina. Esto debido a que contienen numerosos grupos funcionales como hidroxilos, carboxilos, fenoles y éteres. Estos grupos pueden interactuar con contaminantes mediante mecanismos de adsorción física y química, incluyendo puentes de hidrógeno, fuerzas de Van der Waals, y enlaces iónicos o covalentes débiles (Crini, 2006).

El uso de biomasa ofrece ventajas ambientales al reducir la carga de residuos sólidos, generar valor agregado en cadenas productivas agrícolas, y disminuir la dependencia de insumos importados o costosos. Este enfoque se alinea con los principios de la economía circular, donde los residuos se convierten en recursos útiles.

8. Factores que favorecen la adsorción

La eficacia del proceso de adsorción depende de las diversas propiedades fisicoquímicas del sistema, tanto del adsorbente como del adsorbato. Estas propiedades determinan la intensidad de las interacciones entre ambos y, por lo tanto, el tipo y la cantidad de material que se adsorbe. Algunos de los factores que causan y favorecen la adsorción son:

- Superficie específica: Es uno de los principales factores más influyentes. A mayor área superficial disponible por unidad de masa del adsorbente, mayor será la capacidad de retener moléculas del soluto. Los materiales porosos, como el carbón activado o las biomásas lignocelulósicas tratadas, ofrecen superficies internas amplias que facilitan la adsorción (Treybal, 1980).
- Polaridad: La naturaleza polar o apolar del adsorbato y el adsorbente afecta la afinidad entre ambos. Por ejemplo, colorantes aniónicos tienden a ser adsorbidos preferentemente por superficies con grupos funcionales de carga positiva, y viceversa. En el caso de biomasa modificada, la introducción de grupos ácidos o básicos altera esta polaridad superficial y mejora la interacción (Treybal, 1980)

- Carga superficial y pH: La carga superficial del adsorbente varía con el pH del medio. Esto influye directamente en la interacción del adsorbente con el colorante. En soluciones acuosas, un adsorbente con grupos funcionales ionizables puede atraer iones con carga opuesta a través de fuerzas electrostáticas. Por tanto, el pH de la solución condiciona tanto la ionización del colorante como la del adsorbente, modificando la eficiencia del proceso (Treybal, 1980).
- Naturaleza química del adsorbente: La presencia de grupos funcionales como hidroxilos, carboxilos o carbonilos en la superficie del material adsorbente contribuye a mejorar las interacciones con ciertos solutos, especialmente en procesos de quimisorción.
- Tamaño de partícula: El tamaño de partícula del adsorbente es un factor directamente influyente en la eficiencia del proceso de adsorción. Las partículas más pequeñas tienen una mayor relación área superficial/volumen. Esto permite un mejor contacto entre el adsorbato y el adsorbente y una difusión más rápida hacia los poros internos. Además, al reducir el tamaño se acortan las distancias de difusión. Esto hace que se favorezca la velocidad como la capacidad de adsorción, especialmente en materiales porosos como biomásas tratadas.

(Treybal, 1980)

9. Comparación general de adsorción con otros métodos de remoción de color

La adsorción se diferencia de otros métodos de remoción de color por su alta capacidad para eliminar contaminantes disueltos sin necesidad de reacciones químicas intensivas ni la necesidad de consumir grandes cantidades energéticas. A diferencia de la coagulación–floculación, que se limita a remover partículas suspendidas o coloides, la adsorción es eficaz para compuestos disueltos de baja biodegradabilidad, como colorantes sintéticos. En comparación con la oxidación avanzada, ofrece una operación más sencilla y de menor costo, aunque no degrada químicamente los contaminantes, sino que los transfiere a una fase sólida. Frente a métodos biológicos, la adsorción no depende de la actividad microbiana, lo que permite su aplicación en efluentes con compuestos tóxicos o

inhibidores. Sin embargo, su eficacia puede disminuir ante cargas muy elevadas y requiere una adecuada disposición o regeneración del material adsorbente (Robinson et al., 2001).

10. Ventajas y limitaciones del método

La adsorción ofrece múltiples ventajas como la alta eficiencia en la remoción de color y de contaminantes persistentes. La flexibilidad para tratar diferentes tipos de efluentes y facilidad de operación en comparación con otros métodos avanzados como la oxidación avanzada. Entre sus limitaciones se incluyen la pérdida de eficiencia ante cargas de contaminantes muy elevadas, la saturación del adsorbente y los costos asociados a la regeneración o remplazos del material. Por ello, la búsqueda de adsorbentes alternativos de bajo costo y alto rendimiento es un área activa de investigación para mejorar la sostenibilidad del proceso (Crini, 2006; Robinson et al., 2001).

F. Coagulación-floculación

1. Definición de coagulación y floculación

La coagulación-floculación es un proceso fisicoquímico empleado para la remoción de partículas suspendidas, coloidales y algunas sustancias disueltas en el agua o efluentes industriales. En la coagulación se adicionan sustancias químicas llamadas coagulantes, las cuales neutralizan las cargas eléctricas superficiales de las partículas. Lo que reduce las fuerzas de repulsión y favorece la aglomeración. En la floculación, la mezcla suave permite que las partículas coaguladas se unan formando agregados de mayor tamaño llamados flóculos. Estos pueden ser separados posteriormente por sedimentación o filtración (Tchobanoglous et al., 2003).

En el tratamiento de aguas residuales textiles, la coagulación–floculación se utiliza para reducir la turbidez, eliminar materia orgánica y, en ciertos casos, remover parte del color presente en el efluente, aunque su eficacia frente a colorantes solubles suele ser limitada (Verma et al., 2012).

2. Diferencias entre ambas etapas

La principal diferencia entre la coagulación y la floculación es su función y condiciones de operación. La coagulación es una etapa química, caracterizada por la rápida dispersión del coagulante en el agua para neutralizar las cargas de las partículas. Esto requiere una agitación rápida y homogénea. En cambio, la floculación es una etapa física de mezcla lenta, cuyo objetivo es permitir que las partículas previamente desestabilizadas se agrupen en flóculos grandes y densos sin romperse. La eficiencia de la floculación depende del tiempo de retención, la intensidad de agitación y el tipo de floculante empleado (Bolto & Gregory, 2007).

3. Principales coagulantes y floculantes comerciales

Existen múltiples coagulantes y floculantes utilizados en la industria, cada uno con distintos propósitos, sin embargo, entre los más utilizados se encuentran:

- Coagulantes metálicos: sulfato de aluminio (alumbre), cloruro férrico y sulfato ferroso son los más empleados en el tratamiento de aguas, por su alta eficiencia en la neutralización de cargas y formación de hidróxidos metálicos que adsorben contaminantes.
- Coagulantes orgánicos sintéticos: poliacrilamidas y polidialildimetilamonio, que se emplean como coagulantes primarios o auxiliares.
- Floculantes: pueden ser inorgánicos (arcillas activadas) u orgánicos (polímeros naturales como quitosano o derivados de almidón) que favorecen la unión de partículas en la etapa final del proceso (Bolto & Gregory, 2007).

4. Funcionamiento general y variables de operación

El proceso se inicia con la dosificación del coagulante en el efluente y su dispersión mediante agitación rápida para asegurar el contacto con todas las partículas. Luego se reduce la velocidad de agitación para iniciar la floculación. Esto permite el crecimiento y consolidación de los flóculos. Entre las variables operativas más importantes destacan:

- pH: cada coagulante posee un rango óptimo de pH que maximiza su rendimiento.

- Dosis de coagulante: una dosis insuficiente no logra neutralizar todas las cargas, mientras que un exceso puede provocar restabilización coloidal.
- Tiempo y velocidad de agitación: la coagulación requiere agitación rápida y breve; la floculación, agitación lenta y prolongada.
- Temperatura: influye en la formación de flóculos, siendo las temperaturas bajas menos favorables por disminuir la velocidad de reacción y la densidad de las partículas (Tchobanoglous et al., 2003).

5. Limitaciones y ventajas del método

Entre las ventajas que ofrece la coagulación-floculación se encuentran la rápida reducción de turbidez y sólidos suspendidos y la capacidad de remover parte del color cuando este se encuentra asociado a partículas coloides. Es un proceso altamente conocido, fácil de implementar y adaptable a distintas escalas de tratamiento. Sin embargo, presenta limitaciones en su eficiencia para disminuir colorantes solubles de alta estabilidad, genera grandes volúmenes de lodos que requieren un tratamiento adicional y disposición final y depende de condiciones óptimas de pH y dosis para mantener un buen rendimiento (Bolto & Gregory, 2007; Verma et al., 2012).

6. Comparación general con otros métodos

En comparación con la adsorción, la coagulación-floculación es más eficaz para eliminar sólidos suspendidos y turbidez que para remover colorantes solubles. Frente a métodos de oxidación avanzada, presenta menor complejidad y costo, pero carece de capacidad para degradar compuestos orgánicos persistentes. En relación con procesos biológicos, su acción es inmediata y no depende de microorganismos, pero genera lodos que requieren manejo y disposición adecuados (Verma et al., 2012).

G. Filtración biológica

1. Definición y fundamento de la filtración biológica

La filtración biológica es un proceso de tratamiento de aguas residuales que combina tanto métodos físicos como biológicos para remover contaminantes. El medio

filtrante retiene mecánicamente sólidos suspendidos y sirve como soporte para el desarrollo de biopelículas microbianas. Estas desgradan la materia orgánica disuelta y coloidal. Esto permite lograr una depuración más eficiente que la filtración mecánica convencional. Esta acción conjunta permite lograr una depuración más eficiente que la filtración mecánica convencional. En las aguas residuales de la industria textil, la filtración biológica se emplea principalmente como tratamiento secundario o terciario. Lo que contribuye a la reducción de la carga orgánica y, en algunos casos, a la disminución parcial de color, dependiendo de la biodegradabilidad de los compuestos presentes (Tchobanoglous et al., 2003; Khandegar & Saroha, 2013).

2. Tipos de sistemas de filtración biológica

Entre los sistemas más utilizados se encuentran:

- Filtros percoladores: consisten en un lecho de material poroso sobre el que se distribuye el efluente; la biopelícula que crece en el medio degrada los contaminantes a medida que el agua percola.
- Biofiltros de arena: utilizan capas de arena y grava como medio filtrante; son comunes en aplicaciones pequeñas y en tratamientos de pulimento.
- Lechos móviles o fijos (MBR/MBBR): incorporan medios plásticos de alta superficie específica que sirven de soporte a la biomasa, mejorando la retención de microorganismos y la eficiencia de depuración.

(Tchobanoglous et al., 2003)

3. Funcionamiento general y variables de operación

El proceso inicia con la alimentación del efluente sobre el medio filtrante, permite que los contaminantes se puedan retener mecánicamente y pueden ser degradados por la biopelícula. Las variables más relevantes para este proceso son:

- Carga hidráulica: influye en el tiempo de contacto entre el agua y el medio filtrante.

- Carga orgánica: determina la capacidad de la biomasa para degradar la materia orgánica presente.
- Velocidad de filtración: debe equilibrar la eficiencia de retención y la prevención de colmatación del medio.
- Temperatura: afecta la tasa metabólica de la biomasa, siendo óptimas temperaturas moderadas.
- Oxigenación: fundamental para mantener la actividad microbiana aerobia.

(Tchobanoglous et al., 2003)

4. Ventajas y limitaciones del método

La filtración biológica presenta ventajas importantes, como el bajo costo operativo, la posibilidad de aprovechar medios filtrantes naturales o reciclados y la capacidad de combinar remoción física y biológica en un solo paso. Sin embargo, su rendimiento disminuye frente a compuestos poco biodegradables, como los colorantes sintéticos. Además, puede llegar a requerir mantenimiento periódico para evitar la colmatación y el reemplazo o lavado del medio filtrante (Khandegar & Saroha, 2013).

5. Comparación general con otros métodos de remoción de color

En comparación a otros métodos como la adsorción o la filtración biológica presenta menores costos operativos y puede mantener su funcionamiento de forma continua. Sin tener que sustituir frecuentemente los insumos, aunque su eficiencia para colorantes persistentes es limitada. Frente a otros métodos como la coagulación-floculación, tiene la ventaja de generar menos lodos, pero tiene tiempo de respuesta más largos y depende de la actividad microbiana. Con procesos como la oxidación avanzada, es un proceso más simple y económico. Pero carece de la capacidad para degradar compuestos altamente resistentes a la biodegradación (Tchobanoglous et al., 2003).

H. Oxidación avanzada

1. Definición de procesos de oxidación avanzada (POAs)

Los procesos de oxidación avanzada (POA) son tecnologías que utilizan oxidantes potentes, generalmente generadores de radicales hidroxilos (-OH), con el propósito de degradar compuestos orgánicos recalcitrantes presentes en el agua. Los radicales hidroxilos poseen un potencial de oxidación muy alto (2.8 V), estos reaccionan de manera no selectiva con la mayoría de los compuestos orgánicos. Rompe los enlaces químicos y transforma los contaminantes complejos en moléculas más simples, hasta llegar a productos finales como dióxido de carbono, agua y sales minerales (Glaze et al., 1987).

En aguas residuales textiles, los POA se utilizan para tratar colorantes sintéticos que presentan resistencia a métodos convencionales, como lo pueden ser reactivos y dispersos. Estos son poco biodegradables y pueden persistir durante largos periodos en el medio acuático (Robinson et al., 2001).

2. Formación de radicales hidroxilos y reacciones principales

Los radicales hidroxilos se generan a partir de diferentes combinaciones de agentes oxidantes y fuentes de energía. Una vez formados, reaccionan rápidamente con los contaminantes por mecanismos de adición, sustitución o escisión de enlaces, transformándolos en compuestos más simples y, en condiciones óptimas, mineralizándolos hasta CO₂, agua y sales minerales. La elevada reactividad de los radicales implica que deben producirse en el mismo medio donde se encuentran los contaminantes, ya que su vida media es extremadamente corta (Pera-Titus et al., 2004).

3. Principales POAs

- Fenton: combina peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y sales ferrosas (Fe²⁺) para generar radicales hidroxilos en medio ácido.
- Foto-Fenton: es una variante del proceso de Fenton que incorpora radiación UV para regenerar los iones Fe²⁺ y aumentar la producción de radicales.

- Reacción de Fenton y foto-Fenton: emplean una mezcla de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y sales ferrosas (Fe^{2+}) para generar radicales hidroxilos; en el foto-Fenton se utiliza radiación UV para potenciar la producción de radicales.
- Ozonización: utiliza ozono (O_3) como oxidante directo y como generador de radicales hidroxilos en condiciones alcalinas.
- Peróxido de hidrógeno con catalizadores y UV: emplea la fotólisis de H_2O_2 para liberar radicales $\cdot\text{OH}$, pudiendo incorporar catalizadores metálicos para aumentar la eficiencia.
- Procesos electroquímicos avanzados: combinan la generación electrolítica de oxidantes con la activación fotoquímica o catalítica.

(Glaze et al., 1987)

4. Condiciones generales de operación

El rendimiento de los POAs depende de factores como:

- pH: en el proceso Fenton, el rango óptimo es de 2.5 a 3.5; en ozonización y UV/ H_2O_2 , pH alcalino favorece la producción de radicales.
- Dosis de oxidante: debe ser suficiente para oxidar los contaminantes sin generar consumo innecesario de reactivos.
- Tiempo de reacción: influye directamente en el grado de degradación alcanzado.
- Presencia de interferentes: compuestos inorgánicos como carbonatos o cloruros pueden reaccionar con los radicales, reduciendo su disponibilidad para atacar el contaminante objetivo.

(Pera-Titus et al., 2004)

5. Ventajas y limitaciones del método

Los POA tienen la gran ventaja de poder degradar los contaminantes resistentes, al poderlos mineralizar completamente sin la necesidad de separar fases sólidas. Además, pueden aplicarse como tratamiento terciario para cumplir con normativas estrictas. Sin embargo, sus principales limitaciones incluyen el alto costo de operación por consumo

de energía y reactivos, la necesidad de control estricto de variables como pH y dosis, y la generación de subproductos que en algunos casos pueden ser tóxicos. Esto podría llegar a requerir tratamientos posteriores (Robinson et al., 2001).

6. Comparación general con otros métodos

Los POA, en comparación con la adsorción, no transfieren el contaminante a otra fase. Sino que lo degradan, lo que evita el problema de la regeneración o la disposición del adsorbente. En comparación con la coagulación-floculación, presentan mayor capacidad para eliminar colorantes solubles y no generan grandes volúmenes de lodos, aunque su costo es bastante más elevado. En relación con la filtración biológica, tienen la ventaja de actuar sobre compuestos no biodegradables, pero carecen de la estabilidad operativa y el bajo costo que ofrecen los sistemas biológicos (Robinson et al., 2001).

I. Biorremediación (enzimática)

1. Definición y concepto general de biorremediación enzimática

La biorremediación enzimática es un proceso biotecnológico que utiliza enzimas purificadas o parcialmente purificadas para transformar, degradar o remover contaminantes presentes en el agua. A diferencia de los tratamientos biológicos convencionales, que requieren de microorganismos completos, esta emplea directamente biomoléculas responsables de la catálisis. Esto permite que actúe en condiciones específicas y sin requerir el crecimiento celular. Para el tratamiento de aguas residuales de la industria textil, se ha estudiado principalmente para la degradación de colorantes sintéticos, incluyendo los colorantes reactivos y azoicos, debido a su alta especificidad y eficiencia en reacciones de oxidación o reducción selectivas (Singh et al., 2015).

2. Mecanismo de acción de enzimas sobre colorantes textiles

Las enzimas actúan acelerando reacciones químicas que transforman la estructura molecular del colorante. Ejemplos comunes incluyen:

- Lacasas (oxidoreductasas): catalizan la oxidación de grupos fenólicos y amínicos, provocando la ruptura de enlaces cromóforos y la pérdida de color.
- Peroxidasas: utilizan peróxido de hidrógeno como oxidante para descomponer enlaces *azo* y estructuras aromáticas.
- Azoreductasas: reducen los enlaces *azo* (-N=N-) presentes en muchos colorantes sintéticos, generando aminas aromáticas más simples.

(Bhunja et al., 2001)

En general, las reacciones enzimáticas pueden llevar a la despolimerización parcial o completa del colorante, facilitando su posterior degradación o eliminación (Bhunja et al., 2001).

3. Principales enzimas utilizadas

Las enzimas pueden obtenerse de varias maneras, como de cultivos microbianos, extractos vegetales o incluso agroindustriales. Esto abre la posibilidad de procesos más sostenibles y económicos. Algunos de las más comunes son:

- Hongos ligninolíticos: producen lacasas y peroxidasas con alta capacidad de oxidación.
- Bacterias reductoras: generan azoreductasas y otras enzimas específicas para colorantes azoicos.
- Plantas y residuos vegetales: contienen peroxidasas y lacasas que pueden extraerse y purificarse para su uso.

(Singh et al., 2015)

4. Factores que afectan la actividad enzimática

El desempeño de la biorremediación enzimática depende de:

- pH y temperatura óptimos: cada enzima presenta un rango óptimo que maximiza su actividad catalítica.

- Disponibilidad de cofactores: algunas enzimas requieren mediadores redox o cofactores como el H₂O₂.
- Concentración de sustrato: niveles excesivos de contaminante pueden inhibir la actividad enzimática.
- Presencia de inhibidores: metales pesados o compuestos tóxicos pueden desactivar las enzimas.

(Singh et al., 2015)

5. Ventajas y limitaciones frente a otros métodos biológicos o químicos

Las principales ventajas incluyen la alta especificidad hacia determinados contaminantes, la posibilidad de operar en un rango amplio de condiciones y la ausencia de generación de lodos biológicos voluminosos. Pero, también presenta algunas limitaciones como el alto costo de las enzimas ya sea en su adquisición o producción. Su sensibilidad a condiciones extremas y la necesidad de regeneración o remplazo periódico de la actividad enzimática (Bhunia et al., 2001; Singh et al., 2015).

6. Comparación general con otros métodos de remoción de color

En comparación con la adsorción, la biorremediación enzimática no transfiere el contaminante a otra fase, sino que lo transforma químicamente, reduciendo la necesidad de tratamiento posterior de un residuo sólido. Frente a la oxidación avanzada, puede trabajar a menor costo energético y en condiciones más suaves, pero con una gama más limitada de compuestos objetivo. En relación con la coagulación–floculación, genera menos residuos sólidos y puede actuar sobre colorantes solubles sin necesidad de ajuste químico intenso, aunque su velocidad de tratamiento puede ser menor y depende de la estabilidad enzimática (Bhunia et al., 2001; Singh et al., 2015).

J. Palma africana como material adsorbente

1. ¿Qué es la palma africana (*Elaeis guineensis*)?

La palma africana (*Elaeis guineensis*) es una especie perenne proveniente de África Occidental. Se cultiva porque de sus frutos se extraen el aceite de palma crudo y el

aceite de palmiste, los cuales son utilizados en las industrias alimentaria, cosmética, farmacéutica y energética (FAO, 2022).

El fruto de la palma africana es el cultivo oleaginoso más eficiente en términos de producción. Tiene un rendimiento de 3 a 6 toneladas de aceite por hectárea al año, y una vida útil comercial de hasta 30 años, generando grandes cantidades de residuos vegetales (Corley & Tinker, 2016).

2. Producción global de palma africana

La producción mundial de aceite de palma ha crecido considerablemente en las últimas décadas. Hoy es el principal cultivo oleaginoso del mundo, alcanzando los 80 millones de toneladas a nivel mundial en el periodo 2024–2025. La mayoría de la producción mundial, 83%, proviene de Indonesia y Malasia (Our World in Data, 2025; USDA, 2025). Actualmente, el aceite de palma representa más del 35 % de la producción mundial de aceites (FAO, 2022).

3. Tipos de residuos derivados

La agroindustria de la palma africana procesa racimos de fruto fresco (RFF). Estos se separan en 2 tras ser procesados: en productos (aceite crudo de palma y palmiste) y subproductos: racimos vacíos (EFB/tusa), fibra de mesocarpio y cuesco (cáscara de palmiste). En materiales comerciales genera, los rangos típicos sobre el RFF son EFB \approx 20–23 %, fibra \approx 11–14 % y cuesco \approx 5–7 (García, Cárdenas, & Yáñez, 2010; Van Dam, 2016).

El rendimiento de aceite crudo de palma (CPO) equivale en promedio a \approx 20 % del RFF, mientras que el aceite de palmiste (PKO) añade \approx 2–2.5 % del RFF; esto significa que, entre los dos, $CPO + PKO \approx 22–25$ % del racimo es aprovechable, sujeto al genotipo, la madurez del fruto al ser recolectado y eficiencia del molino en el que se procesa (MPOB, 2024; García et al., 2010).

4. Composición química relevante para la adsorción

Los residuos de palma africana presentan una composición predominantemente lignocelulósica, esto significa que están formados en su mayoría por celulosa,

hemicelulosa y lignina los cuales le permiten actuar como adsorbentes naturales (Corley & Tinker, 2016).

La celulosa es un polisacárido lineal con grupos hidroxilo (-OH), los cuales pueden formar enlaces por puentes de hidrógeno con contaminantes polares. La hemicelulosa también posee grupos funcionales que pueden participar en interacciones físicas y químicas con moléculas presentes en soluciones acuosas, a pesar de ser más amorfa y ramificada que la celulosa. La lignina es una macromolécula aromática compleja con grupos fenólicos y metoxilos, que favorece interacciones hidrofóbicas y enlaces π - π con compuestos orgánicos, como los colorantes textiles (Corley & Tinker, 2016).

La proporción de cada uno de estos puede variar según el tipo de residuo (raquis, fibra, cáscara), la edad de la planta y las condiciones de cultivo y procesamiento. La biomasa también puede contener cenizas, extractos y minerales traza (Corley & Tinker, 2016). Todos estos factores pueden afectar la capacidad de adsorción de colorantes.

5. Procesamiento básico del residuo para el uso como adsorbente

Para ser utilizados como adsorbentes, los residuos de palma africana requieren un procesamiento básico que incluye secado, trituración y tamizado. Estos procesamientos ayudan a reducir la humedad, aumentar el área superficial y homogenizar el tamaño de partícula. Adicionalmente, es común aplicar tratamientos químicos simples, como lavados con agua, o tratamientos químicos con soluciones ácidas o alcalinas (por ejemplo, HCl o NaOH), que ayudan a eliminar compuestos no deseados, como grasas o ceras vegetales, y a exponer grupos funcionales activos que mejoran la afinidad por contaminantes. Estos tratamientos también pueden aumentar la porosidad del material y mejorar su capacidad adsorbente, especialmente frente a colorantes y otras moléculas orgánicas en solución (Babel & Kurniawan, 2003).

6. Usos generales de la palma africana

El producto principal de la palma africana es el aceite de palma, es ampliamente utilizado en la industria alimentaria, cosmética y de biocombustibles. Además, a partir de sus frutos, semillas y residuos lignocelulósicos se obtienen subproductos útiles en

la generación de energía, alimentación animal, elaboración de fertilizantes orgánicos y materiales industriales como tableros aglomerados o fibras compuestas. Esta diversidad de usos convierte a la palma africana en una planta de alto valor económico, cuyo aprovechamiento integral contribuye a mejorar la sostenibilidad del cultivo (Corley & Tinker, 2016).

7. Modificaciones Químicas del residuo: Hidrólisis ácida y básica

i. Fundamento químico de la hidrólisis

En la hidrólisis ácida, se rompen los enlaces glucosídicos que unen las unidades de glucosa en la celulosa y la hemicelulosa. Esto libera azúcares solubles y debilita la matriz del material, generando una estructura más porosa y con mayor exposición de grupos funcionales. En cambio, la hidrólisis alcalina, actúa sobre los enlaces éster y éter de la lignina y la hemicelulosa. Este tratamiento ayuda a remover parcialmente estos componentes, provocando una hinchazón de la fibra y dejando disponibles grupos activos como -OH y -COOH en la superficie del adsorbente. Ambos tipos de hidrólisis inducen transformaciones químicas controladas que aumentan la reactividad superficial del material, facilitando su interacción con contaminantes como colorantes y metales pesados. (Babel & Kurniawan, 2003).

ii. Cambios estructurales inducidos

La hidrólisis ácida o básica aplicada a residuos lignocelulósicos genera cambios estructurales importantes que mejoran su capacidad adsorbente. Estos tratamientos hacen que haya un aumento considerable en la porosidad, disgregan parcialmente la matriz de celulosa, hemicelulosa y lignina, y exponen grupos funcionales activos en la superficie del material. En particular, se introducen o revelan grupos como -OH y -COOH, que favorecen la interacción con contaminantes mediante enlaces de hidrógeno, fuerzas electrostáticas o complejación. Estos cambios transforman un residuo vegetal sin procesar en un material más reactivo y eficiente para procesos de adsorción en soluciones acuosas (Babel & Kurniawan, 2003).

iii. Efectos en la capacidad de adsorción

Las modificaciones inducidas por la hidrólisis química tienen un impacto directo en la capacidad de adsorción del material lignocelulósico. Al aumentar la porosidad y exponer grupos funcionales activos, se incrementa significativamente el número de sitios disponibles para la retención de contaminantes. Esto permite una mejor interacción entre el adsorbato y la superficie del adsorbente, tanto a través de adsorción física (por fuerzas de Van der Waals y difusión superficial) como por adsorción química, mediante enlaces iónicos o covalentes débiles. Diversos estudios han demostrado que residuos tratados químicamente pueden duplicar o incluso triplicar su eficiencia de remoción en comparación con materiales sin modificar (Babel & Kurniawan, 2003).

8. Usos actuales de los residuos

Entre los usos actuales de los subproductos predomina la valorización in situ. La tusa/EFB se devuelve al campo como acolchado y fuente de nutrientes o se compostaba; en un diagnóstico multirregional, ≈ 83 % de la EFB se reincorporaba a plantación, ≈ 15 % se compostaba y ≈ 2 % se quemaba en caldera (limitación por humedad). En paralelo, la fibra de mesocarpio y el cuesco se emplean como biocombustible en las calderas de la propia extractora para generar vapor y electricidad (García et al., 2010; Van Dam, 2016).

9. Precios de los residuos en el mercado

En Colombia, un diagnóstico sectorial (año base 2008) reportó que el cuesco (PKS) era el único subproducto con venta a terceros, con 15.000–40.000 COP/t “puesta en el punto de acopio” de las extractoras; al tipo de cambio promedio de 2008 (≈ 1.967 COP/USD), ello equivale a \approx USD 7.6–20.3/t (García, Cárdenas, & Yáñez, 2010; Banco de la República–TRM). En contraste, en el mercado asiático de PKS de exportación, Argus evaluó el precio FOB (costa este de Sumatra) en USD 105.31/t el 3/ene/2024 (tras un máximo histórico de USD 133.18/t el 21/jun/2023), reflejando costos de acondicionamiento (secado/cribado), logística portuaria y una demanda regulada por

requisitos de sostenibilidad para generación eléctrica bajo el programa FIT de Japón (Argus Media, 2024; USDA/FAS, 2023).

10. Fibra de mesocarpio

La fibra de mesocarpio de la palma africana constituye uno de los principales residuos sólidos generados durante el proceso de extracción de aceite crudo, representando entre el 12 y 15 % del peso fresco del fruto (Corley & Tinker, 2016). Este subproducto es un material lignocelulósico compuesto principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, además de contener restos de aceites y compuestos lipídicos que pueden conferirle propiedades superficiales particulares. Se encuentra en la parte carnosa del fruto, entre la cáscara externa y el huesco que protege la almendra, y representa una fracción significativa del peso del racimo. Esta fibra se caracteriza por su color marrón oscuro, textura fibrosa y alto contenido de compuestos lignocelulósicos como celulosa, hemicelulosa y lignina. En la agroindustria palmera suele emplearse principalmente como combustible en calderas, aunque también se ha estudiado para otros usos debido a su abundancia y bajo costo (Corley & Tinker, 2016).

11. Huesco

El huesco de la palma africana es la parte dura y leñosa que recubre la almendra del fruto, ubicada en el interior del mesocarpio. Representa alrededor del 6 a 8 % del peso total del racimo y se caracteriza por su alta dureza y resistencia mecánica, lo que se debe a su elevado contenido de lignina y a la estructura compacta de sus fibras. Tradicionalmente, el huesco se ha utilizado como combustible en calderas para la generación de energía en los ingenios palmeros, aunque también se ha explorado su aprovechamiento en la producción de carbón activado, materiales compuestos y como agregado en la construcción. Su disponibilidad y propiedades físicas lo convierten en un subproducto de interés para aplicaciones industriales y ambientales (Corley & Tinker, 2016).

K. Producción de palma africana en Guatemala

1. Superficie cultivada y producción anual

Uno de los cultivos más extensivos y tecnificados de Guatemala es la palma africana. En el 2020 se reportaron 180,614 hectáreas cultivadas, esto corresponde aproximadamente al 2.5 % del área agrícola nacional (GREPALMA, 2021). En el ciclo 2023-2024 Guatemala produjo 990,000 toneladas de aceite crudo, con un rendimiento promedio de 5.05 toneladas por hectárea (USDA, 2024). Esta productividad es una de las más altas a nivel mundial. Además, se estima que cerca del 80% de la producción nacional se destina a exportación. Esto consolida al país como uno de los principales exportadores de aceite de palma en América Latina (Al Jazeera, 2021).

2. Impacto social y ambiental del monocultivo

La producción de aceite de palma en Guatemala se ha consolidado como un motor socioeconómico importante, generando tanto ingresos por divisas y empleo como desafíos ambientales y sociales. “En 2022, con una producción de 1,020,000 toneladas, el país se situó como el sexto productor mundial y el tercer mayor exportador, con exportaciones por 818,500 toneladas y un ingreso de divisas cercano a los 940 millones USD, un incremento del 32 % interanual” (GREPALMA, 2023, p.2). Además, el sector creó alrededor de 30,000 empleos directos y pagó más de 130 millones USD en salarios en esa misma campaña (GREPALMA, 2023).

Desde el punto de vista ambiental y social, si bien el 70 % de la producción cuenta con certificaciones como RSPO o ISCC, la expansión hacia áreas forestales y territorios indígenas ha generado tensiones y desafíos de sostenibilidad (GREPALMA, 2023; Mongabay, 2024). Debido al crecimiento de la superficie cultivada en zonas como Peten y Alta Verapaz ha sido asociado con conflictos por tierras y riesgos ambientales, como pérdida de biodiversidad y degradación de cuencas hídricas (Mongabay, 2024).

3. Crecimiento de las siembras en el país en las últimas décadas

La palma africana ha mostrado un crecimiento sostenido en Guatemala durante los últimos diez años, con una expansión de más de 100 mil hectáreas en menos de dos décadas (GREPALMA, 2023). El incremento se debe por la alta demanda internacional

y la competitividad del país como productor eficiente. Sin embargo, el crecimiento ha generado una mayor generación de residuos agroindustriales, lo cual plantea tanto retos como oportunidades para su aprovechamiento con fines sostenibles, incluyendo su uso en tecnologías ambientales.

4. Disponibilidad de residuos como subproductos

El aumento en la producción de palma africana en Guatemala implica una generación igualmente significativa de residuos agroindustriales, entre ellos el raquis, la fibra del mesocarpio y la cáscara del palmiste. Estos subproductos representan una fracción importante del fruto procesado, suelen acumularse en los alrededores de las plantas extractoras o en los campos de cultivo sin un destino o aprovechamiento específico. Su abundancia, bajo costo y composición lignocelulósica los convierten en materiales atractivos para su valorización con fines ambientales, como su uso en procesos de adsorción para el tratamiento de aguas residuales. Por tanto, su disponibilidad no solo es constante, sino que ofrece una oportunidad estratégica para integrar prácticas de economía circular en el sector palmicultor del país (Corley & Tinker, 2016).

L. Isotermas de Adsorción

1. Isoterma de Langmuir

i. ¿Qué es el Isoterma de Langmuir?

La isoterma de Langmuir es un modelo matemático desarrollado por Irving Langmuir en 1916 para describir el proceso de adsorción de moléculas sobre una superficie sólida (Foo & Hameed, 2010). El modelo parte del supuesto de que la adsorción ocurre en una monocapa, es decir, que cada sitio activo de la superficie del adsorbente puede retener solo una molécula adsorbida y que todos los sitios son energéticamente equivalentes. Además, se asume que no existe interacción entre las moléculas adsorbidas y que el proceso alcanza un

equilibrio dinámico entre la adsorción y la desorción (Langmuir, 1918; Foo & Hameed, 2010).

La isoterma de Langmuir ha sido ampliamente utilizada en estudios de adsorción debido a su sencillez y a su capacidad para estimar parámetros importantes como la capacidad máxima de adsorción y la constante de afinidad del adsorbato por el adsorbente (Al-Ghouti & Da'ana, 2020). Inicialmente fue propuesta para procesos en fase gaseosa, sin embargo, su aplicación se ha extendido también a sistemas líquidos, como la remoción de contaminantes en soluciones acuosas, incluyendo colorantes sintéticos en aguas residuales industriales (Tran et al., 2017).

El modelo permite entender y predecir el comportamiento de diversos materiales adsorbentes, incluyendo biomásas modificadas, frente a diferentes tipos de contaminantes. (Foo & Hameed, 2010).

“La isoterma de Langmuir proporciona una base teórica sólida para describir la adsorción monomolecular sobre superficies homogéneas, siendo una herramienta clave en la caracterización de nuevos materiales adsorbentes” (Foo & Hameed, 2010, p.6).

ii. Supuestos teóricos

La isoterma de Langmuir se basa en un conjunto de supuestos que simplifican el comportamiento de los procesos de adsorción.

- Monocapa: cada sitio activo de la superficie del adsorbente puede ser ocupado por una sola molécula adsorbida, sin posibilidad de formar capas adicionales (Langmuir, 1918).
- Superficie Homogénea: Todos los sitios de adsorción son equivalentes en cuanto a energía y accesibilidad. Esta homogeneidad implica que la probabilidad de adsorción es igual para cualquier sitio libre en la superficie (Foo & Hameed, 2010). Además, se considera que no existe interacción entre las moléculas adsorbidas, por lo que la adsorción en un

sitio no afecta la adsorción en los sitios vecinos (Al-Ghouti & Da'ana, 2020).

- Proceso reversible y equilibrio dinámico entre la tasa de adsorción y la tasa de desorción: Este equilibrio permite el desarrollo de una ecuación que relaciona la cantidad adsorbida con la concentración del soluto en solución, dando origen al modelo matemático de Langmuir.

Estos supuestos, si bien simplifican la realidad de muchos sistemas heterogéneos, permiten una aproximación teórica robusta que ha demostrado ser útil en la caracterización de materiales adsorbentes, especialmente en condiciones controladas o con superficies pretratadas para aumentar su uniformidad (Tran et al., 2017).

iii. Ecuación y forma linealizada

La isoterma de Langmuir se expresa mediante una ecuación no lineal que describe la relación entre la cantidad de soluto adsorbido en equilibrio (q_e , en mg/g) y la concentración de equilibrio en solución (C_e , en mg/L). Esta ecuación es:

$$q_e = \frac{Q_m * K_L * C_e}{1 + K_L * C_e}$$

Donde:

- q_e : Cantidad de adsorbato adsorbido en el equilibrio (mg/g)
- Q_m : Capacidad máxima de adsorción (mg/g)
- K_L : Constante de Langmuir (L/mg)
- C_e : Concentración del adsorbato en el equilibrio (mg/L)

Para facilitar el análisis experimental, esta ecuación puede reordenarse en su forma linealizada más común:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{Q_m \cdot K_L} + \frac{C_e}{Q_m}$$

Esta forma lineal permite determinar los parámetros Q_m y K_L a partir de una gráfica de C_e/q_e contra C_e , donde la pendiente corresponde a $1/Q_m$ y la ordenada al origen a $1/(Q_m \cdot K_L)$. El modelo asume una adsorción monomolecular en sitios homogéneos y sin interacciones entre las moléculas adsorbidas (Langmuir, 1918; Al-Ghouti & Da'ana, 2020).

iv. Parámetros

El modelo de Langmuir permite determinar dos parámetros fundamentales que caracterizan el proceso de adsorción: la capacidad máxima de adsorción (Q_m) y la constante de Langmuir (K_L). Ambos se obtienen a partir del ajuste experimental de la isoterma, generalmente a través de la forma linealizada de la ecuación (Foo & Hameed, 2010).

El parámetro Q_m representa la cantidad máxima de adsorbato que puede retenerse por unidad de masa del adsorbente cuando todos los sitios activos están ocupados. Se expresa en miligramos por gramo (mg/g) y proporciona una medida directa de la capacidad adsorbente del material (Al-Ghouti & Da'ana, 2020). Este valor es útil para comparar la eficiencia de distintos adsorbentes frente a un mismo contaminante.

Por su parte, la constante K_L (L/mg) está relacionada con la afinidad entre el adsorbente y el adsorbato. Un valor elevado de K_L indica una fuerte interacción y, por tanto, una mayor probabilidad de que el adsorbato se fije sobre el adsorbente a bajas concentraciones (Langmuir, 1918). Este parámetro también puede interpretarse como un reflejo indirecto de la energía de adsorción.

2. Isoterma de Freundlich

i. ¿Qué es la isoterma de Freundlich?

La isoterma de Freundlich es un modelo empírico que describe procesos de adsorción sobre superficies heterogéneas. A diferencia de la isoterma de Langmuir, este modelo no asume la formación de una monocapa ni una superficie uniforme, sino que considera una distribución de sitios con diferentes energías de adsorción (Foo & Hameed, 2010). Este modelo es especialmente útil para representar la adsorción en materiales porosos. Los sitios activos no son equivalentes y pueden retener cantidades variables de adsorbato (Al-Ghouti & Da'ana, 2020).

ii. Supuestos teóricos

La isoterma de Freundlich se basa en el supuesto de que la adsorción ocurre sobre una superficie heterogénea, compuesta por múltiples tipos de sitios activos con energías de adsorción distintas. A diferencia del modelo de Langmuir, Freundlich no asume formación de monocapa, sino que permite la adsorción en múltiples capas (Foo & Hameed, 2010).

iii. Parámetros

La ecuación general de la isoterma de Freundlich es:

$$q_e = K_F * C_e^{\frac{1}{n}}$$

Donde:

- q_e : es la cantidad adsorbida en equilibrio (mg/g)
- K_F : es el coeficiente de adsorción de Freundlich (mg/g*(L/mg) ^0.5)
- $1/n$: es el índice de intensidad de adsorción (Adimensional)

Esta ecuación puede linealizarse mediante logaritmos para facilitar su análisis experimental:

$$\log(q_e) = \log(K_F) + \frac{1}{n} * \log(C_e)$$

Un valor de $1/n$ entre 0 y 1 indica que el proceso es favorable, siendo más próximo a cero cuanto mayor es la afinidad entre el adsorbente y el adsorbato.

3. Comparación entre los modelos de Langmuir y Freundlich

Los modelos de Langmuir y Freundlich son dos de las isothermas de adsorción más utilizadas en el análisis de sistemas líquido-sólido. Pero presentan diferencias clave en su fundamento teórico, aplicaciones y parámetros obtenidos. La elección entre ambos modelos depende de del tipo de adsorbente, el comportamiento experimental observado y los objetivos del estudio.

El modelo de Langmuir se basa en supuestos ideales: superficie homogénea, adsorción en monocapa y ausencia de interacción entre moléculas adsorbidas. Esto permite obtener parámetros físicamente significativos, como la capacidad máxima de adsorción (Q_m) y la constante de afinidad (KL), lo cual lo hace útil para propósitos de comparación y diseño (Foo & Hameed, 2010). Por ello, se emplea comúnmente en estudios con materiales pretratados o sistemas que muestran una tendencia clara hacia la saturación (Al-Ghouti & Da'ana, 2020).

La isoterma de Freundlich es de naturaleza empírica y se ajusta mejor a sistemas con superficies heterogéneas o con adsorción en múltiples capas. Aunque es flexible y puede describir una amplia variedad de comportamientos, no permite calcular una capacidad máxima definida, lo cual puede limitar su aplicabilidad en análisis comparativos o de diseño técnico (Abbas et al., 2021).

4. Aplicación en experimentos con colorantes

Los modelos de Langmuir y de Freundlich han sido ampliamente aplicados para describir procesos de adsorción de colorantes sintéticos en solución acuosa. Su utilidad permite modelar el comportamiento de estos contaminantes en sistemas de adsorción natural, modificados o comerciales. El modelo de Langmuir es especialmente frecuente cuando se emplean materiales con superficies homogéneas o tratados, y cuando se observa una tendencia a la saturación de los sitios activos. Por su parte, el modelo de

Freundlich se ha usado mayormente en estudios con biomásas sin tratamiento, donde se presume una superficie heterogénea y una adsorción multicapas (Foo & Hameed, 2010; Al-Ghouti & Da'ana, 2020). En ambos casos, el análisis mediante isotermas permite estimar parámetros comparativos de desempeño frente a diferentes tipos de colorantes y evaluar la viabilidad del adsorbente en aplicaciones ambientales.

5. Importancia del ajuste estadístico

Para validar el modelo de adsorción se requiere un análisis estadístico que evalúe qué tan bien se ajustan los datos experimentales. El coeficiente de determinación (R^2) es uno de los criterios más utilizados, ya que indica el grado de correlación entre los valores observados y los predichos por el modelo. Un R^2 elevado sugiere que el modelo describe adecuadamente el sistema (Al-Ghouti & Da'ana, 2020).

M. Espectrofotometría UV-VIS

La espectrofotometría UV-Visible es una técnica instrumental que se fundamenta en la absorción de radiación electromagnética en la región ultravioleta y visible del espectro. Esta absorción está directamente relacionada con la presencia de grupos cromóforos en las moléculas, lo que permite emplear la ley de Beer-Lambert para establecer una correlación entre la absorbancia y la concentración del analito en solución. Una característica esencial del método es la selección de la longitud de onda de máxima absorbancia ($\lambda_{\text{máx}}$), que garantiza trabajar en la región de mayor sensibilidad y exactitud, favoreciendo la cuantificación confiable de compuestos coloreados en medios acuosos. Gracias a estas propiedades, la espectrofotometría UV-Vis se ha consolidado como una herramienta analítica fundamental en la determinación de colorantes y en el monitoreo de procesos de remoción de contaminantes en aguas residuales (Lindon, Tranter, & Koppenaal, 2017).

N. ANOVA y Tukey

1. ANOVA

El análisis de varianza (ANOVA, por sus siglas en inglés: *Analysis of Variance*) es una herramienta estadística utilizada para determinar si existen diferencias significativas entre las medias de varios grupos o tratamientos. Su fundamento consiste en comparar la variabilidad explicada por los factores de estudio con la variabilidad residual atribuida al azar, mediante el cálculo de razones F. Cuando el valor F obtenido es suficientemente grande en relación con un valor crítico, se concluye que al menos un grupo difiere de los demás con un nivel de confianza definido (Montgomery, 2017). Esta técnica es ampliamente empleada en el ámbito experimental, ya que permite evaluar simultáneamente el efecto de varios factores y sus interacciones sobre una variable de respuesta.

2. Tukey

La prueba de comparaciones múltiples de Tukey, también conocida como prueba de Tukey HSD (*Honestly Significant Difference*), es un procedimiento estadístico que se aplica posterior a un ANOVA cuando se detectan diferencias significativas entre tratamientos. Su objetivo es identificar específicamente cuáles medias difieren entre sí, controlando el error de tipo I asociado a realizar múltiples comparaciones. El método se basa en calcular un rango mínimo de diferencia significativa entre pares de medias, empleando la distribución t de *Student* (q). De esta forma, solo las diferencias mayores al rango crítico se consideran estadísticamente significativas, lo que aporta robustez y confiabilidad al análisis (Montgomery, 2017).

V. ANTECEDENTES

Fathy et al. (2013) estudiaron un tratamiento combinado de NaOH 1 M seguido de ácido cítrico 1 % sobre paja de arroz. El pretratamiento eliminó parte de la lignina y hemicelulosa, generando una estructura más porosa observada por SEM. El área superficial BET pasó de 1.2 m²/g a 12.5 m²/g. En las pruebas de adsorción de azul de metileno, la capacidad máxima se incrementó de 32.6 mg/g a 131.5 mg/g (modelo de Langmuir), evidenciando la importancia de exponer nuevos sitios activos.

Salazar Rubio et al. (2023) destacan que la modificación química de biomasa lignocelulósica mediante tratamiento con ácidos débiles (como H₂SO₄, HCl o HNO₃) incrementa la capacidad de hinchamiento de las fibras y favorece la protonación de grupos funcionales, facilitando su acceso y disposición para la adsorción. Explican que estos tratamientos promueven la eliminación parcial de hemicelulosa y compuestos amorfos, lo cual aumenta significativamente la porosidad y disponibilidad de grupos hidroxilo, carboxilo y carbonilo en la superficie del material. Además, mencionan que la funcionalización con ácidos puede mejorar la selectividad hacia contaminantes iónicos específicos, debido al aumento de sitios catiónicos o aniónicos según el ácido empleado.

Liu et al. (2012) aplicaron hidrólisis ácida con H₂SO₄ diluido (2 %) sobre cáscara de arroz durante 2 h a 80 °C. La caracterización por FTIR mostró una reducción en las señales asociadas a lignina, confirmando la eliminación parcial de este componente. El material tratado duplicó su capacidad de adsorción de verde de malaquita, pasando de 18.2 mg/g a 42.9 mg/g.

Chowdhury et al. (2011) trabajaron con cáscara de arroz tratada con NaOH 5 % durante 1 h a 60 °C para eliminar sílice y lignina superficial. La capacidad de adsorción de rojo Congo aumentó de 18.3 mg/g a 36.5 mg/g. El ajuste de datos al modelo de Langmuir indicó una mejora en la homogeneidad de los sitios de adsorción.

Hassan & Badri (2014) realizaron hidrólisis alcalina de fibra de EFB usando NaOH al 10 % durante 48 h a temperatura ambiente. Este tratamiento eliminó aproximadamente el 13 % de lignina y produjo una superficie más rugosa con cráteres y fisuras, observadas por SEM. El

material trató soluciones de azul de metileno (100 mg/L) alcanzando una capacidad de 29.8 mg/g, frente a 12.4 mg/g de la fibra sin tratar.

Foo y Hameed (2012) realizaron una revisión de procesos de activación física y química de carbones provenientes de residuos agrícolas como cáscara de coco, bagazo de caña y cáscara de arroz. Encontraron que la activación química con KOH o H₃PO₄, a temperaturas entre 400 y 800 °C, produce áreas superficiales de hasta 2000 m²/g y capacidades de adsorción superiores a 500 mg/g para azul de metileno, superando ampliamente a la biomasa sin carbonizar.

En el estudio de Sarwono et al. (2016) trabajaron con racimos vacíos de palma africana (EFB) para producir *biochar* mediante carbonización hidrotermal. El material, previamente secado y triturado, se sometió a un tratamiento en reactor sellado a 200 °C durante 6 h con agua como medio de reacción. El rendimiento en *biochar* fue del 62 %, presentando mayor contenido de carbono fijo y menor contenido de volátiles que la biomasa original. El área superficial aumentó de 3.5 m²/g a 12.4 m²/g y la porosidad total creció un 70 %. Al evaluar la adsorción de azul de metileno, el *biochar* mostró una capacidad de 65 mg/g, superando en más de tres veces el valor de la biomasa sin tratar.

Ibrahim et al. (2021) aplicaron un proceso de funcionalización hidrotérmica con ácido nítrico (HNO₃ 1 M) sobre *biochar* derivado de EFB. La reacción se llevó a cabo a 180 °C durante 3 h. El análisis FTIR mostró la aparición de grupos carbonilos y carboxilos adicionales, mientras que el análisis BET indicó un aumento del área superficial de 16.8 a 21.5 m²/g. Este cambio químico elevó la capacidad de adsorción de azul de metileno de 9.4 mg/g a 68.2 mg/g, demostrando que la introducción de grupos funcionales oxigenados mejora significativamente las interacciones con colorantes catiónicos.

Moussa et al. (2022) demostraron que la activación química con ácido fosfórico (H₃PO₄) es uno de los métodos más eficientes para convertir biomasa lignocelulósica en carbón con estructura porosa. En su revisión, reportan que la impregnación con H₃PO₄ permite generar grandes volúmenes de microporos y desarrollar áreas superficiales específicas superiores a 2 800 m²/g, con rendimientos de carbón entre el 26 % y 85 %. El ácido actúa rompiendo enlaces glucosídicos y aril éter en lignina a bajas temperaturas, promoviendo reacciones de entrecruzamiento que estabilizan

la matriz carbonosa y preservan grupos funcionales oxigenados. Esto otorga al carbón una red interna porosa y química que solo se consigue mediante activación química, sin necesidad de temperaturas extremas.

Sangeetha et al. (2021) investigaron la capacidad de cáscaras de naranja como adsorbente natural para la remoción de azul de metileno (AM) en soluciones acuosas. El material residual, recolectado de mercados locales, fue lavado con agua destilada para eliminar impurezas, secado al sol por 48 h y luego en horno a 60 °C durante 24 h antes de ser triturado y tamizado (malla 200). Se evaluaron concentraciones iniciales de AM entre 10 y 50 mg/L, pH de 4 a 10 y tiempos de contacto de 20 a 120 min, manteniendo agitación constante a 150 rpm y temperatura de 30 °C. Los autores determinaron que el pH óptimo fue 7, con una capacidad máxima de adsorción de 20.83 mg/g según el modelo de Langmuir, y eficiencia de remoción de hasta 85 %.

Hameed et al. (2007) utilizaron cáscara de cacao como adsorbente para azul de metileno, motivados por su alta disponibilidad y contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina, que aportan grupos funcionales como –OH y –COOH útiles para la adsorción. El residuo se lavó, secó a 105 °C y se molió. Las pruebas se realizaron con concentraciones iniciales de AM de 100 a 500 mg/L, pH de 3 a 11, dosis de adsorbente de 1 g/100 mL y agitación a 200 rpm a 30 °C. Se obtuvo una capacidad máxima de 188.68 mg/g (modelo de Langmuir), muy superior a la de otros residuos agrícolas como bagazo de caña o cáscara de arroz.

Demirbaş (2009) revisó diversos estudios sobre el uso de carbón activado derivado de residuos agrícolas (como cáscaras, bagazo y madera) para eliminar colorantes sintéticos en soluciones acuosas. Según su análisis, estas fuentes generaron adsorbentes con capacidades que varían ampliamente, desde 50 hasta 500 mg de colorante por gramo de carbón, dependiendo del tipo de residuo, método de activación y condiciones del proceso. La investigación también señala que, en la mayoría de los casos, los datos experimentales se ajustan al modelo de Langmuir, lo que implica adsorción en monocapa sobre superficies relativamente homogéneas.

Fu et al. (2017) revisaron diversas investigaciones sobre el uso de materiales adsorbentes en el tratamiento de aguas residuales teñidas, incluyendo el carbón activado comercial de origen mineral y vegetal. En el caso específico de este adsorbente, reportaron que su capacidad para

remover colorantes varía entre 280 y 720 mg/g, dependiendo del tipo de carbón, la naturaleza del colorante y las condiciones del proceso. El carbón comercial alcanzó una capacidad de 720 mg/g para azul de metileno, mientras que el de cáscara de coco logró 650 mg/g. Ambos lograron remociones superiores al 95 %, pero el material comercial presentó una cinética de adsorción ligeramente más rápida debido a una distribución de poro más uniforme. El estudio también señala que el carbón activado sigue siendo uno de los materiales más utilizados en aplicaciones industriales por su alta eficiencia, accesibilidad y facilidad de operación.

Gao et al. (2011) evaluaron sulfato de aluminio y cloruro férrico para remover colorantes reactivos en efluentes textiles. Trabajaron con pH iniciales de 4, 7 y 10, y dosis de coagulante entre 50 y 300 mg/L. El mejor desempeño se obtuvo con 200 mg/L de FeCl₃ a pH 7, logrando 90 % de remoción de color y reducción significativa de turbidez. Los flóculos generados con FeCl₃ fueron más densos y sedimentables que con sulfato de aluminio.

Choy et al. (2014) probaron extractos de *Moringa oleifera* para tratar efluentes coloreados. Usando 150 mg/L de extracto proteico, removieron 80 % del color y 90 % de la turbidez a pH 7. El FTIR mostró grupos amino y carboxilo responsables de neutralizar cargas. Aunque la eficiencia fue menor que con coagulantes químicos, se redujo la generación de lodos químicos y no se incrementó el aluminio residual.

Ndabigengesere & Narasiah (1998) propusieron el uso de polvo de semillas de *Moringa oleifera* junto con pequeñas dosis de alumbre para tratar aguas turbias y coloreadas, logrando reducciones de dosis química del 60 % sin sacrificar eficiencia de remoción de color.

Forss et al. (2017) evaluaron un biofiltro continuo usando cáscara de arroz como soporte para el tratamiento de aguas residuales reales de tintorería. Funcionando con un tiempo de retención hidráulica de 67 horas, lograron una descoloración superior al 90 %. El análisis mediante espectrometría y cromatografía reveló que la comunidad microbiana (incluyendo bacterias como *Dysgonomonas* y *Pseudomonas*, y hongos como *Gibberella* y *Fusarium*) contenía genes clave como azoreductasa para degradar colorantes.

Barathi et al. (2022) estudiaron un consorcio bacteriano (*Bacillus subtilis*, *Brevibacillus borstelensis*, *Bacillus firmus*) para la degradación del colorante RR 170. Usando concentraciones variables (40–200 µg/mL), observaron formación de biomasa espesa (biofilm) y producción de EPS que favorecen la decoloración. El consorcio logró una remoción de color efectiva, y los productos degradados resultaron no genotóxicos, según pruebas en células de *Allium cepa*. Los análisis mediante UV–Vis, HPLC, FTIR y 2D-FTIR confirmaron la degradación estructural del colorante.

Nawaz & Ahsan (2014) realizaron un estudio comparativo de técnicas fisicoquímicas, oxidación avanzada y biológicas en tratamiento de agua residual textil. Evaluaron parámetros como DQO, sólidos suspendidos totales (SST) y color, así como el tiempo de tratamiento, operatividad y costos químicos. La combinación de lodos activados (tratamiento biológico) seguida de filtración con arena y adsorción con carbón activado resultó ser la más efectiva, con remociones del 81.6 % de DQO, 88.5 % de SST y 94.5 % de color.

Kunz et al. (2002) aplicaron el proceso Fenton ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$) para remover colorantes reactivos de efluentes textiles. Usando 50 mg/L de Fe^{2+} y 100 mg/L de H_2O_2 , lograron 95 % de remoción de color en 60 minutos a pH 3. La reacción generó radicales hidroxilos capaces de romper enlaces azo y degradar moléculas complejas, confirmada por espectrofotometría UV–Vis.

Daneshvar et al. (2004) evaluaron la degradación de rojo Congo mediante fotocatalisis con TiO_2 bajo radiación UV. A una concentración de 20 mg/L y 1 g/L de TiO_2 , se obtuvo 92 % de decoloración en 90 minutos. La eficiencia aumentó con aireación y disminuyó en presencia de radicales inhibidores como bicarbonatos.

Abadulla et al. (2000) estudiaron la aplicación de lacasas fúngicas de *Trametes hirsuta* para la decoloración de colorantes azo y antraquinónicos. Las reacciones se realizaron a pH 4.5 y 30 °C, con concentraciones de enzima de 1 U/mL. Se logró más del 90 % de remoción de color en colorantes como Reactive Blue 19 y Acid Orange 51 en menos de 4 h. El análisis espectrofotométrico indicó la ruptura de enlaces azo y la formación de compuestos aromáticos menos complejos.

Husain (2008) revisó aplicaciones de lacasas y peroxidasas inmovilizadas en soportes sólidos como alginato o sílica para tratamiento de aguas con colorantes. Destacó que la inmovilización mejora la estabilidad térmica y el reúso de la enzima, permitiendo operar por más de 20 ciclos con una pérdida de actividad inferior al 15 %. La eficiencia de remoción suele mantenerse entre 70–90 % según el tipo de colorante y las condiciones de operación.

Palmieri et al. (2001) evaluaron la peroxidasa de rábano (*Raphanus sativus*) para remover colorantes reactivos en efluentes simulados. Trabajaron con 10 mg/L de enzima y 0.1 mM de peróxido de hidrógeno como cofactor, logrando 80–85 % de remoción de Reactive Black 5 a pH 6 en 1 h. La enzima catalizó la oxidación de grupos cromóforos, provocando la pérdida de color.

Derakhshan et al. (2013) investigaron la adsorción de azul de metileno usando piedra pómez modificada con HCl, evaluando el efecto del pH entre 3 y 10. Identificaron que la eficiencia aumentaba con la alcalinidad, alcanzando un pH óptimo de 10, con una capacidad máxima de adsorción de 15.87 mg/g. Explicaron que a pH 10, la superficie del adsorbente se encuentra altamente desprotonada, generando más sitios cargados negativamente que favorecen la interacción electrostática con el colorante catiónico.

El documento de SigmaDAF Clarifiers (2021) presenta parámetros típicos de aguas residuales textiles que incluyen un pH de 10 como característica recurrente del efluente unitario. Este valor está optimizado para procesos físicos y químicos de tratamiento, ya que la alcalinidad facilita la coagulación, floculación y la deprotonación de moléculas orgánicas, aumentando su eficiencia en la remoción de colorantes y materia orgánica.

Ho (2020) realizó una revisión sobre la remoción de colorantes en soluciones acuosas mediante carbón activado y señaló que los ensayos convencionales utilizan concentraciones iniciales de colorante entre 50 y 200 mg/L para reflejar las condiciones comunes en aguas residuales industriales. En particular, el estudio identificó que un nivel de 100 mg/L permite evaluar tanto el comportamiento en zonas de alta eficiencia como el inicio de la saturación del adsorbente, sin que se requieran volúmenes excesivos de muestra.

En un estudio publicado por Thermo Fisher Scientific (2020), se describe el uso de espectrofotometría UV-Vis como una técnica confiable para la medición del color verdadero en

muestras de agua. El procedimiento se basa en la lectura de absorbancia a una longitud de onda de 455 nm, correspondiente a la escala Pt-Co (Platinum-Cobalt), la cual es apropiada para aguas con coloración amarilla o marrón clara causada por materia orgánica disuelta. Para asegurar la precisión de los datos, las muestras son previamente filtradas con membranas de 0.45 μm , eliminando la interferencia de sólidos suspendidos.

VI. METODOLOGÍA

A. Primera fase: Caracterizar los residuos de palma africana (fibra y cuesco)

Cristalería:

- Beaker 1000mL Eeisco
- Erlenmeyer 250mL
- Probeta 100mL ASTM E 1272

Equipo:

- Balanza OHAUS Valor 3000 Xtreme
- Potenciómetro Aqua searcher OHAUS
- Balanza de humedad OHAUS
- Tamizadora Ro-tar modelo Rx-29 Type Rotap serial 19183 WS. Tyler

Materiales:

- Agua
- Agua destilada
- Residuos de palma africana
- Papel filtro de café

Procedimiento:

1. Determinar el pH de los residuos
 - a. Secar las muestras de fibra de palma en una estufa a temperatura constante a 105°C, hasta que el peso sea constante.
 - b. Moler las fibras, hasta tener un tamaño de partícula adecuado para tener una buena extracción, de 40 MESH.
 - c. Pesar 5 gramos de la fibra molida con una balanza analítica y colocarlos en un matraz Erlenmeyer de 250mL.
 - d. Agregar 100mL de agua destilada.
 - e. Agitar vigorosamente la mezcla durante media hora con una varilla de vidrio.

- f. Dejar reposar la mezcla durante 24 horas.
 - g. Filtrar la suspensión utilizando un papel filtro de café en un embudo.
 - h. Medir el pH con el potenciómetro.
 - i. Registrar el valor del pH.
 - j. Repetir el proceso en triplicado.
2. Determinar el porcentaje de humedad
- a. Pesar una muestra al azar de un gramo de los residuos.
 - b. Colocar la masa en la balanza de humedad.
 - c. Registrar el valor del porcentaje de humedad.
 - d. Repetir el proceso en triplicado.
3. Determinar el tamaño de los residuos
- a. Pesar 20 gramos de los residuos en la balanza.
 - b. Pesar cada uno de los platos de la tamizadora.
 - c. Registrar los pesos de los platos.
 - d. Colocar la masa en la tamizadora.
 - e. Dejar tamizar durante 2 minutos.
 - f. Volver a pesar todos los platos de la tamizadora.
 - g. Registrar los pesos de los platos.
 - h. Restar la diferencia entre los platos.
 - i. Determinar la retención en cada plato.
 - j. Determinar el porcentaje de retención en cada plato.
 - k. Repetir el proceso en triplicado.

B. Segunda fase: Definir los posibles métodos de acondicionamiento de la materia prima

Cristalería:

- No aplica

Equipo:

- No aplica

Materiales:

- No aplica

Procedimiento:

1. Investigar de posibles métodos de remoción de colorantes además de la adsorción.
2. Investigar la posibilidad de utilizar residuos orgánicos en los métodos.
3. Investigar si los residuos orgánicos tienen la capacidad de remover de forma directa los colorantes.
4. Buscar antecedentes en donde se hayan realizado los métodos de remoción, pero utilizando residuos orgánicos.
5. Evaluar si la metodología se puede aplicar para residuos de palma africana y definir los insumos.
6. Determinar la cantidad de insumos para transformar un kilogramo de palma africana como parte del método.
7. Cotizar los insumos por el tratamiento.
8. Calcular el costo individual de los insumos.
9. Calcular el costo total por tratamiento de los residuos y convertir el costo a dólares.
10. Realizar una valoración cualitativa de los costos.
11. Definir los criterios de evaluación para determinar que método de remoción de color es el más adecuado.
12. Asignar los pesos a cada uno de los criterios evaluados.
13. Determinar los rangos de puntuación para cada calificación de cada criterio.
14. Puntuar cada criterio para cada método.
15. Realizar la evaluación ponderada de tratamientos.
16. Seleccionar el método con la evaluación ponderada más alta.

C. Tercera fase: Acciones previas a todos los pretratamientos con los residuos

Cristalería:

- Cubeta plástica 20L
- Probeta 1000mL plástica Isolab

Equipo:

- Horno secador VWR Symphony
- Balanza OHAUS Valor 3000 Xtreme

Materiales:

- Agua destilada
- Agua
- Residuos de palma africana

Procedimiento:

1. Hidratación de los residuos
 - a. Sumergir las muestras de fibra de palma en agua, con una relación peso-peso de líquido: sólido de 10:1.
 - b. Dejar el proceso de hidratación a temperatura ambiente durante 1 hora para permitir el hinchamiento del material.
2. Lavar y filtrar
 - a. Lavar los residuos tres veces con suficiente agua destilada.
 - b. Filtrar los residuos para retirar el exceso de agua.
3. Secar y guardar
 - a. Secar los residuos en un horno secador a 60°C durante 72 horas para eliminar la humedad.
 - b. Guardar los residuos secos en bolsas plásticas hasta su uso.
4. Definición del análisis factorial

- a. Definir los factores (3): Pretratamiento, tipo de corte o molienda y tipo de colorante.
- b. Definir los niveles para cada nivel: Pretratamiento, 4 niveles, hidrólisis básica (HB), hidrólisis ácida (HA), carbón activado a partir de residuos de palma africana (CA) y sin pretratamiento (SP); Tipo de corte, 3 niveles, molienda con licuadora (ML), molienda manual con mazo (MM) y sin molienda (SM); Tipo de colorante, 2 niveles, colorante directo (CD) y colorante reactivo (CR).
- c. Determinar la cantidad de combinaciones del análisis factorial completo $4 \times 3 \times 2$, 24 combinaciones:
 - i. HB+ML+ CD = HBMLCD
 - ii. HB+MM+ CD = HBMMCD
 - iii. HB+SM+ CD = HBSMCD
 - iv. HB+ML+ CR = HBMLCR
 - v. HB+MM+ CR = HBMMCR
 - vi. HB+SM+ CR = HBSMCR
 - vii. HA+ML+ CD = HAMLCD
 - viii. HA+MM+ CD = HAMMCD
 - ix. HA+SM+ CD = HASMCD
 - x. HA+ML+ CR = HAMLCR
 - xi. HA+MM+ CR = HAMMCR
 - xii. HA+SM+ CR = HASMCR
 - xiii. CA+ML+ CD = CAMLCD
 - xiv. CA+MM+ CD = CAMMCD
 - xv. CA+SM+ CD = CASMCD
 - xvi. CA+ML+ CR = CAMLCR
 - xvii. CA+MM+ CR = CAMMCR
 - xviii. CA+SM+ CR = CASMCR
 - xix. SP+ML+ CD = SPMLCD
 - xx. SP+MM+ CD = SPMMCD
 - xxi. SP+SM+ CD = SPSMCD
 - xxii. SP+ML+ CR = SPMLCR

xxiii. $SP+MM+ CR = SPMMCR$

xxiv. $SP+SM+ CR = SPSMCR$

- d. Definir la cantidad de muestras al realizar cuadruplicado, 96 muestras. Cuatro para cada combinación.
- e. Definir la cantidad de lecturas espectrofotométricas a realizar. Realizar 4 lecturas espectrofotométricas por muestra, para un total de 384 lecturas.

D. Cuarta Fase: Preparación de los colorantes

Cristalería:

- Vasos plásticos
- Botellas plásticas
- Probeta 1000mL plástica Isolab
- Embudo
- Beaker 600mL Kimax Kimble
- Espátula
- Varilla de agitación

Equipo:

- Balanza Analítica OHAUS Pioneer
- Espectrofotómetro UV, Marca: Shimadzu; UV Mini 1240 UV-VIS Spectrophotometer
- Potenciómetro Aqua searcher OHAUS

Materiales:

- Colorante directo
- Colorante reactivo
- Microsoft Excel

Procedimiento:

1. Preparar las soluciones de colorantes
 - a. Medir 100mg de colorante por cada litro de solución de agua con colorante que se desee realizar en un vaso plástico en la balanza analítica.
 - b. Medir un litro de agua por cada 100mg de colorante.
 - c. Diluir el colorante del vaso con el agua de la probeta poco a poco.
 - d. Lavar el colorante con el agua de la probeta poco a poco y trasvasar a la botella.
 - e. Guardar la solución en botellas plásticas.
 - f. Medir el pH de las soluciones.
 - g. Realizar el procedimiento para el colorante reactivo como directo.
2. Preparar solución diluida NaOH 0.01M (moles por litro)
 - a. Medir en una balanza analítica la cantidad de gramos de NaOH que se necesitan, para 500mL de solución se necesitan 200mg, porque la masa molar del NaOH es de 40 g/mol.
 - b. Colocar aproximadamente 400mL de agua destilada con la probeta y colocar en el beaker.
 - c. Disolver la masa de NaOH en el beaker al agitar con la varilla.
 - d. Transferir la solución a un matraz aforado de 500mL.
 - e. Completar hasta los 500mL con agua destilada y mezclar bien.
 - f. Verificar el pH, debería de estar cerca de 12.
3. Ajustar el pH
 - a. Agregar poco a poco la solución de NaOH a los colorantes.
 - b. Medir el pH cada vez que se agregue la solución de NaOH.
 - c. Repetir el proceso hasta llevar la solución de agua con colorante hasta un pH de 10.
 - d. Realizar este proceso con la solución de colorante directo y reactivo.
4. Almacenar los colorantes con el pH de 10 en botellas plásticas
5. Barrido Espectral
 - a. Seleccionar una muestra de agua con colorante. Puede ser cualquier solución previamente preparada.
 - b. Colocar la muestra en el espectrofotómetro.
 - c. Configurar el espectrofotómetro.
 - d. Establecer el rango de longitudes de onda de 400nm a 800nm.

- e. Iniciar el barrido, lo hace automáticamente el espectrofotómetro.
 - f. Interpretar el gráfico obtenido.
 - g. Determinar el pico máximo de absorbancia con una longitud de onda determinada.
 - h. Establecer longitud de onda a utilizar para todo el trabajo.
6. Lecturas de absorbancia de los colorantes
- a. Realizar 4 lecturas independientes para cada colorante con la longitud de onda previamente determinada.
 - b. Registrar las lecturas.
 - c. Realizar lecturas del blanco en cuadruplicado.
 - d. Repetir el proceso para todos los colorantes directos y reactivos preparados.

E. Quinta Fase: Preparación de las combinaciones

Cristalería para pretratamiento de hidrólisis básica (HB):

- Beaker 600mL Kimax Kimble
- Probeta 100mL ASTM 1272
- Beaker 600mL Heavy Duty
- Probeta 1000mL plástica Isolab
- Varilla de agitación
- Espátula
- Beaker 1000mL Eisco
- Mazo
- Vasos plásticos
- Bolsas plásticas

Cristalería para pretratamiento de hidrólisis ácida (HA):

- Beaker 2000mL Kimax Kimble
- Beaker 2000mL Kimax Kimble
- Probeta 100mL ASTM 1272

- Beaker 600mL Heavy Duty
- Probeta 1000mL plástica Isolab
- Varilla de agitación
- Espátula
- Beaker 1000mL Eeisco
- Mazo
- Vasos plásticos
- Bolsas plásticas

Cristalería para pretratamiento de carbón activado a base de residuos de palma (CA):

- Beaker 600mL Kimax Kimble
- Probeta 100mL ASTM E 1272
- Beaker 600mL Heavy Duty
- Probeta 1000mL plástica Isolab
- Varilla de agitación
- Espátula
- Beaker 1000mL Eeisco
- Mazo
- Sartén con tapadera con hoyo
- Vasos plásticos
- Bolsas plásticas

Cristalería para sin pretratamiento (SP):

- Vasos plásticos
- Bolsas plásticas

Equipo para pretratamiento de hidrólisis básica (HB):

- Balanza OHAUS Valor 3000 Xtreme
- Balanza Analítica OHAUS Pioneer

- Horno secador VWR Symphony
- Licuadora: Procesadora de alimentos Marca Black+Decker Handy Chopper Plus
- Campana de gases Hemco Laboratory planning solutions

Equipo para pretratamiento de hidrólisis ácida (HA):

- Balanza OHAUS Valor 3000 Xtreme
- Balanza Analítica OHAUS Pioneer
- Horno secador VWR Symphony
- Licuadora: Procesadora de alimentos Marca Black+Decker Handy Chopper Plus
- Campana de gases Hemco Laboratory planning solutions

Equipo para pretratamiento de carbón activado a base de residuos de palma (CA):

- Balanza OHAUS Valor 3000 Xtreme
- Balanza Analítica OHAUS Pioneer
- Horno secador VWR Symphony
- Licuadora: Procesadora de alimentos Marca Black+Decker Handy Chopper Plus
- Campana de gases Hemco Laboratory planning solutions
- Parrilla

Equipo para sin pretratamiento (SP):

- Balanza OHAUS Valor 3000 Xtreme
- Balanza Analítica OHAUS Pioneer
- Licuadora: Procesadora de alimentos Marca Black+Decker Handy Chopper Plus

Materiales para pretratamiento de hidrólisis básica (HB):

- Agua destilada
- Hidróxido de Sodio (NaOH)

Materiales para pretratamiento de hidrólisis ácida (HA):

- Agua destilada

- Ácido sulfúrico 97% Merck

Materiales para pretratamiento de carbón activado a base de residuos de palma (CA):

- Agua destilada
- Ácido fosfórico 85% Merck

Materiales para Sin Pretratamiento (SP):

- No aplica

Procedimiento para hidrólisis básica (HB):

1. Preparar la dilución de NaOH 10% m/v
 - a. Medir 850mL de agua destilada en una probeta y pasar al beaker.
 - b. Pesar 100g de NaOH en la balanza analítica.
 - c. Agregar los 100 gramos de NaOH en los 850mL de agua lentamente.
 - d. Agitar con una varilla de vidrio hasta que se disuelva completamente, la solución se va a calentar.
 - e. Agregar los 150mL de agua destilada restantes una vez el NaOH se haya disuelto por completo y enfriado un poco.
2. Condicionar la hidrólisis
 - a. Sumergir los residuos de palma en una relación volumen-masa de líquido: sólido de 10:1 en un beaker.
 - b. Tapar el beaker con papel aluminio.
 - c. Colocar el beaker en la campana de gases.
 - d. Dejar reaccionar durante un periodo de 48 horas.
3. Detener la hidrólisis
 - a. Filtrar y lavar con abundante agua destilada una vez transcurrida la reacción.
4. Secar la muestra
 - a. Secar las muestras filtradas en un horno a 60°C durante 72 horas para eliminar la humedad restante.
5. Moler los residuos en la licuadora (ML)
 - a. Pesar 20g en la balanza de los residuos ya secos.

- b. Moler en la licuadora (procesadora de alimentos) los 20g durante 2 minutos.
 - c. Realizar el paso 3 de la primera fase.
 - d. Pesar 2.4 gramos de los residuos molidos en licuadora (ML) en un vaso plástico y cerrar con una bolsa plástica para no perder lo pesado.
 - e. Repetir hasta tener 8 vasos con 2.4g de residuos molidos empacados.
6. Moler los residuos a mano con un mazo (MM)
- a. Pesar 20g en la balanza de los residuos ya secos.
 - b. Moler los residuos a mano con un mazo los 20g.
 - c. Realizar el paso 3 de la primera fase.
 - d. Pesar 2.4 gramos de los residuos molidos con el mazo (MM) en un vaso plástico y cerrar con una bolsa plástica para no perder lo pesado.
 - e. Repetir hasta tener 8 vasos con 2.4g de residuos molidos empacados.
7. Pesar los residuos sin moler
- a. Pesar 20 gramos de los residuos sin moles.
 - b. Realizar el paso 3 de la primera fase.
 - c. Pesar 2.4 gramos de los residuos sin moler en un vaso plástico y cerrar con una bolsa plástica para no perder lo pesado.
 - d. Repetir hasta tener 8 vasos con 2.4g de residuos molidos empacados.
 - e. Identificar cada vaso con el pretratamiento, el tipo de corte y el tipo de colorante que se le va a aplicar a cada vaso.

Procedimiento para hidrólisis ácida (HA):

1. Preparar dilución de ácido sulfúrico 6% v/v
 - a. Colocar 1410mL de agua destilada en cada beaker (2 beakers).
 - b. Agregar lentamente el ácido sulfúrico concentrado al agua, 90mL de ácido sulfúrico en cada beaker.
 - c. Mezclar bien la solución con una varilla para asegurar que el ácido se disuelva completamente en el agua.
2. Condicionar la hidrólisis
 - a. Sumergir los residuos de palma africana con una relación volumen-masa de líquido: sólido de 30:1.

- b. Tapar el beaker con papel aluminio.
 - c. Colocar el beaker en la campana de gases.
 - d. Dejar reaccionar durante un periodo de 48 horas.
3. Detener la reacción
 - a. Filtrar y lavar con abundante agua destilada una vez transcurrido el tiempo.
 - b. Neutralizar los lavados previos a ser desechados.
4. Hacer los mismos pasos 4, 5, 6 y 7 que la hidrólisis básica

Procedimiento para pretratamiento de carbón activado a base de residuos de palma (CA):

1. Preparar dilución ácido fosfórico 30%
 - a. Agregar 463mL de agua destilada en un beaker.
 - b. Agregar lentamente 252mL de ácido fosfórico 85%.
 - c. Agitar lentamente con una varilla.
2. Condicionar la activación
 - a. Sumergir los residuos de palma africana con una relación volumen-masa de líquido: sólido de 7:1.
 - b. Tapar el beaker con papel aluminio.
 - c. Colocar el beaker en la campana de gases.
 - d. Dejar reaccionar durante un periodo de 48 horas.
3. Detener la reacción
 - a. Quitar los residuos de la palma africana del remojo.
4. Secar la muestra
 - a. Secar las muestras filtradas en un horno a 60°C durante 72 horas para eliminar la humedad restante.
5. Convertir los residuos en carbón activado a base de palma africana
 - a. Calentar el sartén en la parrilla a fuego alto.
 - b. Colocar una capa fina de los residuos tratados en el sartén caliente.
 - c. Colocar la tapadera y esperar a que los residuos se conviertan en carbón.
 - d. Remover el sartén del fuego, no remover la tapadera hasta que el sartén se haya enfriado.

- e. Pasar el carbón activado a una bandeja hasta que se enfríe a temperatura ambiente.
 - f. Almacenar el carbón activado frío en bolsas plásticas.
6. Lavar los residuos
 - a. Lavar con abundante agua destilada una vez transcurrido el tiempo.
 - b. Neutralizar los lavados previos a ser desechados.
7. Secar la muestra
 - a. Secar las muestras filtradas en un horno a 60°C durante 72 horas para eliminar la humedad restante.
8. Hacer los mismos pasos 5, 6 y 7 que para la hidrólisis básica

Procedimiento para sin pretratamiento (SP)

1. Hacer los mismos pasos 5, 6 y 7 que para la hidrólisis básica.

F. Sexta fase: Determinación de la combinación más eficiente para la remoción de color

Cristalería:

- Probeta 50mL KIMAX
- Vasos plásticos

Equipo:

- Espectrofotómetro UV, Marca: Shimadzu; UV Mini 1240 UV-VIS Spectrophotometer
- Incubated Shaker; Marca: Lab Companion; Modelo: SI-600

Materiales:

- Soluciones de los colorantes 100mg/L
- Residuos de palma africana con sus respectivos pretratamientos y tipos de corte
- Microsoft Excel

- Rstudio

Procedimiento:

1. Preparar muestras
 - a. Medir 50mL de las soluciones de agua con colorante.
 - b. Colocar los 50mL de la solución en uno de los vasos con los residuos de palma africana.
 - c. Repetir este proceso para 4 vasos de cada uno de los pretratamientos y tipos de corte con la solución de colorante directo. Al final deberían de quedar 48 muestras con cada tipo de pretratamiento, cada tipo de molienda y colorante directo (CD).
 - d. Repetir este proceso para 4 vasos de cada uno de los pretratamientos y tipos de corte con la solución de colorante directo. Al final deberían de quedar 48 muestras con cada tipo de pretratamiento, cada tipo de molienda y colorante reactivo (CR).
2. Agitar las muestras
 - a. Colocar el *shaker* a una temperatura de 25°C.
 - b. Agitar las muestras por una hora a una velocidad de 110rpm.
3. Sedimentar los residuos
 - a. Dejar los vasos sedimentar durante 48 horas.
4. Leer la absorbancia
 - a. Realizar 4 lecturas independientes de absorbancia en el espectrofotómetro para cada uno de los vasos. Al final deberían de quedar 384 lecturas independientes.
5. Calcular el porcentaje de remoción con las lecturas originales del colorante y las lecturas después de la adsorción.
6. Realizar el análisis factorial de las variables que intervienen en el proceso.
7. Determinar que combinación es la más eficiente para la remoción de color.

G. Séptima fase: Curva de calibración

Cristalería:

- Probeta de un litro Plasti Brand
- Vasos
- Probeta 50mL KIMAX
- Recipiente de 8 litros

Equipo:

- Espectrofotómetro UV, Marca: Shimadzu; UV Mini 1240 UV-VIS Spectrophotometer
- Balanza OHAUS Valor 3000 Xtreme
- Balanza Analítica OHAUS Pioneer

Materiales:

- Agua destilada
- Colorante elegido en la quinta fase
- Microsoft Excel

Procedimiento:

1. Preparar la solución madre
 - a. Medir 600mg de colorante.
 - b. Disolver en 6 litros de agua destilada.
 - c. Ajustar el pH a 10 con la disolución de NaOH 0.01M previamente preparada.
2. Realizar la curva de calibración
 - a. Establecer la concentración de cada una de las disoluciones de 50mL cada disolución (2 mg/L, 5 mg/L, 10 mg/L, 20 mg/L, 30 mg/L, 40 mg/L, 50 mg/L, 60 mg/L, 70 mg/L, 80 mg/L, 90 mg/L, 100 mg/L).
 - b. Preparar las disoluciones.
 - c. Utilizando la formula $C_1 * V_1 = C_2 * V_2$ calcular la cantidad de volumen de la solución madre se necesita para cada disolución.

- d. C1 es la concentración de la solución madre (100mg/L).
- e. V1 es el volumen de la disolución madre que se necesita medir con una bureta.
- f. C2 es la concentración deseada de la disolución (las establecidas en el paso anterior).
- g. V2 es el volumen de la disolución, 1 litro por disolución.
- h. Medir el volumen de la disolución madre que se necesita en cada disolución con la ayuda de una bureta en un beaker.
- i. Trasvasar del beaker a un balón aforado.
- j. Lavar el beaker con agua destilada y pasarlo al balón aforado para asegurar que la concentración sea la correcta.
- k. Aforar el balón con agua destilada.
- l. Medir la absorbancia de cada una de las disoluciones en cuadruplicado.
- m. Calcular el promedio de las absorbancias.
- n. Realizar la curva de calibración.

H. Octava fase: Determinación de adsorbente necesario

Cristalería:

- Probeta 50mL KIMAX
- Vasos

Equipo:

- Balanza OHAUS Valor 3000 Xtreme
- Balanza Analítica OHAUS Pioneer
- Espectrofotómetro UV, Marca: Shimadzu; UV Mini 1240 UV-VIS Spectrophotometer
- Incubated Shaker; Marca: Lab Companion; Modelo: SI-600

Materiales:

- Residuos de palma africana seleccionados en la quinta fase
- Agua destilada

- Solución madre de agua con colorante
- Microsoft Excel

Procedimiento:

1. Seleccionar diferentes cantidades de adsorbente
 - a. Dividir la solución de colorante en 7 envases con 50mL.
 - b. Medir la masa de las distintas muestras de adsorbente para los 50mL de solución de los resultados obtenidos en el análisis factorial. De 0g/L, 2g/L, 6g/L, 8g/L, 12g/L, 18g/L, 24g/L, 30g/L.
2. Preparar las muestras
 - a. Colocar las muestras del adsorbente en los 50mL de solución con agitación constante a una temperatura de 25°C.
 - b. Dejar en agitación durante una hora.
 - c. Dejar reposar durante dos días.
3. Medir las concentraciones finales
 - a. Medir la absorbancia (A) en el espectrofotómetro.
 - b. Utilizar la curva de calibración, interpolar el valor medido en el con el espectrofotómetro en la curva de calibración. Para determinar la concentración en equilibrio (C_e).
 - c. Registrar el resultado de cada concentración.
 - d. Utilizar la fórmula de $\% \text{ de remoción} = \frac{C_0 - C_e}{C_0}$ determinar el % de remoción de cada una de las cantidades de las muestras. Seleccionar la que presente un valor cercano al 65% de remoción.
4. Realizar en triplicado

I. Novena fase: Elaboración de las curvas de Langmuir con la mejor combinación de los residuos de palma africana y carbón activado comercial

Cristalería:

- Probeta de un litro Plasti Brand
- Vasos
- Probeta 50mL KIMAX
- Probeta 100mL ASTM E 1272

Equipo:

- Espectrofotómetro UV, Marca: Shimadzu; UV Mini 1240 UV-VIS Spectrophotometer
- Incubated Shaker; Marca: Lab Companion; Modelo: SI-600

Materiales:

- Solución madre de colorante
- Agua destilada
- Combinación que mejores rendimientos dio en la remoción de color en la quinta fase
- Carbón activado comercial
- Microsoft Excel

Procedimiento:

1. Preparar las soluciones a partir de la solución madre
 - a. Establecer la concentración de cada una de las disoluciones de 50mL cada disolución (10 mg/L, 20 mg/L, 30 mg/L, 40 mg/L, 50 mg/L, 60 mg/L, 70 mg/L, 80 mg/L, 90 mg/L, 100 mg/L). Utilizar las mismas soluciones que para la curva de calibración.
2. Medir la cantidad de adsorbente
 - a. Pesar en 33 vasos la cantidad de adsorbente determinado en la séptima fase, tanto de los residuos de palma africana con el pretratamiento y molienda necesario y del carbón activado comercial. Al final se tienen 66 vasos con adsorbente y colorantes a distintas concentraciones.
 - b. Colocar en cada vaso 50mL de cada una de las diluciones, en triplicado, tanto para los de residuos de palma africana como con el carbón activado. Incluyendo un blanco.

3. Agitar las muestras
 - a. Colocar el *shaker* a una temperatura de 25°C.
 - b. Agitar las muestras por una hora a una velocidad de 110rpm.
4. Sedimentar los residuos
 - a. Dejar los vasos sedimentar durante 48 horas.
5. Leer la absorbancia
6. Realizar 3 lecturas independientes de absorbancia en el espectrofotómetro para cada uno de los vasos. Al final deberían de quedar 198 lecturas independientes.
7. Filtrar muestras de carbón activado comercial
 - a. Colocar un papel filtro en un embudo y filtrar los vasos del carbón activado comercial.
 - b. Esperar 24 horas a que sedimente.
 - c. Repetir el este proceso 3 veces.
8. Volver a realizar las mediciones de absorbancia
9. Corregir el blanco de las lecturas
10. Utilizar la curva de calibración para determinar la concentración en equilibrio (C_e) de colorante para cada una de las muestras, tanto la de los residuos de palma africana como las de carbón activado comercial.
11. Obtener el promedio de las concentraciones en equilibrio de cada una de las lecturas (C_e promedio)
12. Determinar la capacidad de adsorción en equilibrio (q_e) para cada una de las muestras, tanto la de los residuos de palma africana como las de carbón activado comercial.
13. Determinar la relación C_e/q_e
14. Realizar la isoterma de Langmuir cuando el adsorbente son los residuos de palma africana y el carbón activado comercial
15. Obtener la pendiente y el intercepto en el eje “y” de las isotermas de Langmuir
16. Obtener la capacidad máxima de adsorción (Q_m) y la constante de Langmuir (KL) para cuando el adsorbente son los residuos de palma africana y carbón activado comercial.

VII. RESULTADOS

Figura 4: Métodos de remoción de color y método seleccionado



Fuente: Elaboración propia (2025) con base en el marco teórico y los antecedentes

Este cuadro resume los principales métodos de remoción de color evaluados para el acondicionamiento del agua de la industria textil. El procedimiento que se hizo para la elaboración de este cuadro se puede revisar en la Figura 10 y de la información obtenida desde el Cuadro 17 al 25.

Cuadro 1: Comparación integral de métodos tradicionales de remoción de color y viabilidad del uso de residuos de palma africana como alternativa

Método tradicional	Eficiencia de remoción de color	Aplicabilidad industrial	Valoración de los costos relativos de los Insumos	Posibilidad de uso de residuos de palma africana	Observaciones clave
Adsorción	Alta	Alta, ampliamente implementada	Muy baja – Muy alta	Sí	<ul style="list-style-type: none"> • Es el método más versátil y efectivo para integrar residuos lignocelulósicos • Permite evaluar distintos pretratamientos como convertirlo en carbón activado, hidrólisis ácida o básica para aumentar los poros o sin pretratamiento; para optimizar el rendimiento.
Coagulación-floculación	Media-Alta	Alta	Muy baja	Limitada (requiere residuos con compuestos coagulantes) y convertir los residuos en cenizas.	<ul style="list-style-type: none"> • Eficaz para remover la turbidez y el color del agua • Depende mucho de la composición del residuo • No remueve completamente los colorantes solubles • Aproximadamente el 7% de los residuos se convierten en ceniza
Filtración biológica	Media Solo aplica en ciertos casos	Media	Muy baja	No	<ul style="list-style-type: none"> • Los residuos de palma africana solo funcionarían como soporte microbiano • La remoción de color sería de forma indirecta o auxiliar. • Solo es capaz de remover ciertos colorantes
Oxidación avanzada	Alta	Media-Alta	Muy alta	Sí, si se modifica	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere modificar el residuo para hacerlo catalítico (<i>biochar</i> o carbón activado a partir de los residuos) • Aproximadamente el 30% de los residuos se pueden convertir en <i>biochar</i> o carbón activado. • Esto hace que los costos se aumenten al igual que la complejidad operativa
Biorremediación enzimática	Media	Media	Muy baja	Probablemente no	<ul style="list-style-type: none"> • Los residuos de palma africana carecen de las enzimas para llevar a cabo la reacción. • Sería necesario aislar o incorporar enzimas externas, lo cual eleva los costos y complica la implementación

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en el marco teórico y los antecedentes

La información fue construida con base en los antecedentes y el marco teórico, complementada con las cotizaciones reales de insumos utilizadas en cada tratamiento (ver Cuadro 24).

Cuadro 2: Evaluación ponderada de métodos tradicionales de remoción de color y su viabilidad de aplicación con residuos de palma africana

Método de tratamiento	Eficiencia de remoción (25%)	Aplicabilidad industrial (25%)	Valoración de los costos relativos de los insumos (10%)	Viabilidad de uso de residuos de palma africana (40%)	Puntaje total sobre 3 (100%)
Adsorción	3 → 0.75	3 → 0.75	2 → 0.20	3 → 1.20	2.90 → 96.67%
Coagulación-floculación	2 → 0.50	3 → 0.75	3 → 0.30	1 → 0.40	1.95 → 65.00%
Filtración biológica	1 → 0.25	1 → 0.50	3 → 0.30	0 → 0.00	1.05 → 35.00%
Oxidación avanzada	3 → 0.75	2 → 0.50	0 → 0.00	2 → 0.80	2.05 → 68.33%
Biorremediación enzimática	1 → 0.25	1 → 0.25	3 → 0.30	0 → 0.00	0.80 → 26.67%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Para la elaboración de este cuadro se tomó la información más relevante y destacada desde el Cuadro 16 hasta el Cuadro 25 y se puntuó según el criterio de evaluación establecido en el Cuadro 26.

Cuadro 3: Diseño experimental del análisis factorial total (4x3x2) aplicado al estudio de adsorción de colorantes

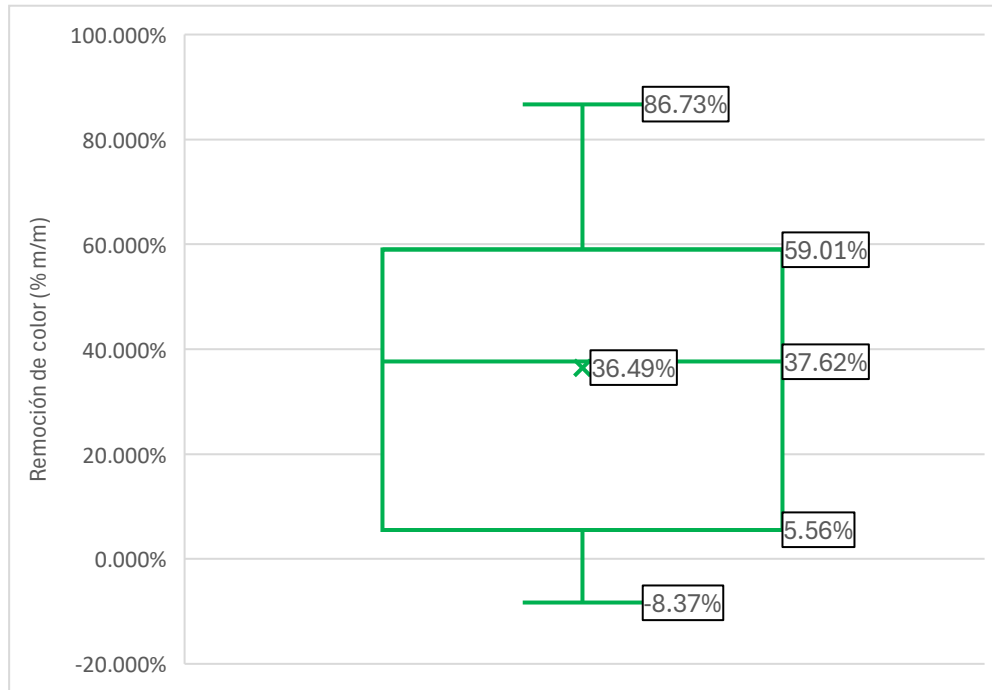
Pretratamiento	Tipo de corte	Colorante	Número de muestras	Número de lecturas por muestra	Número de lecturas por combinación
HB	ML	CD	4	4	16
		CR	4	4	16
	MM	CD	4	4	16
		CR	4	4	16
	SM	CD	4	4	16
		CR	4	4	16
HA	ML	CD	4	4	16
		CR	4	4	16
	MM	CD	4	4	16
		CR	4	4	16
	SM	CD	4	4	16
		CR	4	4	16
CA	ML	CD	4	4	16
		CR	4	4	16
	MM	CD	4	4	16
		CR	4	4	16
	SM	CD	4	4	16
		CR	4	4	16
SP	ML	CD	4	4	16
		CR	4	4	16
	MM	CD	4	4	16
		CR	4	4	16
	SM	CD	4	4	16
		CR	4	4	16
Total, de muestras realizadas			96	Total, de lecturas realizadas	384

Fuente: Elaboración propia (2025)

Nota: las variables empleadas en este cuadro se definen de la siguiente manera: HB (Pretratamiento de una hidrólisis básica a los residuos de palma africana), HA (Pretratamiento de una hidrólisis ácida a los residuos de palma africana), CA (Pretratamiento de realizar carbón activado a base de los residuos de palma africana), SP (Residuos de palma africana que no recibieron ningún pretratamiento), ML (Molienda con

licuadora/procesadora de alimentos), MM (Molienda manual con mazo), SM (Sin molienda), CD (Colorante directo) y CR (Colorante reactivo).

Figura 5: Distribución general de la remoción de color en todas las combinaciones experimentales.



Fuente: Elaboración propia (2025)

La figura muestra la distribución estadística de la remoción de color considerando el total de 384 lecturas experimentales. Los datos utilizados para elaborar esta figura se pueden revisar en el Cuadro 31.

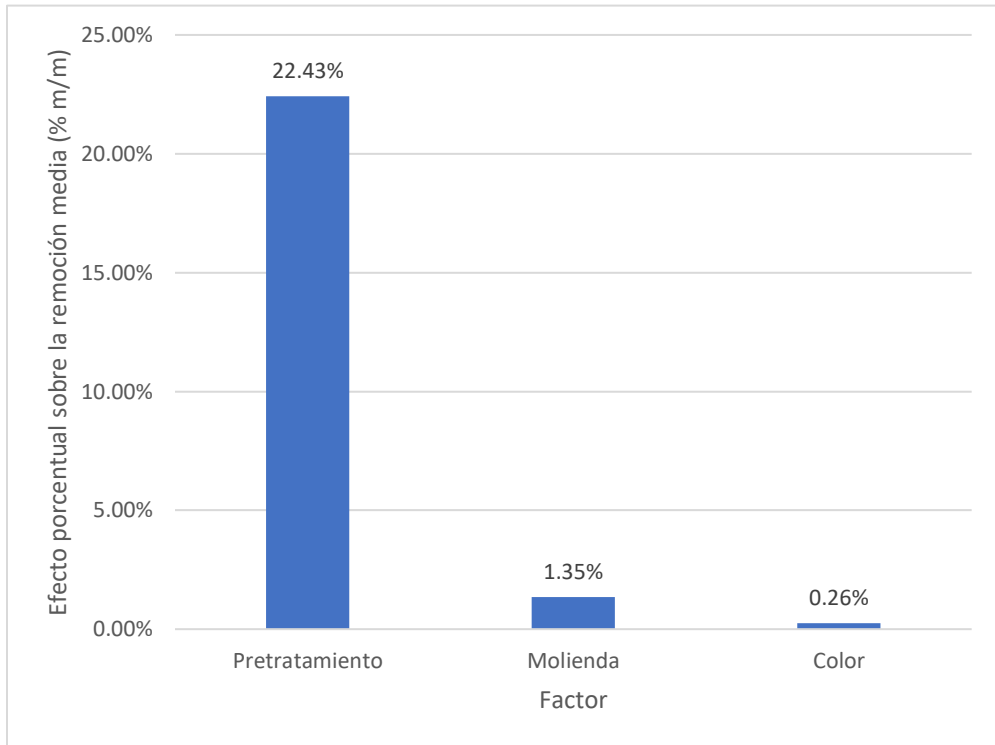
Cuadro 4: Resultados de la prueba ANOVA (4×3×2) del % de remoción de color: efectos principales e interacciones, ordenados por contribución a la variabilidad (%).

Factor	Df (Grados de libertad)	Sum Sq (Suma de cuadrados del factor)	Mean Sq (Cuadrado medio)	F value (Valor F)	Pr(>F) (Valor P)	Signif. Codes	¿Significativo?	Variabilidad (%)
Pretratamiento	3	25.839	8.613	3101.164	< 2e-16	***	Si	88.65%
Pretratamiento: Molienda: Colorante	6	1.252	0.209	75.141	< 2e-16	***	Si	4.30%
Residuals	360	1	0.003				N/A	3.43%
Pretratamiento: Colorante	3	0.58	0.193	69.61	< 2e-16	***	Si	1.99%
Pretratamiento: Molienda	6	0.26	0.043	15.595	6.34E-16	***	Si	0.89%
Molienda: Colorante	2	0.136	0.068	24.445	1.11E-10	***	Si	0.47%
Molienda	2	0.078	0.039	14.111	1.26E-06	***	Si	0.27%
Colorante	1	0.003	0.003	0.902	0.343		No	0.01%
Signif. codes: <ul style="list-style-type: none"> • *** = muy significativo (p < 0.001) • ** = significativo (p < 0.01) • * = moderadamente significativo (p < 0.05) Ningún símbolo = no significativo								

Fuente: Elaboración propia (2025) a partir de datos experimentales procesados en RStudio

El cuadro presenta los resultados completos del análisis de varianza (ANOVA) aplicado al diseño factorial 4×3×2, evaluando la influencia de Pretratamiento, Molienda y Colorante, así como todas sus interacciones, sobre la remoción de color. Los cálculos fueron realizados en RStudio a partir de los datos experimentales obtenidos en laboratorio. Para elaborar este cuadro se utilizaron los datos de los Cuadros 27, 28, 29 y 30.

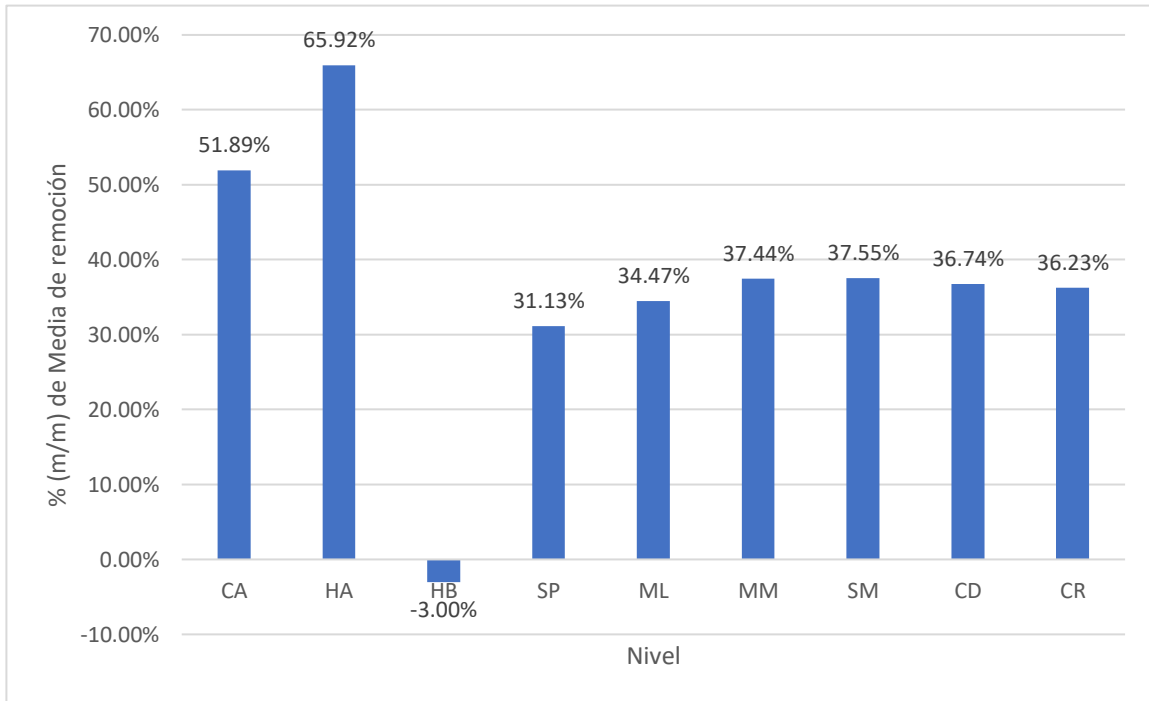
Figura 6: Efecto promedio de los factores pretratamiento, molienda y colorante sobre la remoción media de color



Fuente: Elaboración propia (2025)

En esta figura se presenta el efecto promedio de los factores pretratamiento, molienda y colorante sobre la remoción media de color. Los datos para elaborar esta figura se pueden observar en el Cuadro 37.

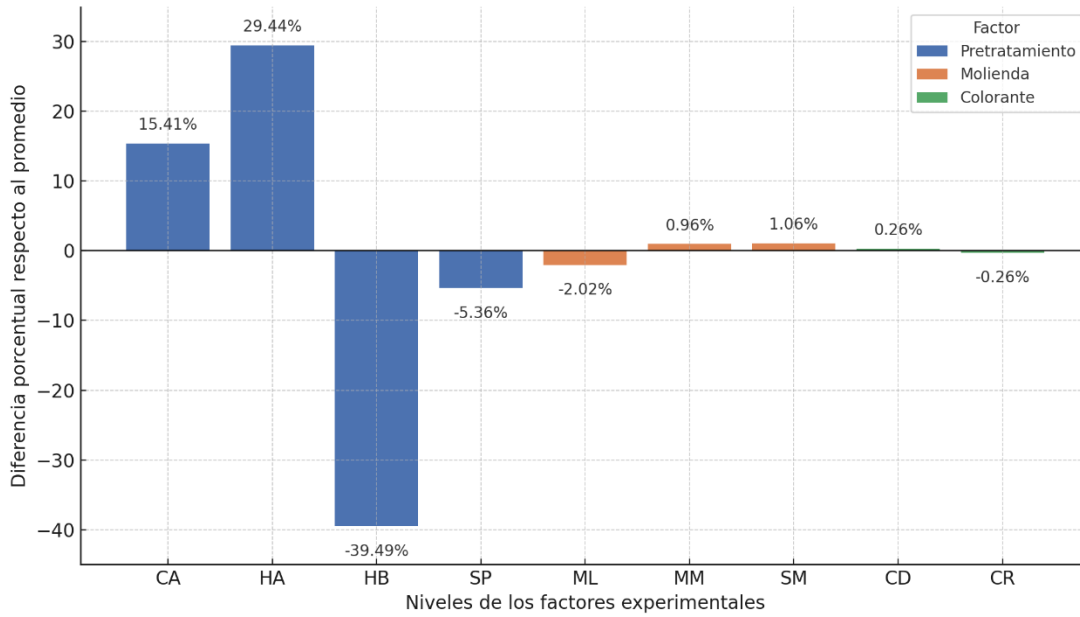
Figura 7: Remoción promedio de color (%) para cada nivel de pretratamiento, molienda y colorante



Fuente: Elaboración propia (2025)

La figura presenta la media de remoción obtenida para cada nivel experimental de los factores evaluados. Estos promedios corresponden al desempeño de cada nivel considerando todas las combinaciones en las que estuvo presente. Para realizar esta figura se utilizaron los datos del Cuadro 38. La incertidumbre para los niveles del factor de pretratamiento es de $\pm 1.26\%$, de la molienda $\pm 1.46\%$ y de los colorantes $\pm 1.79\%$.

Figura 8: Contribución de cada nivel experimental a la remoción promedio de color



Fuente: Elaboración propia (2025)

La figura muestra la contribución relativa de cada uno de los niveles de los factores experimentales sobre la remoción promedio de color. Para elaborar esta figura se utilizaron los datos del Cuadro 36. La incertidumbre para los niveles del factor de pretratamiento es de $\pm 2.83\%$, de la molienda $\pm 2.92\%$ y de los colorantes $\pm 3.10\%$.

Cuadro 5: Clasificación de combinaciones experimentales según su media de remoción de color

No°	Combinación	Media de remoción (% m/m $\pm 0.52\%$)
1	HAMLCD	78.185%
2	HASMCR	73.865%
3	HAMMCD	73.647%
4	HAMMCR	68.535%
5	HASMCD	63.061%
6	CAMLCR	60.070%
7	CAMMCR	58.676%
8	CASMCD	54.782%
9	CASMCR	52.456%
10	CAMMCD	46.198%
11	CAMLCD	39.166%
12	HAMLCR	38.240%
13	SPMMCD	34.744%
14	SPSMCR	34.161%
15	SPMLCD	32.432%
16	SPMLCR	31.003%
17	SPSMCD	29.251%
18	SPMMCR	25.195%
19	HBMLCD	-1.218%
20	HBMLCR	-2.143%
21	HBSMCR	-2.639%
22	HBMMCR	-2.648%
23	HBSMCD	-4.536%
24	HBMMCD	-4.810%

Fuente: Fuente: Elaboración propia (2025)

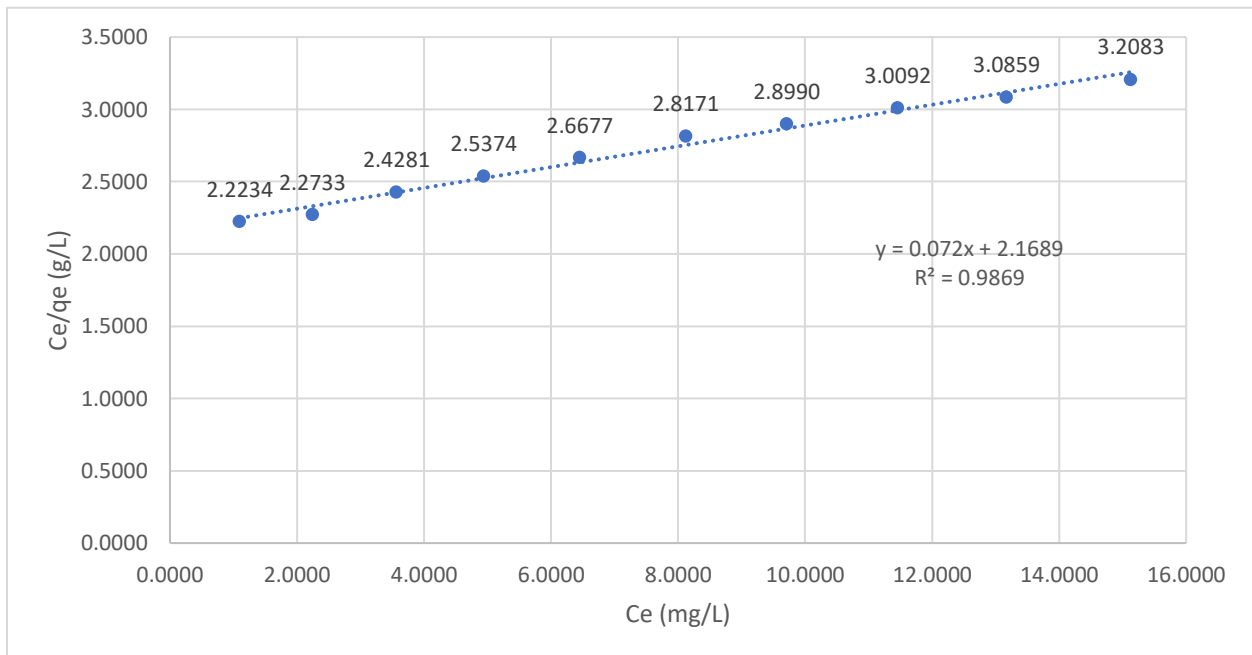
Este cuadro presenta la clasificación de las combinaciones experimentales evaluadas, ordenadas de mayor a menor según su media de remoción de color. Cada combinación corresponde a un conjunto específico de niveles de los factores pretratamiento, molienda y colorante. Los valores se calcularon a partir de los datos experimentales de la remoción de colorantes de cada combinación.

Nota: las variables empleadas en este cuadro se definen de la siguiente manera: HAMLCD (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis ácida (HA) + Molienda: Con licuadora (ML)

+ Colorante: Directo (CD)), HAMLCD (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis ácida (HA) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Reactivo (CR)), HAMMCD (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis ácida (HA) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Directo (CD)), HAMMCR (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis ácida (HA) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Reactivo (CR)), HASMCD (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis ácida (HA) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Directo (CD)), HASMCR (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis ácida (HA) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Reactivo (CR)), CAMLCD (Combinación de Pretratamiento: Carbón activado a base de residuos de palma africana (CA) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Directo (CD)), CAMLCD (Combinación de Pretratamiento: Carbón activado a base de residuos de palma africana (CA) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Reactivo (CR)), CAMMCD (Combinación de Pretratamiento: Carbón activado a base de residuos de palma africana (CA) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Directo (CD)), CAMMCR (Combinación de Pretratamiento: Carbón activado a base de residuos de palma africana (CA) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Reactivo (CR)), CASMCD (Combinación de Pretratamiento: Carbón activado a base de residuos de palma africana (CA) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Directo (CD)), CASMCR (Combinación de Pretratamiento: Carbón activado a base de residuos de palma africana (CA) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Reactivo (CR)), SPMLCD = Combinación de Pretratamiento: Sin pretratamiento (SP) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Directo (CD), SPMLCR (Combinación de Pretratamiento: Sin pretratamiento (SP) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Reactivo (CR)), SPMMLCD (Combinación de Pretratamiento: Sin pretratamiento (SP) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Directo (CD)), SPMMLCR (Combinación de Pretratamiento: Sin pretratamiento (SP) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Reactivo (CR)), SPSMCD (Combinación de Pretratamiento: Sin pretratamiento (SP) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Directo (CD)), SPSMCR (Combinación de Pretratamiento: Sin pretratamiento (SP) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Reactivo (CR)), HBMLCD (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis básica (HB) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Directo (CD)), HBMLCR (Combinación de Pretratamiento:

Hidrólisis básica (HB) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Reactivo (CR)), HBMMCD (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis básica (HB) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Directo (CD)), HBMMCR (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis básica (HB) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Reactivo (CR)), HBSMCD (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis básica (HB) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Directo (CD)), HBSMCR (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis básica (HB) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Reactivo (CR)).

Figura 9: Representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo, a partir de los valores promedio obtenidos experimentalmente

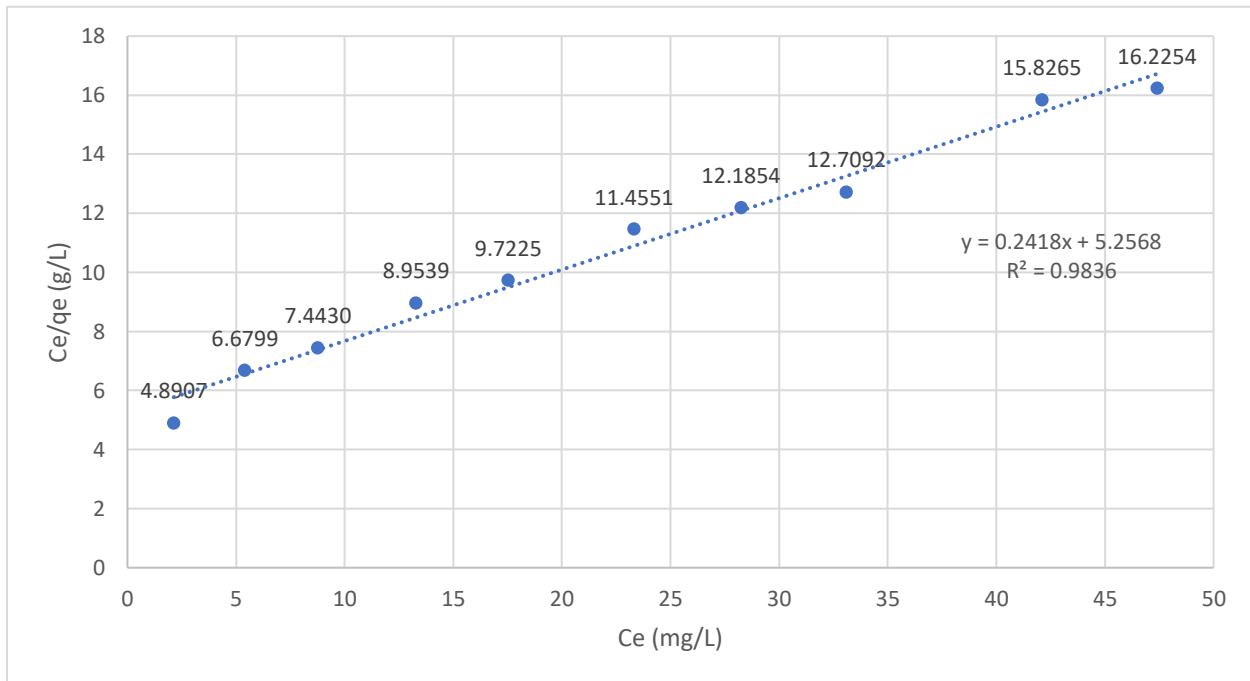


Fuente: Elaboración propia (2025)

La figura fue elaborada a partir de los valores promedio presentados en el Cuadro 48, utilizando la relación entre la concentración de equilibrio (C_e) y la razón C_e/q_e correspondiente a cada concentración inicial de colorante. Esta representación permitió obtener los parámetros del modelo de Langmuir para el tratamiento con residuos de palma africana (HAML). Para elaborar las curvas se utilizaron las Ecuaciones 15, 16, 17, 18 y 19.

Las cuales se pueden revisar en el **Apéndice** en los Cálculos de muestra. El carbón activado comercial que su utilizó es de origen vegetal pulverizado.

Figura 10: Representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo, a partir de los valores promedio obtenidos experimentalmente



Fuente: Elaboración propia (2025)

La figura fue elaborada a partir de los valores promedio presentados en el Cuadro 54, utilizando la relación entre la concentración de equilibrio (C_e) y la razón C_e/q_e , correspondiente a cada concentración inicial de colorante. Esta representación permitió obtener los parámetros del modelo de Langmuir para el tratamiento con carbón activado comercial. Para elaborar las curvas se utilizaron las Ecuaciones 15, 16, 17, 18 y 19. Las cuales se pueden revisar en el **Apéndice** en los Cálculos de muestra. El carbón activado comercial que su utilizó es de origen vegetal pulverizado.

Cuadro 6: Parámetros del modelo de Langmuir obtenidos a partir del promedio, para los tratamientos con residuos de palma africana (HAML) y carbón activado comercial con colorante directo

Adsorbente	m (g/mg)	Qm (mg/g ±0.3170)	b (g/L)	KL (L/mg ±0.0011)	R ²
HAML	0.0720	13.8979	2.1689	0.0332	0.9869
Carbón activado comercial	0.2418	4.1357	5.2568	0.0460	0.9836

Fuente: Elaboración propia (2025)

En este cuadro se presentan los parámetros promedio del modelo de Langmuir obtenidos para los tratamientos con residuos de palma africana (HAML) y con carbón activado comercial, ambos aplicados al colorante directo. Se incluyen la pendiente de la recta de ajuste (m), la capacidad máxima de adsorción (Qm, mg/g), la intersección en su forma lineal (b), la constante de afinidad o de Langmuir (KL, L/mg) y el coeficiente de determinación (R²) asociado al modelo. Los valores fueron calculados a partir de las representaciones lineales construidas con los datos promedio experimentales. Los datos utilizados para realizar este cuadro se pueden apreciar en el Cuadro 49 y en el Cuadro 55.

VIII. DISCUSIÓN

Como objetivo principal se planteó comparar la remoción de color en aguas residuales textiles simuladas mediante el uso de residuos de palma africana y carbón activado comercial. Esto con el propósito de evaluar su desempeño como materiales adsorbentes. Los objetivos específicos fueron definir posibles métodos de acondicionamiento de la biomasa para su transformación en sustituto de materiales comerciales; realizar un análisis factorial para determinar las variables con mayor influencia en el proceso de adsorción; y elaborar las curvas de Langmuir para estimar los parámetros característicos de la adsorción y compararlos.

Para evaluar el factor de colorante se trabajó con dos tipos de colorantes representativos de la industria textil guatemalteca: un colorante directo (Direct Black 22) y un colorante reactivo (Reactive Blue 203). Las dos razones principales por las que se decidió utilizar estos dos colorantes son: la alta prevalencia de los tonos negro y azul en la industria textil, ya que el negro representa cerca del 30 % de las elecciones de los consumidores en prendas de vestir y el azul, en especial el azul marino es identificado como el color favorito por más del 50 % de las personas encuestadas a nivel internacional (Big Brand Wholesale, s.f.). Y porque el uso de los colorantes directos y reactivos son dos de las clases más utilizadas en el país por su marcado mecanismo de fijación a las fibras y su resistencia a los lavados (Hunger, 2003; Zollinger, 2004).

Todas las lecturas espectrofotométricas se realizaron a una longitud de onda de 540 nm, seleccionada a partir de un barrido espectral previo que permitió identificar la máxima absorbancia de los colorantes empleados. El uso del espectrofotómetro UV-Vis para la cuantificación del color y la remoción de colorantes se fundamenta en su precisión y sensibilidad para detectar variaciones en la absorbancia de soluciones coloreadas (Lindon, Tranter, & Koppenaal, 2017). Este equipo permitió obtener datos reproducibles y objetivos, evitando la subjetividad de métodos visuales. Además de que no solo garantiza una adecuada cuantificación de la intensidad de color, sino que también facilita el cálculo del porcentaje de remoción, ya que la disminución en la absorbancia está directamente relacionada con la reducción de la concentración del colorante en la solución. Por estas razones, el espectrofotómetro se determinó como una herramienta confiable y ampliamente utilizable en la remoción de color, lo que respalda su elección en el presente trabajo.

La concentración de adsorbente seleccionada para las curvas de Langmuir fue de 0.9 g por 50 mL (equivalente a 18 g/L). Esta dosis se eligió a partir de un ensayo preliminar exploratorio, buscando un nivel intermedio de remoción que evitara tanto la saturación del sistema como una baja sensibilidad analítica. Aunque en corridas posteriores la eficiencia de adsorción fue ligeramente menor a la esperada, se alcanzó una remoción promedio del 66.53% (revisar Cuadro 43), lo cual se considera adecuado para la construcción precisa de la isoterma de Langmuir. Esta elección permite observar diferencias claras en la capacidad de adsorción a distintas concentraciones del colorante sin que el sistema se encuentre en condiciones de saturación total.

En este estudio se empleó el modelo de Langmuir debido a que los datos experimentales mostraron una tendencia hacia la saturación, lo cual es consistente con un proceso de adsorción en monocapa. Además, el tratamiento químico aplicado al residuo de palma africana mejoró la uniformidad superficial, haciendo que el sistema se ajustara adecuadamente a los supuestos del modelo. El ajuste al modelo de Langmuir presentó un coeficiente de correlación superior a 0.98, y permitió obtener parámetros, como la capacidad máxima de adsorción y la constante de afinidad, que resultan útiles para la comparación y caracterización del material adsorbente.

En este estudio no se aplicó el modelo de Freundlich, ya que los objetivos estuvieron orientados específicamente al ajuste del modelo de Langmuir, el cual permite obtener parámetros clave como la capacidad máxima de adsorción (Q_m) y la constante de afinidad (K_L), útiles para comparar materiales y caracterizar el desempeño del sistema. Si bien el modelo de Freundlich es aplicable a superficies heterogéneas y adsorción en múltiples capas, su carácter empírico no permite estimar una capacidad máxima definida, lo cual limita su utilidad en estudios donde se requiere cuantificar el límite de adsorción para propósitos comparativos o de diseño. Además, el comportamiento experimental observado mostró una tendencia clara hacia la saturación, coherente con los supuestos del modelo de Langmuir. Por tanto, se consideró innecesario aplicar modelos alternativos, ya que el enfoque adoptado respondió adecuadamente a los objetivos planteados.

Los ensayos de adsorción se llevaron a cabo a pH 10, valor que coincide con las condiciones típicas del agua residual proveniente de procesos de teñido textil (Madan & Madan, 2015), la cual suele presentar una marcada alcalinidad. Mantener este pH en los experimentos permitió simular de manera más fiel el entorno real en el que se aplicaría la técnica, garantizando

así la relevancia práctica de los resultados obtenidos. De esta forma, la elección del pH no solo obedeció a consideraciones metodológicas, sino también a la necesidad de reproducir condiciones industriales reales, lo que fortalece la aplicabilidad de la propuesta.

Bajo las condiciones evaluadas, los residuos de palma africana sometidos a una hidrólisis ácida y molienda licuada demostraron un desempeño sobresaliente en la remoción de colorantes textiles, alcanzando mayores valores de adsorción que el carbón activado comercial. Estos hallazgos respaldan la viabilidad de aprovechar residuos agroindustriales como alternativa sostenible para el tratamiento de aguas residuales de la industria textil en Guatemala.

Se utilizó una serie de pasos para estructurar la evaluación del método de remoción de color. Iniciando con la identificación de los procesos convencionales y continuando con el análisis de su posible sustitución mediante residuos de palma africana. El diagrama que se muestra en la Figura 11 en la sección de datos calculados, resume de manera ordenada cada etapa del procedimiento, desde la recopilación de información hasta la comparación de alternativas. Esto permitió visualizar claramente el proceso y facilitar la interpretación de los resultados obtenidos.

La Figura 4 resume los principales métodos de remoción de color considerados para el acondicionamiento del agua de la industria textil, incluyendo adsorción, coagulación-floculación, filtración biológica, oxidación avanzada y biorremediación enzimática. A partir del análisis comparativo realizado en la sección de datos calculados (Cuadro 16 al Cuadro 26), se identificó que la adsorción presenta mayores ventajas para su aplicación a nivel de laboratorio. Particularmente por la eficiencia de remoción, aplicabilidad industrial, valoración de los costos relativos de los insumos y la viabilidad del uso de residuos de palma africana. Además, este método permite evaluar de forma directa el desempeño de un adsorbente alternativo frente a un material comercial bajo condiciones controladas. Por estas razones, la adsorción fue seleccionada como el método más adecuado para el desarrollo del presente estudio.

La comparación de los distintos métodos de remoción de color presentada en el Cuadro 1 permite contextualizar la selección del método de adsorción dentro de las alternativas disponibles para el tratamiento de aguas residuales textiles. Si bien métodos como la coagulación-floculación, la oxidación avanzada y la biorremediación han demostrado ser efectivos bajo ciertas condiciones,

estos suelen implicar mayor complejidad operativa, consumo de reactivos o tiempos prolongados de tratamiento. En contraste, la adsorción destaca por su simplicidad, flexibilidad y facilidad de implementación a nivel de laboratorio, lo que la hace adecuada para estudios comparativos de materiales. Esta característica resulta especialmente relevante cuando se evalúan adsorbentes alternativos derivados de residuos agroindustriales. Por ello, la selección de la adsorción se considera coherente con los objetivos del estudio y con el enfoque experimental adoptado.

Los resultados del Cuadro 2 muestran que el método más destacado según su desempeño, evaluado por los distintos factores fue la adsorción. Con un puntaje de 2.90 sobre 3 (96.69%). Como se puede ver en el Cuadro 1, este método combina alta eficiencia, amplia aplicabilidad en la industria, costos de insumos que pueden ser bajos según el pretratamiento, y una elevada viabilidad para integrar residuos de palma africana. Esto lo convierte en la opción más versátil, ya que permite aplicar distintas formas de acondicionamiento a los residuos, como una hidrólisis, conversión en carbón activado o simplemente su uso directo como adsorbente. Según el enfoque que se le desee dar como económico o técnico.

En segundo lugar, se ubicó la oxidación avanzada, con una puntuación de 2.05 sobre 3 (68.33%). Aunque presenta una alta eficiencia y una aplicabilidad media alta. Su principal limitante radica en los elevados costos y la necesidad de modificar los residuos de palma para obtener *biochar* o carbón activado. Este proceso no solo incrementa la complejidad operativa y los costos de los insumos, sino que además solo el 30% de los residuos se convierten en carbón activado o *biochar*, lo que implica la necesidad de una mayor cantidad de materia prima. Considerando estas desventajas, su aplicación resulta menos atractiva en comparación con la adsorción.

El tercer lugar correspondió a la coagulación-floculación con 1.95 (65.00%). Si bien se muestra que la eficiencia es media-alta y aplicabilidad elevada, el uso de residuos de palma africana es restringido. Esto debido a que requiere convertir los residuos en ceniza, con una baja conversión de material útil (aproximadamente 7%) y una limitada capacidad para remover colorantes solubles. Su principal ventaja fue el bajo costo de sus insumos con un estimado de GTQ 1.63 para acondicionar 1 kg de residuo, como se puede observar en el Cuadro 23.

La filtración biológica obtuvo 1.05 (35.00%), lo que lo coloca en el cuarto lugar. Únicamente puede remover el color para casos muy específicos y no permite utilizar los residuos de palma de forma directa para remover el color. Únicamente se pueden utilizar como soporte para el crecimiento y mantenimiento microbiano. Su principal fortaleza fue el bajo costo, con una estimación de GTQ 16.36 para acondicionar 1kg de residuo como presenta el Cuadro 23.

Finalmente, la biorremediación enzimática resultó ser el tratamiento menos viable, con un 0.80 sobre 3 (26.66%). Su limitación fundamental es la alta probabilidad de ausencia de enzimas activas en los residuos de palma africana. Esto obligaría a incorporar enzimas externas, lo que elevaría los costos y complicando el proceso.

Aunque los resultados obtenidos se basan en un sistema de puntuación ponderada como se muestra en el Cuadro 26, es importante señalar que este tipo de análisis puede verse afectado por la asignación de los pesos relativos. Sin embargo, incluso si se aplicaran variaciones razonables en dichos pesos, la adsorción seguiría siendo el método más ventajoso. Esto ya que la adsorción destaca en prácticamente todos los criterios evaluados. Lo que reafirma su posición como la mejor alternativa como método de remoción de color en términos integrales.

La elección de la adsorción como método de remoción de color no solo se justifica por su rendimiento técnico y económico, sino que también por su conexión directa con el enfoque experimental adoptado en esta investigación. Toda la experimentación de la tesis se centró en analizar la remoción de color con este método. Evaluando distintos factores que promueven la adsorción y comparando el desempeño con el residuo de palma africana frente a carbón activado comercial, lo cual da continuidad a los hallazgos teóricos que se presentan aquí.

El diseño experimental aplicado presentado en el Cuadro 3 permitió evaluar de manera sistémica la influencia de los factores pretratamiento, molienda y tipo de colorante sobre la remoción de color. La estructura factorial 4x3x2 con cuatro repeticiones por combinación y cuatro lecturas independientes por repetición permitió la realización de un análisis estadístico robusto y capaz de identificar no solo los efectos principales de cada factor, sino que también sus interacciones. Este enfoque metodológico es relevante en sistemas de adsorción complejos, donde

la respuesta depende de la combinación de condiciones experimentales y no únicamente de las variables individuales.

La Figura 5 muestra la distribución general de los porcentajes de remoción de todas las combinaciones experimentales realizadas, con un total de 384 lecturas. El rango de resultados fue desde un máximo de 86.73% (m/m), hasta valores negativos de -8.37% (m/m). La mediana fue de 37.62% (m/m), mientras que el promedio se ubicó un poco por debajo con un 36.49% (m/m). Esto indica que una tendencia hacia valores intermedios con una dispersión considerable. El cuartil inferior ($Q1= 5.56\%$ m/m) refleja que una cuarta parte de las combinaciones prácticamente no lograron remover el color. Muy probablemente las combinaciones que involucraban una hidrólisis básica. Mientras que el cuartil superior ($Q3=59.01\%$ m/m) muestra que el 25% de las combinaciones alcanzaron un nivel de remoción bastante alto. Esta heterogeneidad confirma que el desempeño del sistema dependió de manera crítica de las condiciones aplicada. Particularmente el pretratamiento, y justifica el análisis estadístico posterior para identificar cuáles fueron los factores más influyentes.

La Figura 7 presenta los valores promedio de remoción de color alcanzados por cada nivel de los factores Pretratamiento, Molienda y Colorante. La mayor remoción se observa con el pretratamiento de hidrólisis ácida (HA) de 65.92% (m/m). Le sigue el carbón activado a partir de residuos de palma africana (CA) con 51.89% (m/m). El tercer lugar se lo llevan los residuos de palma africana a los que no se les aplicó un pretratamiento (SP) con una eficiencia del 31.13% (m/m). Mientras que la hidrólisis básica (HB) mostró un desempeño negativo (-3.00% m/m), lo que indica que, en promedio, no solo no removió el color, sino que incluso pudo haber liberado compuestos que aumentaron la absorbancia. En cuanto a la molienda, los tres niveles evaluados (ML, MM y SM) presentaron valores cercanos entre sí (34–38% m/m), lo que sugiere un efecto limitado en comparación con el pretratamiento. Finalmente, los colorantes directo (CD) y reactivo (CR) arrojaron promedios similares (36–37% m/m), lo cual confirma que el tipo de colorante no influyó significativamente ($p= 0.343$) en la remoción bajo las condiciones aplicadas. Estos resultados concuerdan con el análisis estadístico ANOVA, donde solo el pretratamiento se identificó como factor determinante en la variabilidad del sistema.

El análisis de varianza ANOVA del Cuadro 4 mostró que el factor pretratamiento fue el más influyente del modelo. Explicando la mayor parte de la variabilidad observada en la remoción de color (88.65%, $p < 0.001$), además de ser significativamente influyente. Este hallazgo coincide con las diferencias experimentales entre tratamientos, ya que la hidrólisis ácida (HA) destacó como el nivel más efectivo. Por otro lado, la hidrólisis básica (HB) incluso presentó un efecto negativo. El modelo global explicó el 96.6% de la variabilidad, con solo un 3.4% asociado a los residuales, lo que confirma un ajuste estadístico sólido y confiable.

Además del pretratamiento, el ANOVA Cuadro 4 identificó como relevantes varias de las interacciones. La que más resalto fue la triple Pretratamiento \times Molienda \times Colorante (4.30%, $p < 0.001$). Aunque sus aportes individuales a la variabilidad (4.30%) fueron menores que los del pretratamiento por sí solo, su significancia estadística indica que la efectividad de los tratamientos depende de cómo se combinan los factores. De hecho, tanto la interacción Pretratamiento \times Colorante como Pretratamiento \times Molienda resultaron significativas, mostrando que el desempeño de un nivel no puede evaluarse de forma aislada. En contraste, el factor colorante por sí solo no fue significativo (0.01%, $p > 0.05$). Esto evidencia que, bajo las condiciones del estudio, que el colorante sea directo o reactivo no modificó sustancialmente el comportamiento del sistema.

Los efectos principales de la Figura 8 confirmaron que la hidrólisis ácida (HA) aportó la mayor contribución positiva (+29.44% m/m) a la remoción media de color. Seguida por el carbón activado a base de residuos de palma africana (CA) con un +15.41% (m/m). El SP se mantuvo muy cerca de la media de remoción de color, aunque afectando ligeramente de forma negativa (-5.36% m/m). Mientras que HB mostró un valor marcadamente negativo (-39.49% m/m). Este desempeño adverso se puede relacionar a la liberación de compuestos solubles y la fuerte repulsión electrostática generada por la carga superficial negativa del residuo en condiciones alcalinas. A diferencia de HB, HA sí favoreció a la remoción de colorantes, probablemente debido a la eliminación parcial de los componentes no estructurales. Y a la formación de grupos funcionales capaces de interactuar con los colorantes aniónicos a pH 10. Esto lo que evidencia es que es muy importante aplicar un pretratamiento químico adecuado para potenciar la capacidad adsorbente de los residuos lignocelulósicos.

La Figura 6 ilustra el efecto porcentual promedio de los factores pretratamiento, molienda y colorante sobre la remoción media de color. Esto lo que hace es confirmar que el pretratamiento fue el factor con mayor influencia, explicando un 22.43% (m/m) de la variación en la media. Mientras que la molienda y el colorante apenas representan un 1.35% (m/m) y un 0.26% (m/m). Este resultado es consistente con el análisis de la varianza ANOVA del Cuadro 4, donde únicamente el pretratamiento se determinó como significativo por su alta variabilidad. Lo que significa que la elección del pretratamiento aplicado a los residuos de palma africana fue la variable de mayor impacto en la adsorción. Mientras que los otros factores no representaron cambios relevantes en la media del sistema.

Contrario a lo esperado, la molienda con licuadora (ML), que presentaba el tamaño de partícula más pequeño según las tablas del **Apéndice**, fue la que mostró menor adsorción promedio en la remoción de color. Este resultado puede parecer contraintuitivo, ya que, en teoría, una mayor área superficial disponible favorece la adsorción al exponer más sitios activos del adsorbente. Sin embargo, en los niveles de molienda, tanto la molienda con mazo (MM) como la condición sin molienda (SM) aportaron efectos ligeramente positivos, mientras que la molienda licuada (ML) tendió a valores negativos. Esto se puede asociar a la reducción excesiva de tamaño de partícula, que generó fracciones muy finas difíciles de sedimentar y con mayor probabilidad de liberar sustancias interferentes. Por el contrario, para SM o MM, aunque menos finas, es probable que hayan conservado una estructura más porosa y estable, lo cual favoreció la adsorción en condiciones experimentales. Sin embargo, en combinación con HA, la molienda licuada sí mejoró el desempeño, lo que confirma que su efecto depende del tipo de pretratamiento aplicado. Esto refuerza que un área superficial teórica mayor no siempre garantiza una mejor adsorción si la integridad estructural del material se ve comprometida.

Respecto al tipo de colorante, los resultados de la Figura 7 confirmaron que tanto el colorante directo como el reactivo presentaron promedios muy similares (36.74% m/m y 36.23% m/m, respectivamente). Su efecto en la remoción promedio del colorante fue de apenas un 0.26% (Figura 6). Esto puede explicarse porque ambos colorante son aniónicos, con estructuras de tamaño y polaridad comparables. También porque las condiciones de $\text{pH} = 10$ favorecieron a ambos por igual. La ausencia de diferencias notorias sugiere que los residuos de palma africana podrían ser

aplicables en sistemas con distintos tipos de colorantes, lo cual refuerza su potencial de escalabilidad.

La combinación con la que se decidió utilizar para los residuos de palma africana para ser comprados con el adsorbente comercial fue la de HAMLCD. La elección de esta combinación se fundamentó en que obtuvo la mayor media de remoción (78.19% m/m), como se puede observar en el Cuadro 5, superando al resto de tratamientos aplicados. Aunque a partir de la Figura 7, se podría inferir que la opción más adecuada fuera HASMCD o incluso HAMMCD, sin embargo, estas alcanzaron una un valor promedio en la remoción menor (63.06% m/m y 73.65% m/m respectivamente). Esto las posicionó más abajo en la tabla de clasificación. Esta decisión también se ve reforzada por los hallazgos de la prueba de comparaciones múltiples de Tukey (ver **Apéndice**). Este análisis mostró que frente a HASMCD sí existió una diferencia significativa, indicando que este nivel particular alcanzó un desempeño superior en esa comparación puntual. Aun así, el hecho de que HAMLCD no presentara diferencias significativas frente a HAMMCD y alcanzara la media global más alta refuerza su elección como la combinación más consistente y adecuada para los siguientes análisis. De esta manera queda expuesta la superioridad estadística y práctica de HAMLCD y se justifica su elección como la alternativa más robusta y confiables en la elaboración de los isotermas de Langmuir y ser comparada con el adsorbente comercial.

En el Cuadro 6 se observa que el carbón activado comercial presentó una capacidad máxima de adsorción (Q_m) de 4.1357 mg/g, mientras que el residuo de palma africana modificado con HAML alcanzo un valor notablemente mayor, de 13.8979 mg/g. Esta diferencia indica que, bajo las condiciones experimentales aplicadas, el desecho lignocelulósico tratado con HAML logro tener una retención mayor en la cantidad de colorante por unidad de masa.

No obstante, cuando se analiza la constante de Langmuir en su forma lineal, que refleja la interacción entre el adsorbente y el adsorbato, se obtuvo una variación de 0.0332 L/mg para el HAML y 0.0460 L/mg para el carbón activado comercial. Esta diferencia, aunque no es excesivamente amplia, sí indica que el carbón activado comercial tiene una ligera mayor afinidad química para el colorante que los residuos tratados. Lo cual es consistente por su alta porosidad superficial. Sin embargo, esta ventaja fue insuficiente para compensar su limitada capacidad total de adsorción.

Ambos tratamientos presentaron altos coeficientes de determinación (R^2) de 0.9869 para HAML y de 0.9836 para carbón activado comercial, lo que indica un ajuste satisfactorio al modelo de Langmuir en ambos casos. Esto respalda que la adsorción se comportó como un fenómeno de tipo mono molecular, sobre los sitios homogéneos y con tendencia a la saturación, lo cual es coherente con los supuestos del modelo y con el comportamiento observado en las gráficas experimentales, las cuales se pueden observar en la Figura 9 y en Figura 10.

A pesar de ser un subproducto agroindustrial, su desempeño superó al material comercial. Esto se puede atribuir a varios factores estructurales y químicos. En primer lugar, el tratamiento por medio de una hidrólisis ácida aplicado al residuo eliminó compuestos superficiales hidrofóbicos y expuso los grupos funcionales activos como hidroxilos y carboxilos, esto facilita la interacción con el colorante. Estos grupos funcionales favorecen tanto la adsorción física (por interacciones de Van der Waals) como la química (por intercambio iónico o formación de enlaces de hidrógeno). Además, el tamaño de partícula del HAML es muy superior al del carbón activado comercial (revisar en **Apéndice**), lo que pudo haber causado que haya existido una menor resistencia difusional interna, permitiendo una mayor distribución del adsorbato en las capas superficiales accesibles. El carácter lignocelulósico del HAML le confiere una matriz heterogénea rica en sitios activos. Estos son menos uniformes que los del carbón activado, sin embargo, pueden ser más abundantes en términos absolutos.

Otra posible explicación para el desempeño superior del residuo de palma africana (HAML) frente al carbón activado comercial radica en las dificultades experimentales asociadas al uso del adsorbente pulverizado. En este estudio, el carbón activado presentaba una granulometría extremadamente fina, lo cual ocasionó problemas durante las lecturas sin filtrar, como se pueden apreciar en el **Apéndice**. Por esta razón fue necesario aplicar una filtración para poder medir la absorbancia, ya que, debido al tamaño de la partícula, se generaron partículas suspendidas en las soluciones las cuales interferían con la lectura espectrofotométrica. Esto puede haber provocado una subestimación de la remoción real en los tratamientos con carbón activado, disminuyendo artificialmente los valores de Q_m y afectando el ajuste de la curva KL.

Otro factor importante que pudo haber influido en el desempeño observado para el carbón activado comercial es el tipo de sistema de agitación utilizado durante los ensayos. Como se

mencionó con anterioridad, el material es extremadamente liviano y pulverizado. Lo que ocasiona que muchas de sus partículas tienden a flotar o permanecer suspendidas en la superficie del líquido. Esto dificulta el contacto efectivo con el colorante disuelto en la solución. Además, se observó, que las partículas del carbón activado comercial tendían a aglomerarse en la superficie formando grumos, lo que redujo considerablemente el área superficial efectiva en contacto con el colorante y, en consecuencia, limitó su capacidad de adsorción. En cambio, el residuo de palma africana (HAML), al tener mayor densidad y tamaño de partícula, se mantuvo sumergido. Lo que permitió un contacto más uniforme con la solución durante todo el tiempo de adsorción. Y presentaron una distribución más uniforme y estable en el medio líquido, evitando la formación de aglomerados y favoreciendo la interacción directa con moléculas de colorante. Esta diferencia en el comportamiento físico pudo haber generado una limitación cinética para el carbón activado comercial, afectando negativamente su capacidad de remoción.

Por último, otro factor que debe considerarse es el efecto del pH experimental sobre ambos materiales. Se trabajó con un pH de 10, para los residuos de palma africana sometidos a una hidrólisis ácida, esto pudo haber potenciado la presencia de grupos carboxilo ionizados, generando una carga superficial negativa más fuerte que favorece la atracción electrostática con colorantes catiónicos o parcialmente positivos (Treybal, 1980). Por el contrario, el carbón activado comercial, sin modificación previa, podría haber tenido una menor densidad de carga superficial a ese pH, reduciendo así su eficiencia adsorbente.

En una posible aplicación a mayor escala, los residuos de palma africana utilizados como adsorbente podrían ser valorizados energéticamente mediante su combustión o aprovechamiento térmico, aprovechando su naturaleza lignocelulósica y su contenido energético. No obstante, es importante considerar que durante el proceso de adsorción el material entra en contacto directo con el agua, lo que puede incrementar significativamente su contenido de humedad. Este aumento en la humedad del residuo puede reducir su poder calorífico efectivo y, en consecuencia, disminuir la eficiencia del proceso de generación de energía si no se aplica un secado previo. Si bien este aspecto no fue evaluado en el presente estudio, se reconoce como un factor relevante a considerar en estudios de escalamiento o valorización energética posterior, ya que implicaría requerimientos adicionales de acondicionamiento y consumo energético.

IX. CONCLUSIONES

1. La evaluación comparativa de métodos tradicionales de remoción de color, ponderados por eficiencia, aplicabilidad, costos de insumos y viabilidad de uso de residuos de palma africana demostró que la adsorción fue el método más favorable. Este tratamiento alcanzó un puntaje ponderado de 2.90 sobre 3 (96.67%). Superando a los demás métodos analizados.
2. El análisis factorial total (4x3x2) reveló que el pretratamiento fue el factor más influyente, explicando un 88.65% de la variabilidad total en la remoción de color ($p < 0.001$). Dentro de este factor el nivel de hidrólisis ácida (HA) alcanzó el promedio más alto de remoción (65.92% m/m), mientras que la hidrólisis básica (HB) presentó los valores más bajos, incluso negativos. La mejor combinación experimental fue la combinación de hidrólisis ácida como pretratamiento, corte con licuadora como tipo de molienda y colorante directo (HAMLCD), con una eficiencia de 78.19% (m/m), lo que se consolidó como el tratamiento de referencia del estudio.
3. El modelo de Langmuir se ajustó a los datos experimentales de ambos adsorbentes con $R^2 > 0.98$. Con este modelo se obtiene que el tratamiento con residuos de palma africana (HAML) presentó una capacidad máxima de adsorción (Q_m) de 13.90 mg/g, más de tres veces superior a la obtenida con el carbón activado comercial (4.14 mg/g). Estos resultados evidencian el potencial del residuo tratado como material adsorbente.

X. RECOMENDACIONES

1. Determinar otra forma de agitación que eviten la flotación y aglomeración de los adsorbentes.
2. Realizar el estudio de la remoción de color utilizando carbón activado comercial en forma granular en vez del pulverizado.
3. Evaluar la activación térmica del carbón obtenido de los residuos de palma africana como alternativa a la activación química.
4. Verificar el uso de aguas residuales reales de la industria textil en lugar de aguas simuladas, para realizar el estudio de la remoción de color.
5. Evaluar el uso de otros agentes o concentraciones para la hidrólisis básica en los residuos en sustitución del NaOH al 10% m/v.

XI. BIBLIOGRAFÍA

- Abadulla, E., Tzanov, T., Costa, S., Robra, K. H., Cavaco-Paulo, A., & Gübitz, G. M. (2000). Decolorization and detoxification of textile dyes with a laccase from *Trametes hirsuta*. *Applied and Environmental Microbiology*, 66(8), 3357–3362. <https://journals.asm.org/doi/10.1128/aem.66.8.3357-3362.2000>
- Abbas, S., Javeed, T., Zafar, S., Taj, M. B., Ashraf, A. R., & Dine, M. I. (2021). Adsorption of crystal violet dye by using a low-cost adsorbent – peanut husk. *Desalination and Water Treatment*, 233, 387–398. https://www.deswater.com/DWT_articles/vol_233_papers/233_2021_387.pdf
- Abid, F., et al. (2012). Caracterización de aguas residuales en industrias textiles. *International Journal of Environmental Science*.
- Al-Ghouti, M. A., & Da'ana, D. A. (2020). Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 393, 122383. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030438942030371X?via%3Dihub>
- Al Jazeera. (2021). *Guatemala's growing palm oil industry fuels indigenous land fight*. <https://www.aljazeera.com/news/2021/10/15/guatemala-growing-palm-oil-industry-fuels-indigenous-land-fight>
- Argus Media. (2024). *Viewpoint: Market eyes Asian PKS price dynamics in 2024*. <https://www.argusmedia.com/en/news-and-insights/latest-market-news/2524318-viewpoint-market-eyes-asian-pks-price-dynamics-in-2024>
- Babel, S., & Kurniawan, T. A. (2003). Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: a review. *Journal of Hazardous Materials*, 97(1–3), 219–243. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389402002637?via%3Dihub>
- Babu, B. R., Parande, A. K., & Kumar, T. P. (2007). Textile technology: Cotton textile processing and effluent treatment. *Journal of Cotton Science*, 11(3), 141–153.

- Banco de la República de Colombia. (s. f.). *Tasa de cambio representativa del mercado (TRM)*.
https://suameca.banrep.gov.co/estadísticas-economicas/informacionSerie/1/tasa_cambio_peso_colombiano_trm_dolar_usd
- Bansal, R. C., & Goyal, M. (2005). *Activated Carbon Adsorption*. CRC Press.
- Barathi, S., et al. (2022). *Biofilm-mediated decolorization and degradation of reactive dye RR 170 by a bacterial consortium: Efficiency and toxicity assessment*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653521023869>
- Bhunia, A., Durani, S., & Wangikar, P. P. (2001). Horseradish peroxidase catalyzed degradation of industrially important dyes. *Biotechnology and Bioengineering*, 72(5), 562–567.
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11460246/>
- Big Brand Wholesale. (s.f.). *Ecommerce: The Most Popular Colors of Clothing People Buy*.
<https://bigbrandwholesale.com/wholesale-101/ecommerce-the-most-popular-colors-of-clothing-people-buy/>
- Chowdhury, S., Mishra, R., Saha, P., & Kushwaha, P. (2011). Adsorption thermodynamics, kinetics and isosteric heat of adsorption of malachite green onto chemically modified rice husk. *Desalination*, 265(1–3), 159–168.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S001191641000545X?via%3Dihub>
- Choy, S. Y., Prasad, K. M. N., Wu, T. Y., Ramanan, R. N., & Raghunandan, M. E. (2014). Utilization of plant-based natural coagulants as future alternatives towards sustainable water clarification. *Journal of Environmental Sciences*, 26(11), 2178–2189.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S100107421400165X?via%3Dihub>
- Common Objective. (2021, noviembre 23). *The issues: water*.
<https://www.commonobjective.co/article/the-issues-water>
- Corley, R. H. V., & Tinker, P. B. (2016). *The oil palm* (5th ed.). Wiley-Blackwell.

- Crini, G. (2006). Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: A review. *Bioresource Technology*, 97(9), 1061–1085.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852405002452?via%3Dihub>
- Daneshvar, N., Salari, D., & Khataee, A. R. (2004). Photocatalytic degradation of azo dye acid red 14 in water: Investigation of the effect of operational parameters. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 162(2–3), 317–322.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1010603003003782?via%3Dihub>
- Demirbaş, A. (2009). Agricultural based activated carbons for the removal of dyes from aqueous solutions: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 167(1–3), 1–9.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389408019663?via%3Dihub>
- Derakhshan, Z., Baghapour, M. A., Ranjbar, M., & Faramarzian, M. (2013). Adsorption of Methylene Blue Dye from Aqueous Solutions by Modified Pumice Stone: Kinetics and Equilibrium Studies. *Health Scope*, 2(3), 136–144.
<https://brieflands.com/articles/healthscope-20055.html>
- Earth.org. (2023). *10 concerning fast fashion waste statistics*. <https://earth.org/statistics-about-fast-fashion-waste/>
- Ellen MacArthur Foundation. (2017). *A new textiles economy: Redesigning fashion's future*. <https://ellenmacarthurfoundation.org/a-new-textiles-economy>
- Environmental and Health Effects of Textile Industry Wastewater. (2012). *Environmental and Health Effects of Textile Industry Wastewater*. Environmental and Health Effects of Textile Industry Wastewater.
- European Parliamentary Research Service. (2019). *Environmental impact of the textile and clothing industry: What consumers need to know* (Briefing No. 633143). European Parliament.
[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2019/633143/EPRS_BRI\(2019\)633143_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2019/633143/EPRS_BRI(2019)633143_EN.pdf)

- FAO. (2022). *Oil palm: Sustainable development and challenges*. <https://www.fao.org/>
- FASH455. (2023, agosto 14). *WTO Reports World Textiles and Clothing Trade in 2022: Import and export trends*. FASH455 Global Apparel & Textile Trade and Sourcing. <https://shenglufashion.com/2023/08/14/wto-reports-world-textiles-and-clothing-trade-in-2022/>
- Fathy, N. A., El-Shafey, O. I., & Khalil, L. B. (2013). Effectiveness of alkali-acid treatment in enhancement the adsorption capacity for rice straw: The removal of methylene blue dye. *Open Access Library*, 2013. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2013/208087>
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2–10. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894709006147?via%3Dihub>
- Forss, J., Lindh, M. V., Pinhassi, J., & Welander, U. (2017). Microbial Biotreatment of Actual Textile Wastewater in a Continuous Sequential Rice Husk Biofilter and the Microbial Community Involved. *PLoS ONE*, 12(1), e0170562. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0170562>
- Frontiers in Environmental Science. (2021). Ecological risks and biodiversity loss in textile wastewater impacted sediments. *Frontiers in Environmental Science*.
- Fu, F., Wang, Q., Tang, B., & Dionysiou, D. D. (2017). The change from past to future for adsorbent materials in treatment of dyeing wastewaters. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(11), 9945–9964. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5452789/>
- Fu, J., Chen, Z., Wang, M., Liu, S., Zhang, J., Zhang, J., & Han, R. (2017). Adsorption of methylene blue by a high-efficiency adsorbent (polydopamine microspheres): Kinetics, isotherms, thermodynamics and mechanism analysis. *Chemical Engineering Journal*, 259, 53–61. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894714010055>

- Fundesa. (2024). *Benchmark: Sector vestuario y textil Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua, Haití*.
https://fundesa.org.gt/content/files/publicaciones/pcoe/Benchmark_Vestuario_Textiles_2024_espanol.pdf
- Gao, B. Y., Yue, Q. Y., Miao, J., Li, Q., & Tang, H. (2011). Coagulation performance and floc characteristics of aluminum sulfate in different water qualities. *Journal of Environmental Sciences*, 23(5), 846–852.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927775715300352?via%3Dihub>
- García, J. A., Cárdenas, M. M., & Yáñez, E. E. (2010). Generación y uso de biomasa en plantas de beneficio de palma de aceite en Colombia. *Palmas*, 31(2), 41–48.
<https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/download/1477/1477>
- Glaze, W. H., Kang, J. W., & Chapin, D. H. (1987). The chemistry of water treatment processes involving ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet radiation. *Ozone: Science & Engineering*, 9(4), 335–352.
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01919518708552148>
- Gobierno de Guatemala. (2006). *Acuerdo Gubernativo 236-2006: Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos*. Diario de Centro América.
<https://marn.gob.gt>
- GREPALMA. (2021). *Estadísticas socioeconómicas 2020*. Gremial de Palmicultores de Guatemala. <https://www.grepalma.org/wp-content/uploads/2021/05/Socio-Economic-Statistics-Year-2020.pdf>
- GREPALMA. (2023). *Seed for the future: Sustainable palm oil agro-industry in Guatemala*. Gremial de Palmicultores de Guatemala. https://www.grepalma.org/wp-content/uploads/2023/06/Seed-for-the-future_version-2023_compressed.pdf
- Hall, K. R., Eagleton, L. C., Acrivos, A., & Vermeulen, T. (1966). Pore- and solid-diffusion kinetics in fixed-bed adsorption under constant-pattern conditions. *Industrial &*

- Engineering Chemistry Fundamentals*, 5(2), 212–223.
<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/i160018a011>
- Hameed, B. H., Din, A. T. M., & Ahmad, A. L. (2007). Adsorption of methylene blue onto bamboo-based activated carbon: Kinetics and equilibrium studies. *Journal of Hazardous Materials*, 141(3), 819–825.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389406008739?via%3Dihub>
- Hassan, N. S., & Badri, K. H. (2014). Lignin recovery from alkaline hydrolysis and glycerolysis of oil palm fiber. *AIP Conference Proceedings*, 1614(1), 433–438.
<https://pubs.aip.org/aip/acp/article/1614/1/433/828254/Lignin-recovery-from-alkaline-hydrolysis-and>
- Healthy Materials Lab. (2025). *Textiles & water*. <https://healthymaterialslab.org/tool-guides/textiles-water>
- Ho, S. M. (2020). *Removal of dyes from wastewater by adsorption onto activated carbon: Mini review*. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 8(5), 120–131.
<https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=100280>
- Hoekstra, A. Y., & Chapagain, A. K. (2008). *Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources*. Blackwell Publishing.
- Holkar, C. R., Jadhav, A. J., Pinjari, D. V., Mahamuni, N. M., & Pandit, A. B. (2016). A critical review on textile wastewater treatments: Possible approaches. *Journal of Environmental Management*, 73(2), 245–263.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479716305266>
- Hunger, K. (2003). *Textile Dyes: Classification and Properties*. En K. Hunger (Ed.), *Industrial Dyes: Chemistry, Properties, Applications* (pp. 11–45). Wiley-VCH.
- Husain, Q. (2008). Potential applications of the oxidoreductive enzymes in the decolorization and detoxification of textile and other synthetic dyes from polluted water: A review. *Critical*

- Reviews in Biotechnology*, 26(4), 201–221.
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/07388550600969936>
- Ibrahim, M. N. M., Tan, Y. Y., Mohd, H., & Rahman, M. A. (2021). Surface functionalization of *biochar* from oil palm empty fruit bunch through hydrothermal process for enhanced adsorption of methylene blue. <https://www.mdpi.com/2227-9717/9/1/149>
- Kadolph, S. J. (2010). *Textiles* (11th ed.). Pearson Education.
- Koprivanac, N., Kusic, H., & Bozic, A. (1993). High concentration of reactive dye in textile effluents. *Journal of Environmental Management*, 39(1), 71–77.
- Kunz, A., Peralta-Zamora, P., Moraes, S. G., & Durán, N. (2002). New tendencies on textile effluent treatment. *Química Nova*, 25(1), 78–82.
<https://www.scielo.br/j/qn/a/WZkZzMz4JLhpmyxBq5GfPqB/?lang=pt>
- Langmuir, I. (1918). The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical Society*, 40(9), 1361–1403.
<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ja02242a004>
- Lindon, J. C., Tranter, G. E., & Koppenaal, D. W. (Eds.). (2017). *Encyclopedia of spectroscopy and spectrometry* (3rd ed., Vol. 1). Academic Press.
https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9780128032251_A28527974/preview-9780128032251_A28527974.pdf
- Liu, Q. S., Zheng, T., Wang, P., Jiang, J. P., & Li, N. (2012). Adsorption isotherm, kinetic and mechanism studies of some substituted phenols on activated carbon fibers. *Chemical Engineering Journal*, 178, 128–136.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894709007955?via%3Dihub>
- Madan, S. M., & Madan, S. (2015). *Physico-chemical parameters and heavy metal concentrations in textile effluents*. *Krishi Sanskriti Publications*, 2(3), 286–294.
https://krishisanskriti.org/vol_image/17Dec201905123908%20Sangeeta%20Madan%20286-294.pdf

- Malaysian Palm Oil Board (MPOB). (2024). *Overview of the Malaysian oil palm industry in 2023*. <https://bepi.mpob.gov.my/images/overview/Overview2023.pdf>
- MDPI. (2024). Treatment of Textile Wastewater Using Advanced Oxidation Processes—A Critical Review. *Water*, 13(24), 3515. <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/24/3515>
- Metcalf & Eddy, Inc. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5.^a ed.). McGraw-Hill Education.
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN). (2021). *Informe sobre cumplimiento ambiental industrial*. Gobierno de Guatemala.
- Mongabay. (2024). *Palm oil giants push out smallholders in Guatemala; deforestation risks remain*. <https://news.mongabay.com/2024/01/palm-oil-giants-push-out-smallholders-in-guatemala-deforestation-risks-remain/>
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (9th ed.). John Wiley & Sons
- Moussa, R., Madonna, A., Gallego, J., & Heisele, A. (2022). Preparation and characterization of lignocellulosic biomass-derived activated carbon: process parameters and performance. *Materials*, 16(23), 7365. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36478849/>
- Nawaz, M. S., & Ahsan, M. (2014). Comparison of physico-chemical, advanced oxidation and biological techniques for the textile wastewater treatment. *Alexandria Engineering Journal*, 53(3), 717–722. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016814000635?via%3Dihub>
- Ndabigengesere, A., & Narasiah, K. S. (1998). Quality of water treated by coagulation using *Moringa oleifera* seeds. *Water Research*, 32(3), 781–791. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135497002959?via%3Dihub>
- Organización Mundial de la Salud (s. f.). *Impacto en la salud y ecosistemas*. In *Environmental Health Guide*. OMS.

Our World in Data. (2025). Palm oil production (UN FAO data). Recuperado el 17 de marzo de 2025.

Palmieri, G., Cennamo, G., & Sanna, G. (2001). Remazol Brilliant Blue R decolourization by the fungus *Pleurotus ostreatus* and its oxidative enzymatic system. *Enzyme and Microbial Technology*, 28(7–8), 530–536. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141022904002960?via%3Dihub>

Patel, H., & Vashi, R. T. (2010). Characterization and treatment of textile wastewater. *International Journal of Applied Environmental Sciences*, 5(5), 807–826.

Pera-Titus, M., García-Molina, V., Baños, M. A., Giménez, J., & Esplugas, S. (2004). Degradation of chlorophenols by means of advanced oxidation processes: A general review. *Applied Catalysis B: Environmental*, 47(4), 219–256. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926337303004533?via%3Dihub>

Picoli, A. C. G., et al. (2023). Textile production water use and textile wastewaters. VTT Technical Research Centre of Finland.

Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R., & Nigam, P. (2001). Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Bioresource Technology*, 77(3), 247–255

Salazar Rubio, D., Martínez-Hernández, A., & Peña, M. (2023). A review on advances in the use of raw and modified agricultural biomass for adsorption of water pollutants. *Polymers*, 17(7), 953. <https://www.mdpi.com/2073-4360/17/7/953>

Sánchez, G., & González, M. (2016). Procesos de adsorción en el tratamiento de aguas residuales. Editorial Académica Española.

Sangeetha, A., Mahalakshmi, V., Subha, R., & Abirami, R. (2021). Experimental investigation on dye removal using citrus peel powder as an adsorbent. *Journal of Physics: Conference Series*, 2040(1), 012055. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2040/1/012055>

- Sarwono, R., Tursiloadi, S., & Sembiring, K. C. (2016). Carbonization of palm oil empty fruit bunch (EFB) in hydrothermal processes to produce *biochar*. *Jurnal Kimia Terapan Indonesia*, *18*(2), 116–123. https://www.researchgate.net/publication/326324108_Carbonization_of_Palm_Oil_Empty_Fruit_Bunch_EFB_in_Hydrothermal_Processes_to_Produce_Biochar?utm_source=chatgpt.com
- SigmaDAF Clarifiers. (2021). *Tratamiento y reutilización de aguas residuales en la industria textil* [Datos típicos de pH]. Recuperado de <https://sigmadafclarifiers.com/en/tratamiento-y-reutilizacion-de-aguas-residuales-industria-textil/#:~:text=The%20processes%20most%20commonly%20combined,is%20to%20be%20reused%20for>
- Singh, R. L., Singh, P. K., & Singh, R. P. (2015). Enzymatic decolorization and degradation of azo dyes – A review. *International Biodeterioration & Biodegradation*, *104*, 21–31. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0964830515001572?via%3Dihub>
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* (4.^a ed.). McGraw-Hill.
- Thermo Fisher Scientific. (2020). *Tips and techniques for measuring color in water using UV-Visible spectrophotometry* [AN-034]. https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/LPD/Application-Notes/an_034_tip_color_measurement_1120.pdf
- Tran, H. N., You, S.-J., Chao, H.-P. (2017). Fast and efficient adsorption of methylene blue onto tea waste: Performance, mechanism and process optimization. *Journal of Environmental Management*, *188*, 322–336. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479716309768?via%3Dihub>
- Treybal, R. E. (1980). *Mass-transfer operations* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- UniformMarket. (2025). Global apparel industry statistics and trends. <https://www.uniformmarket.com/statistics/global-apparel-industry-statistics>

- USDA. (2024). *Production, Supply and Distribution (PSD) Online: Guatemala—Palm Oil Summary*. United States Department of Agriculture. <https://ipad.fas.usda.gov/>
- Verma, A. K., Dash, R. R., & Bhunia, P. (2012). A review on chemical coagulation/flocculation technologies for removal of colour from textile wastewaters. *Journal of Environmental Management*, 93(1), 154–168. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479711003434?via%3Dihub>
- VESTEX. (2024). *Estadísticas del sector textil y de vestuario de Guatemala*. Asociación de la Industria de Vestuario y Textiles de Guatemala. Recuperado de <https://vestex.com.gt/estadisticas/>
- Water Footprint Network. (s.f.). *Product gallery: Cotton T-shirt*. <https://waterfootprint.org/en/resources/interactive-tools/product-gallery/>
- Zollinger, H. (2004). *Color Chemistry: Syntheses, Properties, and Applications of Organic Dyes and Pigments* (3.^a ed.). Wiley-VCH.

XII. ANEXOS

A. Datos originales

Cuadro 7: Lecturas espectrofotométricas iniciales (A_0) de cada colorante a 100 mg/L, antes del proceso de adsorción

	Colorante (± 1.01 mg/L)	Lectura 1 (± 0.0005)	Lectura 2 (± 0.0005)	Lectura 3 (± 0.0005)	Lectura 4 (± 0.0005)
Datos generales	Colorante Directo 1 100mg/L	0.633	0.646	0.650	0.651
	Colorante Directo 2 100mg/L	0.621	0.621	0.633	0.62
	Colorante Directo 3 100mg/L	0.626	0.623	0.626	0.624
	Colorante Reactivo 1 100mg/L	0.704	0.707	0.705	0.708
	Colorante Reactivo 2 100mg/L	0.704	0.703	0.705	0.707
	Colorante Reactivo 3 100mg/L	0.705	0.708	0.713	0.712
	Blanco	0.000	0.000	0.000	0.000

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cada absorbancia inicial (A_0) se determinó por cuadruplicado usando un espectrofotómetro UV-Vis a 540 nm. Para cada tratamiento experimental se empleó una solución diferente de colorante, a una concentración inicial de 100 mg/L. Se utilizaron tres soluciones por tipo de colorante (directo y reactivo), etiquetadas como Colorante 1, 2 y 3, con el fin de mantener la consistencia en las mediciones de remoción de color. La distribución fue la siguiente: Colorante 1 se utilizó para hidrólisis básica y sin pretratamiento con molienda licuada; Colorante 2 para hidrólisis ácida y sin pretratamiento con molienda con mazo; y Colorante 3 para carbón activado y sin pretratamiento sin molienda. Para cada colorante se realizaron cuatro mediciones independientes de absorbancia.

Cuadro 8: Lecturas espectrofotométricas finales (A) obtenidas tras el proceso de adsorción con residuos de palma africana tratados mediante hidrólisis básica, para distintas combinaciones experimentales

	Combinación	Lectura 1 (± 0.0005)	Lectura 2 (± 0.0005)	Lectura 3 (± 0.0005)	Lectura 4 (± 0.0005)
HIDRÓLISIS BÁSICA	HBMLCD1	0.650	0.651	0.651	0.644
	HBMLCD2	0.651	0.649	0.652	0.644
	HBMLCD3	0.659	0.657	0.653	0.660
	HBMLCD4	0.662	0.660	0.651	0.650
	HBMLCR1	0.715	0.714	0.719	0.715
	HBMLCR2	0.720	0.720	0.718	0.721
	HBMLCR3	0.722	0.722	0.721	0.720
	HBMLCR4	0.728	0.728	0.728	0.727
	HBMMCD1	0.676	0.679	0.679	0.680
	HBMMCD2	0.682	0.682	0.681	0.682
	HBMMCD3	0.674	0.673	0.666	0.673
	HBMMCD4	0.673	0.672	0.671	0.672
	HBMMCR1	0.727	0.728	0.728	0.728
	HBMMCR2	0.725	0.715	0.717	0.724
	HBMMCR3	0.726	0.725	0.723	0.718
	HBMMCR4	0.729	0.728	0.725	0.729
	HBSMCD1	0.667	0.674	0.677	0.680
	HBSMCD2	0.675	0.672	0.673	0.675
	HBSMCD3	0.686	0.687	0.687	0.690
	HBSMCD4	0.662	0.661	0.661	0.660
HBSMCR1	0.702	0.724	0.722	0.712	
HBSMCR2	0.726	0.719	0.727	0.728	
HBSMCR3	0.733	0.733	0.732	0.733	
HBSMCR4	0.727	0.728	0.727	0.721	

Fuente: Elaboración propia (2025)

Las lecturas de absorbancia final (A) se realizaron mediante un espectrofotómetro UV-Vis a una longitud de onda de 540 nm, registrando cuatro mediciones independientes por combinación para evaluar la eficiencia de remoción de color. Cada combinación experimental incluyó una muestra de palma africana con un pretratamiento de hidrólisis básica, acompañado de un tipo específico de molienda (sin molienda, mazo o licuadora) y un tipo de colorante (directo o reactivo). Las muestras fueron preparadas con una

concentración inicial de 100 mg/L de colorante y 24 mg/L de adsorbente. Para cada combinación se realizaron cuatro mediciones independientes de absorbancia.

Nota: las variables empleadas en este cuadro se definen de la siguiente manera: HBMLCD (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis básica (HB) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Directo (CD)), HBMLCR (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis básica (HB) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Reactivo (CR)), HBMMCD (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis básica (HB) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Directo (CD)), HBMMCR (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis básica (HB) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Reactivo (CR)), HBSMCD (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis básica (HB) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Directo (CD)), HBSMCR (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis básica (HB) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Reactivo (CR)).

Cuadro 9: Lecturas espectrofotométricas finales (A) obtenidas tras el proceso de adsorción con residuos de palma africana tratados mediante hidrólisis ácida, para distintas combinaciones experimentales

	Combinación	Lectura 1 (± 0.0005)	Lectura 2 (± 0.0005)	Lectura 3 (± 0.0005)	Lectura 4 (± 0.0005)
HIDRÓLISIS ÁCIDA	HAMLCD1	0.154	0.168	0.165	0.166
	HAMLCD2	0.138	0.134	0.134	0.136
	HAMLCD3	0.120	0.118	0.118	0.119
	HAMLCD4	0.127	0.126	0.127	0.127
	HAMLCR1	0.427	0.428	0.427	0.426
	HAMLCR2	0.451	0.454	0.453	0.452
	HAMLCR3	0.428	0.426	0.425	0.424
	HAMLCR4	0.435	0.438	0.438	0.432
	HAMMCD1	0.158	0.162	0.191	0.158
	HAMMCD2	0.203	0.232	0.249	0.271
	HAMMCD3	0.169	0.164	0.144	0.188
	HAMMCD4	0.087	0.083	0.084	0.087
	HAMMCR1	0.162	0.162	0.164	0.162
	HAMMCR2	0.176	0.171	0.179	0.177
	HAMMCR3	0.188	0.186	0.187	0.187
	HAMMCR4	0.350	0.366	0.366	0.365
	HASMCD1	0.275	0.244	0.244	0.261
	HASMCD2	0.282	0.266	0.258	0.264
	HASMCD3	0.177	0.190	0.193	0.192
	HASMCD4	0.208	0.210	0.212	0.210
	HASMCR1	0.101	0.103	0.104	0.107
	HASMCR2	0.112	0.112	0.112	0.113
	HASMCR3	0.257	0.256	0.258	0.256
	HASMCR4	0.264	0.264	0.265	0.263

Fuente: Elaboración propia (2025)

Las lecturas de absorbancia final (A) se realizaron mediante un espectrofotómetro UV-Vis a una longitud de onda de 540 nm, registrando cuatro mediciones independientes por combinación para evaluar la eficiencia de remoción de color. Cada combinación experimental incluyó una muestra de palma africana con un pretratamiento de hidrólisis ácida, acompañado de un tipo específico de molienda (sin molienda, mazo o licuadora) y un tipo de colorante (directo o reactivo). Las muestras fueron preparadas con una

concentración inicial de 100 mg/L de colorante y 24 mg/L de adsorbente. Para cada combinación se realizaron cuatro mediciones independientes de absorbancia.

Nota: las variables empleadas en este cuadro se definen de la siguiente manera: HAMLCD (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis ácida (HA) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Directo (CD)), HAMLCR (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis ácida (HA) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Reactivo (CR)), HAMMCD (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis ácida (HA) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Directo (CD)), HAMMCR (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis ácida (HA) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Reactivo (CR)), HASMCD (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis ácida (HA) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Directo (CD)), HASMCR (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis ácida (HA) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Reactivo (CR)).

Cuadro 10: Lecturas espectrofotométricas finales (A) obtenidas tras el proceso de adsorción con carbón activado elaborado a partir de residuos de palma africana, para distintas combinaciones experimentales con colorante directo

	Combinación	Lectura 1 (± 0.0005)	Lectura 2 (± 0.0005)	Lectura 3 (± 0.0005)	Lectura 4 (± 0.0005)
CARBÓN ACTIVADO DE PALMA AFRICANA	CAMLCD1	0.428	0.410	0.425	0.426
	CAMLCD2	0.388	0.390	0.391	0.386
	CAMLCD3	0.354	0.363	0.347	0.352
	CAMLCD4	0.362	0.350	0.351	0.358
	CAMLCR1	0.355	0.354	0.373	0.371
	CAMLCR2	0.271	0.289	0.272	0.288
	CAMLCR3	0.249	0.249	0.256	0.250
	CAMLCR4	0.237	0.240	0.244	0.235
	CAMMCD1	0.313	0.321	0.316	0.317
	CAMMCD2	0.324	0.323	0.324	0.318
	CAMMCD3	0.341	0.337	0.337	0.337
	CAMMCD4	0.370	0.370	0.365	0.365
	CAMMCR1	0.282	0.286	0.292	0.294
	CAMMCR2	0.292	0.291	0.278	0.284
	CAMMCR3	0.261	0.263	0.264	0.262
	CAMMCR4	0.330	0.345	0.333	0.334
	CASMCD1	0.277	0.261	0.261	0.262
	CASMCD2	0.244	0.247	0.247	0.249
	CASMCD3	0.291	0.283	0.321	0.328
	CASMCD4	0.313	0.311	0.307	0.318
CASMCR1	0.305	0.301	0.292	0.298	
CASMCR2	0.323	0.320	0.319	0.324	
CASMCR3	0.362	0.366	0.363	0.373	
CASMCR4	0.364	0.362	0.362	0.363	

Fuente: Elaboración propia (2025)

Las lecturas de absorbancia final (A) se realizaron mediante un espectrofotómetro UV-Vis a una longitud de onda de 540 nm, registrando cuatro mediciones independientes por combinación para evaluar la eficiencia de remoción de color. Cada combinación experimental incluyó el uso de carbón activado elaborado a partir de residuos de palma africana, acompañado de un tipo específico de molienda (sin molienda, mazo o licuadora) y un tipo de colorante (directo o reactivo). Las muestras fueron preparadas con una

concentración inicial de 100 mg/L de colorante y 24 mg/L de adsorbente. Para cada combinación se realizaron cuatro mediciones independientes de absorbancia.

Nota: las variables empleadas en este cuadro se definen de la siguiente manera: CAMLCD (Combinación de Pretratamiento: Carbón activado a base de residuos de palma africana (CA) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Directo (CD)), CAMLCR (Combinación de Pretratamiento: Carbón activado a base de residuos de palma africana (CA) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Reactivo (CR)), CAMMCD (Combinación de Pretratamiento: Carbón activado a base de residuos de palma africana (CA) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Directo (CD)), CAMMCR (Combinación de Pretratamiento: Carbón activado a base de residuos de palma africana (CA) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Reactivo (CR)), CASMCD (Combinación de Pretratamiento: Carbón activado a base de residuos de palma africana (CA) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Directo (CD)), CASMCR (Combinación de Pretratamiento: Carbón activado a base de residuos de palma africana (CA) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Reactivo (CR)).

Cuadro 11: Lecturas espectrofotométricas finales (A) obtenidas tras el proceso de adsorción con residuos de palma africana sin pretratamiento, para distintas combinaciones experimentales

	Combinación	Lectura 1 (± 0.0005)	Lectura 2 (± 0.0005)	Lectura 3 (± 0.0005)	Lectura 4 (± 0.0005)
SIN PRETRATAMIENTO	SPMLCD1	0.427	0.423	0.426	0.442
	SPMLCD2	0.465	0.451	0.448	0.447
	SPMLCD3	0.431	0.430	0.436	0.429
	SPMLCD4	0.425	0.437	0.424	0.431
	SPMLCR1	0.510	0.514	0.503	0.512
	SPMLCR2	0.414	0.399	0.422	0.400
	SPMLCR3	0.467	0.500	0.467	0.495
	SPMLCR4	0.557	0.555	0.529	0.55
	SPMMCD1	0.399	0.390	0.409	0.414
	SPMMCD2	0.406	0.405	0.398	0.421
	SPMMCD3	0.416	0.418	0.415	0.415
	SPMMCD4	0.398	0.401	0.403	0.404
	SPMMCR1	0.509	0.489	0.474	0.486
	SPMMCR2	0.560	0.562	0.571	0.563
	SPMMCR3	0.552	0.543	0.540	0.545
	SPMMCR4	0.461	0.556	0.483	0.541
	SPSMCD1	0.414	0.426	0.417	0.436
	SPSMCD2	0.444	0.448	0.457	0.443
	SPSMCD3	0.429	0.435	0.438	0.438
	SPSMCD4	0.46	0.462	0.461	0.464
	SPSMCR1	0.444	0.459	0.426	0.438
	SPSMCR2	0.427	0.438	0.440	0.442
	SPSMCR3	0.484	0.487	0.490	0.478
	SPSMCR4	0.479	0.524	0.502	0.516

Fuente: Elaboración propia (2025)

Las lecturas de absorbancia final (A) se realizaron mediante un espectrofotómetro UV-Vis a una longitud de onda de 540 nm, registrando cuatro mediciones independientes por combinación para evaluar la eficiencia de remoción de color. Cada combinación experimental incluyó una muestra de residuos de palma africana sin pretratamiento, acompañado de un tipo específico de molienda (sin molienda, mazo o licuadora) y un tipo de colorante (directo o reactivo). Las muestras fueron preparadas con una concentración

inicial de 100 mg/L de colorante y 24 mg/L de adsorbente. Para cada combinación se realizaron cuatro mediciones independientes de absorbancia.

Nota: las variables empleadas en este cuadro se definen de la siguiente manera: SPMLCD = Combinación de Pretratamiento: Sin pretratamiento (SP) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Directo (CD), SPMLCR (Combinación de Pretratamiento: Sin pretratamiento (SP) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Reactivo (CR)), SPMACD (Combinación de Pretratamiento: Sin pretratamiento (SP) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Directo (CD)), SPMACR (Combinación de Pretratamiento: Sin pretratamiento (SP) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Reactivo (CR)), SPSMCD (Combinación de Pretratamiento: Sin pretratamiento (SP) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Directo (CD)), SPSMCR (Combinación de Pretratamiento: Sin pretratamiento (SP) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Reactivo (CR)).

Cuadro 12: Lecturas individuales de absorbancia obtenidas por espectrofotometría UV-Vis para la elaboración de la curva de calibración del colorante directo

Concentración de colorante (mg/L ± 0.01 mg/L)	Lectura 1 (±0.0005)	Lectura 2 (±0.0005)	Lectura 3 (±0.0005)	Lectura 4 (±0.0005)
0	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.018	0.020	0.017	0.016
5	0.051	0.051	0.050	0.050
10	0.088	0.088	0.094	0.089
20	0.187	0.187	0.186	0.183
30	0.274	0.283	0.285	0.283
40	0.354	0.355	0.355	0.354
50	0.433	0.432	0.434	0.432
60	0.487	0.488	0.489	0.489
70	0.536	0.537	0.536	0.537
80	0.578	0.579	0.577	0.579
90	0.603	0.604	0.604	0.605
100	0.628	0.626	0.627	0.623

Fuente: Elaboración propia (2025)

Las lecturas se realizaron con un espectrofotómetro UV-Vis a una longitud de onda de 540nm. Se prepararon soluciones con diferentes concentraciones de colorante (0-100 mg/L) a partir de una solución madre de 100mg/L, y para cada concentración se realizaron cuatro mediciones independientes de absorbancia.

Cuadro 13: Lecturas de absorbancia obtenidas para determinar la dosis óptima de adsorbente (HAML) en soluciones con 100 mg/L de colorante directo

Concentración de adsorbente (± 0.27)	Concentración de adsorbente en cada muestra (± 0.0003 g/mL)	Lectura 1 (± 0.0005)	Lectura 2 (± 0.0005)	Lectura 3 (± 0.0005)	Lectura 4 (± 0.0005)
0 g/L	0 g por 50 mL de sol madre (100 ± 0.01 mg/L de colorante)	0.628	0.626	0.627	0.623
2 g/L	0.1 g por 50 mL de sol madre (100 ± 0.01 mg/L de colorante)	0.627	0.633	0.634	0.634
6 g/L	0.3 g por 50 mL de sol madre (100 ± 0.01 mg/L de colorante)	0.624	0.625	0.625	0.623
12 g/L	0.6 g por 50 mL de sol madre (100 ± 0.01 mg/L de colorante)	0.403	0.386	0.381	0.376
18 g/L	0.9 g por 50 mL de sol madre (100 ± 0.01 mg/L de colorante)	0.214	0.208	0.206	0.21
24 g/L	1.2 g por 50 mL de sol madre (100 ± 0.01 mg/L de colorante)	0.171	0.168	0.162	0.174
30 g/L	1.5 g por 50 mL de sol madre (100 ± 0.01 mg/L de colorante)	0.104	0.081	0.071	0.111

Fuente: Elaboración propia (2025)

Las lecturas se realizaron con un espectrofotómetro UV-Vis con una longitud de onda de 540 nm. Se utilizó una solución madre de colorante a 100 mg/L, y a cada alícuota de 50 mL se le añadió una cantidad diferente de adsorbente, con el fin de evaluar el efecto de la concentración del sólido sobre la remoción de color. Para cada concentración de adsorbente se realizaron cuatro mediciones independientes de absorbancia.

Cuadro 14: Lecturas de absorbancia sin corrección de blanco para la construcción de la isoterma de Langmuir con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo

No.	Muestra	Concentración inicial de colorante (mg/L \pm 0.01)	Cantidad de colorante (mg \pm 0.005)	Volumen de solución (L \pm 0.0005)	Concentración Adsorbente (g/L \pm 0.27)	Cantidad de adsorbente (g en solución \pm 0.01)	Lectura 1 (\pm 0.0005)	Lectura 2 (\pm 0.0005)	Lectura 3 (\pm 0.0005)
1	1	10	0.5	0.05	18	0.9	0.017	0.016	0.015
	2	10	0.5	0.05	18	0.9	0.018	0.016	0.019
	3	10	0.5	0.05	18	0.9	0.018	0.018	0.015
2	1	20	1	0.05	18	0.9	0.028	0.027	0.027
	2	20	1	0.05	18	0.9	0.028	0.027	0.031
	3	20	1	0.05	18	0.9	0.026	0.030	0.025
3	1	30	1.5	0.05	18	0.9	0.043	0.043	0.041
	2	30	1.5	0.05	18	0.9	0.042	0.044	0.043
	3	30	1.5	0.05	18	0.9	0.041	0.040	0.043
4	1	40	2	0.05	18	0.9	0.058	0.058	0.058
	2	40	2	0.05	18	0.9	0.057	0.055	0.061
	3	40	2	0.05	18	0.9	0.055	0.057	0.056
5	1	50	2.5	0.05	18	0.9	0.068	0.071	0.069
	2	50	2.5	0.05	18	0.9	0.073	0.069	0.071
	3	50	2.5	0.05	18	0.9	0.069	0.068	0.066
6	1	60	3	0.05	18	0.9	0.084	0.081	0.082
	2	60	3	0.05	18	0.9	0.083	0.085	0.079
	3	60	3	0.05	18	0.9	0.079	0.088	0.080
7	1	70	3.5	0.05	18	0.9	0.094	0.094	0.093
	2	70	3.5	0.05	18	0.9	0.092	0.099	0.096
	3	70	3.5	0.05	18	0.9	0.096	0.096	0.093
8	1	80	4	0.05	18	0.9	0.107	0.111	0.112
	2	80	4	0.05	18	0.9	0.114	0.113	0.109
	3	80	4	0.05	18	0.9	0.106	0.118	0.109
9	1	90	4.5	0.05	18	0.9	0.129	0.128	0.124
	2	90	4.5	0.05	18	0.9	0.126	0.131	0.124
	3	90	4.5	0.05	18	0.9	0.131	0.126	0.128
10	1	100	5	0.05	18	0.9	0.144	0.147	0.145
	2	100	5	0.05	18	0.9	0.152	0.142	0.145
	3	100	5	0.05	18	0.9	0.147	0.150	0.144
0	1	0	0	0.05	18	0.9	0.006	0.007	0.006
	2	0	0	0.05	18	0.9	0.008	0.006	0.007
	3	0	0	0.05	18	0.9	0.008	0.008	0.008

Fuente: Elaboración propia (2025)

Las mediciones se realizaron con espectrofotómetro UV-Vis a una longitud de onda de 540 nm. Para cada punto de la curva de Langmuir se utilizó una concentración diferente de colorante, manteniendo constante la concentración de adsorbente (18 g/L, equivalente a 0.9

g en 50 mL de solución). Las soluciones fueron preparadas a partir de una disolución madre de 100 mg/L. Las lecturas de absorbancia no han sido corregidas con el valor del blanco, y cada concentración fue evaluada por triplicado. Para cada muestra se realizaron tres mediciones independientes de absorbancia.

Cuadro 15: Lecturas de absorbancia sin corrección de blanco para la construcción de la isoterma de Langmuir con carbón activado comercial y colorante directo

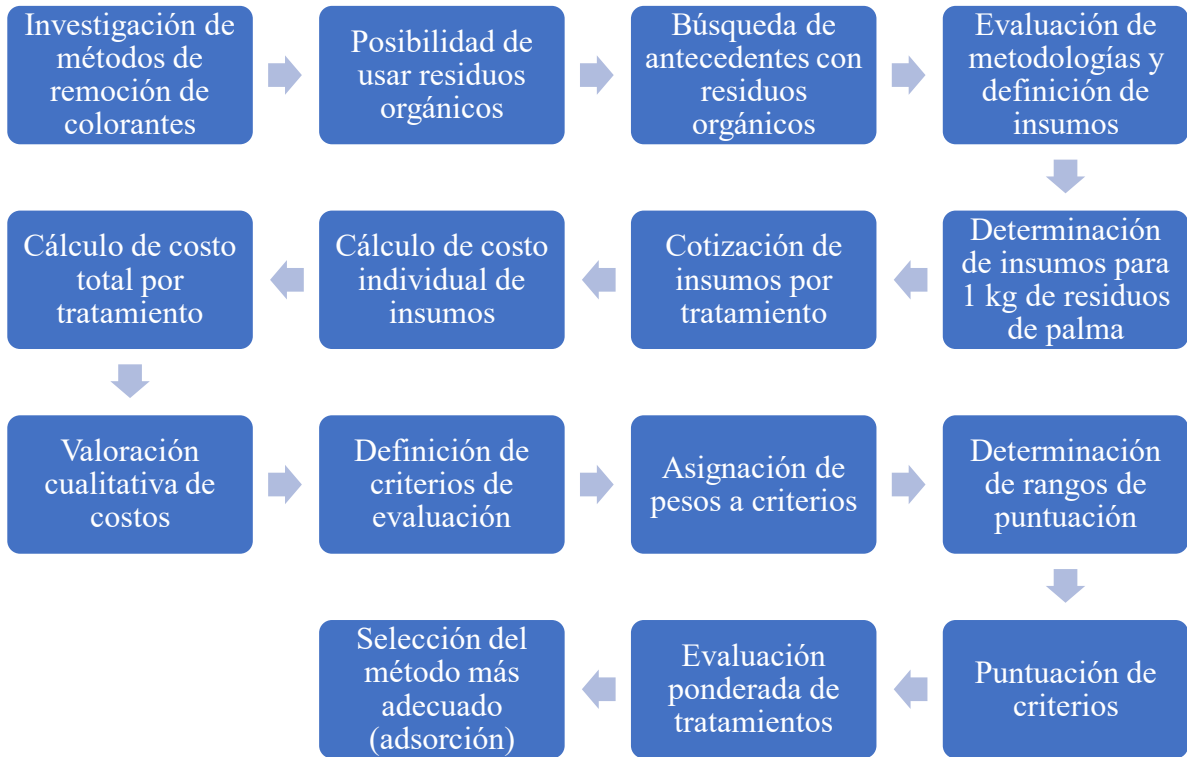
No.	Triplicado	Concentración inicial de colorante (mg/L ± 0.01)	Cantidad de colorante (mg ± 0.005)	Volumen de solución (L ± 0.0005)	Concentración Adsorbente (g/L ± 0.27)	Cantidad de adsorbente (g en solución ± 0.01)	Lectura 1 (± 0.0005)	Lectura 2 (± 0.0005)	Lectura 3 (± 0.0005)
1	1	10	0.5	0.05	18	0.9	0.077	0.076	0.079
	2	10	0.5	0.05	18	0.9	0.075	0.077	0.077
	3	10	0.5	0.05	18	0.9	0.080	0.079	0.075
2	1	20	1	0.05	18	0.9	0.110	0.113	0.113
	2	20	1	0.05	18	0.9	0.112	0.113	0.111
	3	20	1	0.05	18	0.9	0.112	0.113	0.113
3	1	30	1.5	0.05	18	0.9	0.144	0.138	0.138
	2	30	1.5	0.05	18	0.9	0.133	0.141	0.141
	3	30	1.5	0.05	18	0.9	0.138	0.138	0.135
4	1	40	2	0.05	18	0.9	0.176	0.179	0.178
	2	40	2	0.05	18	0.9	0.179	0.180	0.182
	3	40	2	0.05	18	0.9	0.180	0.184	0.178
5	1	50	2.5	0.05	18	0.9	0.220	0.222	0.223
	2	50	2.5	0.05	18	0.9	0.217	0.218	0.228
	3	50	2.5	0.05	18	0.9	0.218	0.218	0.219
6	1	60	3	0.05	18	0.9	0.274	0.273	0.276
	2	60	3	0.05	18	0.9	0.273	0.274	0.278
	3	60	3	0.05	18	0.9	0.276	0.276	0.281
7	1	70	3.5	0.05	18	0.9	0.326	0.322	0.322
	2	70	3.5	0.05	18	0.9	0.320	0.321	0.320
	3	70	3.5	0.05	18	0.9	0.321	0.323	0.327
8	1	80	4	0.05	18	0.9	0.365	0.359	0.365
	2	80	4	0.05	18	0.9	0.364	0.362	0.361
	3	80	4	0.05	18	0.9	0.360	0.360	0.362
9	1	90	4.5	0.05	18	0.9	0.428	0.432	0.431
	2	90	4.5	0.05	18	0.9	0.433	0.425	0.427
	3	90	4.5	0.05	18	0.9	0.429	0.427	0.433
10	1	100	5	0.05	18	0.9	0.507	0.508	0.506
	2	100	5	0.05	18	0.9	0.506	0.509	0.507
	3	100	5	0.05	18	0.9	0.508	0.506	0.507
0	1	0	0	0.05	18	0.9	0.053	0.058	0.058
	2	0	0	0.05	18	0.9	0.060	0.059	0.060
	3	0	0	0.05	18	0.9	0.058	0.057	0.061

Fuente: Elaboración propia (2025)

Las mediciones se realizaron con espectrofotómetro UV-Vis a una longitud de onda de 540 nm. Para cada punto de la curva de Langmuir se utilizó una concentración diferente de colorante, manteniendo constante la concentración de adsorbente (18 g/L, equivalente a 0.9 g en 50 mL de solución). Las soluciones fueron preparadas a partir de una disolución madre de 100 mg/L. Las lecturas de absorbancia no han sido corregidas con el valor del blanco, y cada concentración fue evaluada por triplicado. Para cada muestra se realizaron tres mediciones independientes de absorbancia.

B. Datos calculados

Figura 11: Diagrama de procesos del procedimiento seguido para definir el método de acondicionamiento más adecuado para los residuos de palma africana



Fuente: Elaboración propia (2025)

El diagrama resume las etapas realizadas para evaluar los métodos de remoción de colorantes utilizando residuos de palma africana. Incluye la investigación de métodos alternativos, el análisis de viabilidad con residuos orgánicos, la determinación de insumos y costos, así como la aplicación de criterios de evaluación ponderada. El proceso permitió concluir que la adsorción fue el método más eficiente bajo las condiciones analizadas.

Cuadro 16: Métodos tradicionales de remoción de color y posibilidad de sustitución con residuos orgánicos

Método tradicional de remoción	¿Qué se usa normalmente?	¿Puede sustituirse con residuos orgánicos?	Ejemplo de residuo utilizado (según antecedentes)	Tipo de tratamiento aplicado
Adsorción	Carbón activado granular o en polvo	Sí	Cáscara de naranja (Sangeetha et al., 2021) Cáscara de cacao (Hameed et al., 2007)	Carbonización, Activación, Hidrólisis ácida, Hidrólisis básica.
Coagulación-floculación	Sulfato de aluminio, cloruro férrico	Sí	Semillas de <i>Moringa oleifera</i> (Choy et al., 2014)	Extracción de proteínas coagulantes, aplicación directa
Filtración biológica	Arena, zeolitas naturales, material plástico estructurado	A veces	Cáscara de arroz como soporte microbiano (Forss et al., 2017)	Lavado, secado y molienda
Oxidación avanzada	Peróxidos, ozono, catalizadores metálicos	Difícil, pero se estudia la posibilidad	Degradación de colorantes reactivos mediante proceso Fenton heterogéneo (Kunz et al., 2002)	Carbonización + funcionalización / impregnación metálica
Biorremediación (enzimática)	Enzimas purificadas	Sí, si el residuo contiene enzimas activas	Laccasas de <i>Trametes hirsuta</i> (Abadulla et al., 2000) peroxidasa de rábano (<i>Raphanus sativus</i>) (Palmieri et al., 2001)	Producción e inmovilización en soporte sólido

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en el marco teórico y los antecedentes

En este cuadro se presentan los principales métodos tradicionales de remoción de color en aguas residuales, detallando los insumos comúnmente empleados en cada caso, la posibilidad de sustituirlos por residuos orgánicos, ejemplos documentados de materiales utilizados según los antecedentes recopilados, y el tipo de tratamiento aplicado a dichos residuos antes de su uso. La información incluida proviene del marco teórico y de los

antecedentes del presente estudio, y será utilizada como base para evaluar la viabilidad técnica de aplicar residuos de palma africana como sustituto en cada método, así como para desarrollar los análisis comparativos y matrices FODA correspondientes.

Cuadro 17: Participación del residuo orgánico en la remoción de color por método tradicional

Método tradicional de remoción	¿El residuo orgánico remueve el color de forma directa?	Mecanismo principal de remoción de color con residuo orgánico
Adsorción	Sí	Adsorción física (fuerzas de Van der Waals, interacciones hidrofóbicas) y química (enlaces covalentes, intercambio iónico) sobre la superficie del residuo modificado, como en el caso de cáscara de naranja (Sangeetha et al., 2021)
Coagulación-floculación	Sí	Neutralización de cargas y formación de flóculos mediante compuestos activos del residuo (proteínas, polifenoles, sales minerales), atrapando partículas y colorantes en suspensión, como ocurre con extractos de <i>Moringa oleifera</i> (Choy et al., 2014; Ndabigengesere & Narasiah, 1998).
Filtración biológica	No (Indirecta)	El residuo actúa únicamente como soporte para el crecimiento de biopelícula; el color se degrada principalmente por metabolismo microbiano, no por el residuo en sí, como en biofiltros con cáscara de arroz (Forss et al., 2017).
Oxidación avanzada	Sí, si es modificado	El residuo transformado en <i>biochar</i> o carbón activado modificado actúa como catalizador, activando oxidantes (H ₂ O ₂ , persulfato) para generar radicales libres que degradan directamente las moléculas de colorante, como en el proceso Fenton descrito por Kunz et al. (2002).
Biorremediación (enzimática)	Sí, si contiene enzimas activas	Las enzimas presentes en algunos residuos (laccasas, peroxidasas, etc.) rompen enlaces cromóforos del colorante, degradándolo. En residuos de palma africana, la actividad enzimática es mínima o nula, por lo que requiere inoculación externa (Abadulla et al., 2000; Palmieri et al., 2001).

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en el marco teórico y los antecedentes

Este cuadro describe la forma en que distintos métodos tradicionales de remoción de color pueden incorporar residuos orgánicos como parte activa o pasiva del proceso. Se indica si

el residuo participa de forma directa en la remoción del color y se detalla el mecanismo principal implicado en cada caso, sustentado en ejemplos documentados en el marco teórico y los antecedentes del presente trabajo.

Cuadro 18: FODA para el método de adsorción utilizando residuos orgánicos

Fortalezas	Oportunidades
<ul style="list-style-type: none"> • Se pueden utilizar materiales de bajo costo y abundantes como lo es el residuo de palma africana, con adecuaciones físicas y químicas relativamente simples (carbonización, modificación superficial) • Varios estudios como el de Sangeetha 2021 o el de Hameed 2007, demuestran que los residuos orgánicos tienen una alta eficiencia de remoción de colorantes en solución, tanto para colorantes directos como reactivos, reportando eficiencias superiores al 80%. • Tiene un procedimiento y tecnología bastante conocida y aplicada en la industria. Esto facilita su escalado • El mecanismo combina la adsorción química y física, lo que hace que se mejore la captura de diferentes tipos de moléculas de colorantes. • Permite evaluar diferentes pretratamientos para optimizar el rendimiento. • Método más versátil y efectivo para integrar residuos lignocelulósicos 	<ul style="list-style-type: none"> • Se logra aprovechar un residuo agroindustrial abundante en Guatemala, reduciendo su disposición inadecuada y generando valor agregado. • La capacidad de adsorción del adsorbente se puede optimizar mediante tratamientos químicos como la activación con ácido fosfórico o hidrólisis ácida/básica o al convertirlo en carbón activado. • Utilizar un residuo como material sostenible para un bien común
Debilidades	Amenazas
<ul style="list-style-type: none"> • Saturación de adsorbente, lo que genera un problema para la regeneración, remplazo o tratamiento del residuo una vez saturado el adsorbente. • El rendimiento depende de la correcta preparación del residuo (carbonización, activación o modificación), lo que implica costos y control técnico. • El carbón activado comercial suele ser de mayor calidad. El carbón activado hecho a partir de residuos orgánicos suele tener menor área superficial y capacidad adsorbente 	<ul style="list-style-type: none"> • Costos y limitaciones logísticas para la recolección, transporte y almacenamiento del residuo en grandes volúmenes. • Otros posibles usos para los residuos como su transformación en energía. • Existencia de materiales que presentan mayor capacidad de adsorción, más estables y reproducibles • Variabilidad en la composición y características físicas del residuo según la fuente y el proceso industrial previo. • Posible competencia de otros métodos de bajo costo (coagulación con Moringa, biorremediación)

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en el marco teórico y los antecedentes

En este cuadro se presentan las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas del método de adsorción aplicado a la remoción de color en aguas residuales, utilizando residuos orgánicos como material adsorbente. La información se basa en el marco teórico y en los antecedentes revisados, destacando aspectos técnicos, económicos y ambientales relevantes para su implementación. Este análisis permite identificar ventajas como la disponibilidad del residuo y la alta eficiencia de remoción, así como limitaciones relacionadas con la preparación del material y su comparación con carbones activados comerciales, proporcionando un panorama integral para la evaluación de su viabilidad en el contexto del presente estudio.

Cuadro 19: FODA para el método de coagulación-floculación utilizando residuos orgánicos

Fortalezas	Oportunidades
<ul style="list-style-type: none"> • Es un método de bajo requerimiento de infraestructura y es ampliamente utilizado en el tratamiento de aguas de operación sencilla. • Da la posibilidad de sustituir coagulantes químicos por coagulantes naturales. Esto para reducir la generación de lodos químicos • Estudios como el de Choy 2014, demuestra que se puede llegar a remover hasta el 80% del color. • Eficiencia para remover turbidez y color en los efluentes textiles. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se logra aprovechar subproductos agrícolas o forestales locales para la producción de coagulantes naturales • Tiene la posibilidad de combinarse con otros procesos en la remoción de color como la adsorción o filtración. Esto permitiría mejorar su eficiencia • Oportunidad en un mercado creciente en búsqueda de reemplazo de productos químicos por alternativas sostenibles en la industria textil y de tratamiento de aguas. • Potencial para reducir costos de importación de coagulantes químicos
Debilidades	Amenazas
<ul style="list-style-type: none"> • Requiere residuos con compuestos coagulantes • Los coagulantes naturales suelen tener menor vida útil y pueden requerir preparación fresca antes de su uso • Las condiciones de operación y el tipo de agua residual tienen un alto impacto en la eficiencia en la remoción de color. • Los coagulantes naturales tienen una susceptibilidad a degradación biológica. Lo que complica el almacenamiento y su transporte. • Es probable que se requiera una mayor cantidad de coagulantes naturales que de coagulantes químicos, lo que aumenta el volumen de lodos generados • No remueve completamente los colorantes solubles 	<ul style="list-style-type: none"> • Limitaciones en la disponibilidad de materia prima para producir coagulantes naturales • Otros posibles usos para la materia orgánica • Regulaciones que pueden requerir estudios adicionales de inocuidad y eficacia • Posible preferencia industrial por coagulantes químicos debido a su uniformidad, estabilidad en el tiempo y cantidad necesaria.

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en el marco teórico y los antecedentes

En este cuadro se presenta el análisis de fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas del método de coagulación–floculación utilizando residuos orgánicos como coagulantes naturales. La información se fundamenta en el marco teórico y los antecedentes del estudio, destacando su aplicabilidad en la remoción de color y turbidez, así como los beneficios ambientales y económicos derivados de la sustitución parcial o total de coagulantes

químicos. Asimismo, se señalan limitaciones técnicas y operativas, tales como la variabilidad en la eficiencia según el tipo de agua residual y la disponibilidad de materia prima, así como factores externos que podrían influir en su implementación a nivel industrial.

Cuadro 20: FODA para el método de oxidación avanzada utilizando residuos orgánicos modificados como catalizadores

Fortalezas	Oportunidades
<ul style="list-style-type: none"> • Estudios como el de Kunz 2002, demuestran una alta eficiencia en la remoción de color, incluso para colorantes complejos y resistentes a tratamientos convencionales, con valores reportados superiores al 90% • Puede llegar a tener la capacidad de convertir los colorantes en compuestos más simples o incluso mineralizados • Si se mantiene su actividad, existe la posibilidad de reutilizar el catalizador sólido varias veces. • Uso de residuos lignocelulósicos como soporte carbonoso para catalizadores metálicos, reduciendo costos frente a soportes comerciales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Potencial de aplicar residuos de palma africana como soporte catalítico, al fusionarlos con metales de transición (Fe, Cu, Mn) • Se puede llegar a combinar con otros tratamientos como procesos fisicoquímicos para alcanzar niveles de remoción más altos. • Posibilidad de generar un producto con valor agregado (catalizador recuperable) a partir de un residuo agroindustrial.
Debilidades	Amenazas
<ul style="list-style-type: none"> • Requiere modificación previa del residuo (carbonización, impregnación con metales u óxidos) para ser efectivo, lo que implica mayor costo y complejidad operativa. • Requiere una mayor demanda de control de pH, temperatura y dosificación de oxidantes para evitar ineficiencias o formación de subproductos no deseados. • Producción de residuos secundarios con contenido metálico que requieren disposición segura • Menor competitividad en costos frente a métodos más simples como adsorción o coagulación–floculación, especialmente en aplicaciones a gran escala. 	<ul style="list-style-type: none"> • Posibles restricciones para el vertido de metales residuales procedentes del catalizador. • Mercado muy competitivo con catalizadores industriales más estables y con actividad comprobada • Preferencia por métodos más tradicionales en la remoción de color de las aguas residuales de la industria textil.

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en el marco teórico y los antecedentes

En este cuadro se analizan las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas del método de oxidación avanzada aplicado a la remoción de color en aguas residuales, considerando el uso de residuos orgánicos, como la palma africana, previamente modificados para actuar como catalizadores. La información se fundamenta en el marco teórico y en los antecedentes del estudio, resaltando su alta eficiencia para degradar colorantes complejos y su potencial de integración en sistemas híbridos de tratamiento. Asimismo, se señalan limitaciones relacionadas con la necesidad de modificar el residuo.

Cuadro 21: FODA para el método de biorremediación enzimática utilizando residuos orgánicos

Fortalezas	Oportunidades
<ul style="list-style-type: none"> • Es un método natural y ambientalmente amigable que utiliza enzimas como laccasas y peroxidasas para degradar colorantes, reduciendo el uso de químicos peligrosos como lo establece Abadulla 2000. • Las enzimas tienen una alta especificidad de reacción. Esto permite degradar colorantes sin afectar excesivamente otros compuestos presentes en el agua. • Baja generación de lodos químicos en comparación con procesos fisicoquímicos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se pueden llegar a desarrollar sistemas biofiltrantes o reactores enzimáticos reutilizables. Con el propósito de mejorar la eficiencia y reducir costos a largo plazo. • Se puede integrar en etapas finales en el tratamiento de aguas residuales para la eliminación de colorantes. • Si se logra inmovilizar las enzimas, permitiría mantener su actividad por más ciclos, aumentando su viabilidad industrial. • Potencial de combinarse con otros métodos para lograr la degradación de colorantes.
Debilidades	Amenazas
<ul style="list-style-type: none"> • La mayoría de los residuos lignocelulósicos, como la palma africana, no contienen naturalmente cantidades significativas de enzimas activas para degradación de colorantes, requiriendo inoculación o adición externa de enzimas. • La actividad enzimática es susceptible a una posible inhibición por compuestos presentes en aguas residuales industriales. • Las enzimas tienen una vida útil limitada, esto implica tener reposiciones frecuentes o sistemas de inmovilización más costosos. • Es muy probable que la degradación de los colorantes sea más lenta que en procesos químicos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Costos de producción, purificación e inmovilización de enzimas que pueden limitar su aplicación a gran escala. • Alta competencia con métodos más rápidos, eficientes y robustos como la adsorción • Posibles cambios regulatorios que exijan evaluaciones adicionales de bioseguridad y disposición final de biomasa enzimáticamente activa.

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en el marco teórico y los antecedentes

En este cuadro se presentan las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas del método de biorremediación enzimática aplicado a la remoción de color en aguas residuales, considerando el uso de residuos orgánicos como potenciales fuentes o soportes para enzimas degradadoras. La información se fundamenta en el marco teórico y en los antecedentes del estudio, resaltando el carácter ambientalmente amigable del proceso y su potencial de integración con otros métodos. Se identifican, asimismo, limitaciones importantes para su aplicación con residuos de palma africana.

Nota: No se realizó un análisis FODA para el método de filtración biológica. Esto debido a que, al emplear residuos orgánicos, su contribución a la remoción de color sería únicamente indirecta. En este proceso, el residuo funcionaría principalmente como medio soporte para el crecimiento de microorganismos, mientras que la degradación del color estaría a cargo de la biopelícula formada sobre su superficie. El presente estudio se enfoca en métodos donde el residuo actúa de forma directa en la remoción de colorantes. Por esta razón se consideró más pertinente excluir la filtración biológica del análisis detallado y únicamente mencionarla en los cuadros comparativos.

Cuadro 22: Dimensionamiento de insumos por 1 kg de residuo de palma africana (fibra–cuesco) para su acondicionamiento según método de tratamiento

Tratamiento	Pretratamiento	Concentración objetivo	Relación L:S (v/m) (Reactivo: masa residuo palma)	Volumen total de solución a usar	Agua desmineralizada para preparar	Reactivo “concentrado”
Adsorción	Hidrólisis básica (HB)	10% m/v	10:1	10L de NaOH 10% m/v	10L	1,000 g NaOH
Adsorción	Hidrólisis ácida (HA)	6% v/v	30:1	30L de H2SO4 6% v/v	28.2 L	1.8L de H2SO4 concentrado
Adsorción	Carbón activado a base de residuos de palma africana	30% m/m	7:1	7.0L de H3PO4 al 30%	5.21L	1.79L de H3PO4 al 85%. Aproximadamente el 30% de los residuos se convierten en carbón activado, pero se “carboniza” después de la activación
Adsorción	Sin pretratamiento	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Coagulación-floculación	Ceniza de palma (suspensión alcalina)	5% m/v	20:1	1.4L de suspensión	1.4L	Aproximadamente ,70g de ceniza obtenida al calcinar 1kg de residuo
Filtración biológica	Biofiltro lavado/ inoculación del soporte	Inóculo 10% m/v; Nutrientes N=3mg/L y P=0.5mg/L	10:1	10.0L de mezcla de arranque	10.0L	1.0g de inóculo + 0.065 g de urea + 0.022g de KH2PO4
Oxidación avanzada	Impregnación férrica del carbón activado (FeCl ₃ ·6H ₂ O)	10% m/v (sal férrica)	2.4:1 (2.4mL por g de <i>biochar</i>)	0.85L	0.85L	85g de FeCl ₃ ·6H ₂ O Por cada kg de residuo de palma se asumen 0.35kg de <i>biochar</i>
Biorremediación Enzimática	Extracción enzimática (si el residuo trae enzimas)	N/A	10:1	10L	10L	Depende de la cantidad de enzimas que estén en los residuos

Fuente: Elaboración propia (2025) con base en el marco teórico y los antecedentes

El cuadro presenta el dimensionamiento base de los insumos requeridos para acondicionar 1 kg de residuo de palma africana (mezcla de fibra y cuesco) según el método de remoción

de color en el que se pretende utilizar. Para cada tratamiento se indica el tipo de pretratamiento aplicado al residuo, la concentración objetivo del reactivo principal, la relación líquido: sólido (L:S) empleada, el volumen total de solución a preparar, el volumen de agua destilada necesario y la cantidad correspondiente de reactivo concentrado. Las cantidades están basadas en antecedentes documentados en la literatura científica y se ajustan a condiciones operativas comunes. Se considera, por ejemplo, un rendimiento aproximado del 30% en la producción de carbón activado, una conversión de 7% a ceniza tras calcinación, y una producción estimada de 0.35 kg de *biochar* por cada kilogramo de residuo seco. En el caso del tratamiento enzimático, se contempla la posibilidad hipotética de que el residuo contenga enzimas activas, por lo que las cantidades de reactivos dependerán del nivel real de actividad enzimática. Las cantidades listadas son referenciales y escalables y sirven como base para estimaciones de costo o preparación a nivel de laboratorio.

Cuadro 23: Estimación de costos de insumos para el acondicionamiento de 1 kg de residuo de palma africana (fibra–cuesco) según método de tratamiento

Tratamiento	Pretratamiento	Precio del reactivo, según cotización	Cantidad de reactivo necesaria	Costo del insumo necesario	Costo total de los insumos (GTQ)
Adsorción	Hidrólisis básica (HB) (NaOH) y agua desmineralizada	NaOH: GTQ 428.00 por 500g de NaOH Agua desmineralizada: GTQ 22.00 por garrafón (18.9L)	1000g NaOH y 10L de agua desmineralizada	NaOH: 856.00 GTQ Agua: 11.64 GTQ	867.64 GTQ \$ 113.27
Adsorción	Hidrólisis ácida (HA) (H2SO4) y agua desmineralizada	H2SO4: GTQ 451.00 por 0.5L de H2SO4 Agua desmineralizada: GTQ 22.00 por garrafón (18.9L)	1.8L H2SO4 y 28.2L de agua desmineralizada	H2SO4: 1623.60 GTQ Agua: 32.83 GTQ	1656.43 GTQ \$ 216.24
Adsorción	Carbón activado a base de residuos de palma africana (H3PO4 al 85%) y agua desmineralizada	H3PO4: GTQ 766.00 por 0.50L de H3PO4 Agua desmineralizada: GTQ 22.00 por garrafón (18.9L)	1.79L H3PO4 y 5.21L de agua desmineralizada	H3PO4: 2742.28 GTQ Agua: 6.06 GTQ	2748.35 GTQ \$ 358.79
Adsorción	Sin pretratamiento	N/A	N/A	N/A	0.00 GTQ \$ 0.00
Coagulación - floculación	Ceniza de palma (Suspensión alcalina)	Agua desmineralizada: GTQ 22.00 por garrafón (18.9L)	1.4L de agua desmineralizada	Agua: 1.63 GTQ	1.63 GTQ \$ 0.21
Filtración biológica	Biofiltro lavado/ inoculación del soporte	Inóculo (Versity Bacillus Blend): 33.81 USD (Aprox, 259.10 GTQ) por 2 onzas (56.70 gramos) Agua desmineralizada: GTQ 22.00 por garrafón (18.9L) Urea: GTQ 854.00 por 500g de urea KH2PO4: GTQ 396.00 por 250g de KH2PO4	1.00g de Inóculo, 0.065g de urea, 0.022g de KH2PO4 y 10L de agua desmineralizada	Inóculo: 4.57 GTQ Urea: 0.11 GTQ KH2PO4: 0.03GTQ Agua: 11.64 GTQ	16.36 GTQ \$ 2.14
Oxidación avanzada	Impregnación férrica del <i>biochar</i> (Carbón Activado) (FeCl ₃ ·6H ₂ O)	Carbón activado a base de palma africana: GTQ 2748.35 por kg Agua desmineralizada: GTQ 22.00 por garrafón (18.9L) FeCl ₃ : GTQ 707.00 por 500g de FeCl ₃	1 kg de <i>biochar</i> o carbón activado a base de residuos de palma africana, 85g de FeCl ₃ y 0.85L de agua desmineralizada	<i>Biochar</i> : 2748.35 GTQ FeCl ₃ : 120.19 GTQ Agua: 0.99 GTQ	2,869.52 GTQ \$ 364.61
Biorremediación enzimática	Extracción enzimática (si el residuo trae enzimas)	Agua desmineralizada: GTQ 22.00 por garrafón (18.9L)	10L de agua desmineralizada	Agua: 11.64 GTQ	11.64 GTQ \$ 1.52

Fuente: Elaboración propia (2025), con base a las cotizaciones y al Cuadro 22.

El cuadro muestra la estimación de costos de los insumos necesarios para acondicionar 1 kg de residuo de palma africana (fibra–cuesco) en función del método de tratamiento en el que se utilice. Se incluyen los precios de referencia obtenidos a partir de cotizaciones de proveedores locales y páginas oficiales de venta, indicando la cantidad requerida de cada reactivo, su costo unitario y el costo total de los insumos para cada tratamiento. En los cálculos se consideraron rendimientos característicos del proceso, tales como la conversión aproximada del 30% del residuo en carbón activado y la obtención de 0.35 kg de *biochar* por kilogramo de residuo seco. Para el caso del biofiltro, se utilizó como referencia un producto comercial a base de bacterias del género *Bacillus* (Versity Bacillus Blend) para representar el costo de inoculación inicial. Los valores presentados son referenciales y escalables y permiten comparar la viabilidad económica relativa de cada tratamiento a nivel de laboratorio.

Nota: Es importante destacar que no se incluyó el costo de la materia prima (residuo de palma africana), ya que es común a todos los tratamientos, ni tampoco se consideraron costos logísticos como transporte, almacenamiento, mano de obra o equipos, que pueden variar según la escala del sistema. Por tanto, los valores presentados deben interpretarse como una base comparativa de insumos químicos y auxiliares requeridos por cada tratamiento a nivel de laboratorio. Se determinó el cambio de dólares a quetzales de 7.66 GTQ por 1 USD.

Cuadro 24: Valoración comparativa del costo de insumos por tratamiento, a partir del acondicionamiento de residuos de palma africana

Tratamiento	Costo de los insumos	Valoración de los costos	Observaciones
Adsorción	Desde GTQ 0.00 hasta GTQ 2748.35 \$ 0.00 hasta \$ 358.79	Muy baja - Alta	Debido a que se evaluaron distintos pretratamientos (sin tratamiento, hidrólisis básica o ácida, activación química), los costos asociados al uso de residuos para adsorción pueden variar significativamente, desde opciones de muy bajo costo hasta procesos de transformación más costosos como el carbón activado.
Coagulación-floculación	GTQ 1.63 \$ 0.21	Muy baja	El costo de este tratamiento es bajo porque solo se requiere transformar el residuo en ceniza, aunque esto implica una pérdida parcial de masa durante la calcinación.
Filtración biológica	GTQ 16.36 \$ 2.14	Muy baja	El costo de los insumos es muy bajo, ya que el residuo se utiliza sin modificación estructural, únicamente como soporte microbiano, y los aditivos consisten en pequeñas dosis de nutrientes y un inóculo comercial.
Oxidación avanzada	GTQ 2869.52 \$ 374.61	Muy alta	Este tratamiento tiene el costo más alto, ya que incluye la transformación del residuo en <i>biochar</i> o carbón activado, seguida de una impregnación férrica, lo que requiere reactivos adicionales como FeCl ₃
Biorremediación enzimática	GTQ 11.64 \$ 1.52	Muy baja	El costo de los insumos es muy bajo porque se asume que el residuo contiene enzimas activas de forma natural. Sin embargo, si esto no se confirma experimentalmente, sería necesario inocular enzimas purificadas, lo que incrementaría considerablemente el costo.

Fuente: Elaboración propia (2025)

El cuadro presenta una valoración cualitativa del costo de los insumos necesarios para acondicionar 1 kg de residuo de palma africana (fibra–cuesco) según el tipo de tratamiento al que se destine. La columna de “Costo de los insumos” se basa en los valores detallados en el Cuadro 23, en el cual se desglosa el precio por reactivo, la cantidad necesaria, y el

costo total por tratamiento. La valoración de los costos se realizó con base en una escala relativa, tomando como referencia el método más económico (coagulación-floculación = GTQ 1.63). Se establecieron rangos comparativos en múltiplos de este valor: Muy baja (< 100 veces), Baja (100–500 veces), Alta (500–1000 veces) y Muy alta (> 1000 veces). De esta forma, los métodos se clasificaron de manera objetiva según la magnitud de sus insumos. En el caso de la adsorción, la valoración abarca desde muy baja hasta muy alta, ya que el costo depende del tipo de pretratamiento aplicado al residuo (sin tratamiento, hidrólisis, activación, etc.). Se determinó el cambio de dólares a quetzales de 7.66 GTQ por 1 USD.

Cuadro 25: Caracterización de los residuos de palma africana utilizados en el estudio

Parámetro	Resultado	Observaciones generales
País de origen	Guatemala	Residuos de palma africana sembrados en Guatemala
Ubicación de donde se obtuvo la materia prima.	Municipio: Livingstone Departamento: Izabal	Las frutas vienen del departamento de Izabal, Petén y parte de Honduras.
Variedad de palma africana	No se puede determinar	No se puede determinar la variedad de palma africana ya que en las fincas hay muchas variedades y para el procesamiento de los frutos es irrelevante la variedad.
Origen de residuo	Mezcla de fibra de mesocarpio y cuesco molido	Recolectado posterior a la extracción total de aceite
Estado físico	Sólido seco, sin tratamiento previo	No se realizó limpieza ni tamizado previo a la molienda
Porcentaje de humedad	4.3%	Los residuos estaban y se sentían muy secos
pH	4.92 de los residuos	Residuos levemente ácidos
Porcentaje retención promedio en tamiz #20 (0.85 mm)	74.83%	Fracción mayoritaria, tamaño grueso. Mucha fibra
Distribución de tamaño de partícula	Mayoritaria entre 0.85 y 0.60 mm	74.83% retenido en malla No. 20; 10.33% en malla No. 30
Fracción fina (< 0.25 mm)	Menor al 1%	Solo 0.5% pasó malla No. 100
Diámetro efectivo (D_{10})	0.458 mm	Calculado por interpolación
Diámetro D_{30}	0.967 mm (estimado)	No interpolable, extrapolación
Diámetro D_{60}	2.72 mm (estimado)	No interpolable, extrapolación
Coefficiente de uniformidad (C_u)	5.94	Moderada heterogeneidad granulométrica
Coefficiente de curvatura (C_c)	0.75	Buena gradación; distribución balanceada.

Fuente: Elaboración propia (2025)

Este cuadro presenta la caracterización general de los residuos de palma africana utilizados en el estudio, los cuales consisten en una mezcla de fibra de mesocarpio y cuesco molido recolectados tras la extracción del aceite. Se incluyen parámetros físicos como el pH, tamaño de partícula y distribución granulométrica, calculados a partir de ensayos de tamizado. También se estimaron los coeficientes de uniformidad y curvatura para evaluar

la heterogeneidad del material. Esta caracterización permite conocer las propiedades iniciales del residuo antes de ser sometido a los tratamientos de acondicionamiento.

Cuadro 26: Criterios de evaluación para la comparación de métodos de remoción de color y su viabilidad de uso con residuos de palma africana

Criterio evaluado	Peso (%)	Rango de puntuación
Eficiencia en la remoción de color	25%	0 = baja, 1 = media, 2 = media-alta, 3 = alta
Aplicabilidad industrial	25%	0 = baja, 1 = media, 2 = media-alta, 3 = alta
Valoración de los costos relativos de los insumos	10%	0 = muy alto, 1 = alto, 2 = medio, 3 = bajo
Viabilidad de uso de residuos de palma africana	40%	0 = no, 1 = limitada, 2 = sí, 3 = sí con facilidad
Total	100%	Mejor nota posible= 3

Fuente: Elaboración propia (2025)

Este cuadro presenta el sistema de valoración diseñado para comparar los diferentes métodos de remoción de color, con base en cuatro criterios clave: eficiencia de remoción, aplicabilidad industrial, costos relativos de los insumos y viabilidad de uso de residuos de palma africana. A cada criterio se le asignó un peso porcentual según su relevancia para los objetivos del estudio. Se otorgó un mayor peso (40%) a la viabilidad de uso de residuos de palma africana, debido a que este fue el enfoque principal de la investigación. La eficiencia de remoción y la aplicabilidad industrial recibieron un peso intermedio (25% cada uno), ya que ambos criterios influyen de manera significativa en la efectividad y posibilidad de implementación de los métodos. Por último, se asignó un peso menor (10%) a los costos relativos de los insumos, ya que se consideró que este factor puede variar según la escala, ubicación y disponibilidad local, y además no siempre define la viabilidad técnica de una alternativa. El sistema de puntuación asigna valores del 0 al 3 a cada criterio, siendo 3 la puntuación más favorable.

Cuadro 27: Porcentaje de remoción de color obtenido para las combinaciones con pretratamiento de hidrólisis básica

	Combinación	% (m/m) de remoción Lectura 1 ($\pm 0.13\%$)	% (m/m) de remoción Lectura 2 ($\pm 0.13\%$)	% (m/m) de remoción Lectura 3 ($\pm 0.13\%$)	% (m/m) de remoción Lectura 4 ($\pm 0.13\%$)	% (m/m) de remoción promedio ($\pm 0.26\%$)	% (m/m) de remoción promedio ($\pm 0.52\%$)
HIDRÓLISIS BÁSICA	HBMLCD1	-2.69%	-0.77%	-0.15%	1.08%	-0.63%	-1.22%
	HBMLCD2	-2.84%	-0.46%	-0.31%	1.08%	-0.64%	
	HBMLCD3	-4.11%	-1.70%	-0.46%	-1.38%	-1.91%	
	HBMLCD4	-4.58%	-2.17%	-0.15%	0.15%	-1.69%	
	HBMLCR1	-1.56%	-0.99%	-1.99%	-0.99%	-1.38%	-2.14%
	HBMLCR2	-2.27%	-1.84%	-1.84%	-1.84%	-1.95%	
	HBMLCR3	-2.56%	-2.12%	-2.27%	-1.69%	-2.16%	
	HBMLCR4	-3.41%	-2.97%	-3.26%	-2.68%	-3.08%	
	HBMMCD1	-6.79%	-5.11%	-4.46%	-4.45%	-5.20%	-4.81%
	HBMMCD2	-7.74%	-5.57%	-4.77%	-4.76%	-5.71%	
	HBMMCD3	-6.48%	-4.18%	-2.46%	-3.38%	-4.12%	
	HBMMCD4	-6.32%	-4.02%	-3.23%	-3.23%	-4.20%	
	HBMMCR1	-3.27%	-2.97%	-3.26%	-2.82%	-3.08%	-2.65%
	HBMMCR2	-2.98%	-1.13%	-1.70%	-2.26%	-2.02%	
	HBMMCR3	-3.13%	-2.55%	-2.55%	-1.41%	-2.41%	
	HBMMCR4	-3.55%	-2.97%	-2.84%	-2.97%	-3.08%	
	HBSMCD1	-5.37%	-4.33%	-4.15%	-4.45%	-4.58%	-4.54%
	HBSMCD2	-6.64%	-4.02%	-3.54%	-3.69%	-4.47%	
	HBSMCD3	-8.37%	-6.35%	-5.69%	-5.99%	-6.60%	
	HBSMCD4	-4.58%	-2.32%	-1.69%	-1.38%	-2.49%	
HBSMCR1	0.28%	-2.40%	-2.41%	-0.56%	-1.27%	-2.64%	
HBSMCR2	-3.13%	-1.70%	-3.12%	-2.82%	-2.69%		
HBSMCR3	-4.12%	-3.68%	-3.83%	-3.53%	-3.79%		
HBSMCR4	-3.27%	-2.97%	-3.12%	-1.84%	-2.80%		

Fuente: Elaboración propia (2025)

Este cuadro presenta los porcentajes de remoción de color obtenidos en las combinaciones que incluyeron el pretratamiento de hidrólisis básica, calculados a partir de las cuatro lecturas espectrofotométricas independientes realizadas para cada muestra. Los valores de absorbancia inicial (A_0) y final (A) utilizados para este cuadro se encuentran en el Cuadro 7 y en el Cuadro 9, en la sección de datos originales. En todos los casos se empleó el

Colorante 1, tanto en su forma directa como reactiva, siguiendo la distribución experimental previamente establecida.

Nota: las variables empleadas en este cuadro se definen de la siguiente manera: HBMLCD (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis básica (HB) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Directo (CD)), HBMLCR (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis básica (HB) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Reactivo (CR)), HBMMCD (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis básica (HB) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Directo (CD)), HBMMCR (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis básica (HB) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Reactivo (CR)), HBSMCD (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis básica (HB) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Directo (CD)), HBSMCR (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis básica (HB) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Reactivo (CR)).

Cuadro 28: Porcentaje de remoción de color obtenido para las combinaciones con pretratamiento de hidrólisis ácida

	Combinación	% (m/m) de remoción Lectura 1 ($\pm 0.13\%$)	% (m/m) de remoción Lectura 2 ($\pm 0.13\%$)	% (m/m) de remoción Lectura 3 ($\pm 0.13\%$)	% (m/m) de remoción Lectura 4 ($\pm 0.13\%$)	% (m/m) de remoción promedio ($\pm 0.26\%$)	% (m/m) de remoción promedio ($\pm 0.52\%$)
HIDRÓLISIS ÁCIDA	HAMLCD1	75.20%	72.95%	73.93%	73.23%	73.83%	78.18%
	HAMLCD2	77.78%	78.42%	78.83%	78.06%	78.27%	
	HAMLCD3	80.68%	81.00%	81.36%	80.81%	80.96%	
	HAMLCD4	79.55%	79.71%	79.94%	79.52%	79.68%	
	HAMLCR1	39.35%	39.12%	39.43%	39.75%	39.41%	38.24%
	HAMLCR2	35.94%	35.42%	35.74%	36.07%	35.79%	
	HAMLCR3	39.20%	39.40%	39.72%	40.03%	39.59%	
	HAMLCR4	38.21%	37.70%	37.87%	38.90%	38.17%	
	HAMMCD1	74.56%	73.91%	69.83%	74.52%	73.20%	73.65%
	HAMMCD2	67.31%	62.64%	60.66%	56.29%	61.73%	
	HAMMCD3	72.79%	73.59%	77.25%	69.68%	73.33%	
	HAMMCD4	85.99%	86.63%	86.73%	85.97%	86.33%	
	HAMMCR1	76.99%	76.96%	76.74%	77.09%	76.94%	68.54%
	HAMMCR2	75.00%	75.68%	74.61%	74.96%	75.06%	
	HAMMCR3	73.30%	73.54%	73.48%	73.55%	73.47%	
	HAMMCR4	50.28%	47.94%	48.09%	48.37%	48.67%	
	HASMCD1	55.72%	60.71%	61.45%	57.90%	58.95%	63.06%
	HASMCD2	54.59%	57.17%	59.24%	57.42%	57.10%	
	HASMCD3	71.50%	69.40%	69.51%	69.03%	69.86%	
	HASMCD4	66.51%	66.18%	66.51%	66.13%	66.33%	
HASMCR1	85.65%	85.35%	85.25%	84.87%	85.28%	73.86%	
HASMCR2	84.09%	84.07%	84.11%	84.02%	84.07%		
HASMCR3	63.49%	63.58%	63.40%	63.79%	63.57%		
HASMCR4	62.50%	62.45%	62.41%	62.80%	62.54%		

Fuente: Elaboración propia (2025)

Este cuadro presenta los porcentajes de remoción de color obtenidos en las combinaciones que incluyeron el pretratamiento de hidrólisis ácida, calculados a partir de las cuatro lecturas espectrofotométricas independientes realizadas para cada muestra. Los valores de absorbancia inicial (A_0) y final (A) utilizados para este cálculo se encuentran en el Cuadro 7 y en el Cuadro 9, en la sección de datos originales. En todos los casos se empleó el

Colorante 2, tanto en su forma directa como reactiva, siguiendo la distribución experimental previamente establecida.

Nota: las variables empleadas en este cuadro se definen de la siguiente manera: HAMLCD (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis ácida (HA) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Directo (CD)), HAMLCR (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis ácida (HA) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Reactivo (CR)), HAMMCD (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis ácida (HA) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Directo (CD)), HAMMCR (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis ácida (HA) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Reactivo (CR)), HASMCD (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis ácida (HA) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Directo (CD)), HASMCR (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis ácida (HA) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Reactivo (CR)).

Cuadro 29: Porcentaje de remoción de color obtenido para las combinaciones con pretratamiento de carbón activado a base de palma africana

	Combinación	% (m/m) de remoción Lectura 1 ($\pm 0.13\%$)	% (m/m) de remoción Lectura 2 ($\pm 0.13\%$)	% (m/m) de remoción Lectura 3 ($\pm 0.13\%$)	% (m/m) de remoción Lectura 4 ($\pm 0.13\%$)	% (m/m) de remoción promedio ($\pm 0.26\%$)	% (m/m) de remoción promedio ($\pm 0.52\%$)
CARBÓN ACTIVADO DE PALMA AFRICANA	CAMLCD1	31.63%	34.19%	32.11%	31.73%	32.41%	39.17%
	CAMLCD2	38.02%	37.40%	37.54%	38.14%	37.77%	
	CAMLCD3	43.45%	41.73%	44.57%	43.59%	43.34%	
	CAMLCD4	42.17%	43.82%	43.93%	42.63%	43.14%	
	CAMLCR1	49.65%	50.00%	47.69%	47.89%	48.81%	60.07%
	CAMLCR2	61.56%	59.18%	61.85%	59.55%	60.54%	
	CAMLCR3	64.68%	64.83%	64.10%	64.89%	64.62%	
	CAMLCR4	66.38%	66.10%	65.78%	66.99%	66.31%	
	CAMMCD1	50.00%	48.48%	49.52%	49.20%	49.30%	46.20%
	CAMMCD2	48.24%	48.15%	48.24%	49.04%	48.42%	
	CAMMCD3	45.53%	45.91%	46.17%	45.99%	45.90%	
	CAMMCD4	40.89%	40.61%	41.69%	41.51%	41.18%	
	CAMMCR1	60.00%	59.60%	59.05%	58.71%	59.34%	58.68%
	CAMMCR2	58.58%	58.90%	61.01%	60.11%	59.65%	
	CAMMCR3	62.98%	62.85%	62.97%	63.20%	63.00%	
	CAMMCR4	53.19%	51.27%	53.30%	53.09%	52.71%	
	CASMCD1	55.75%	58.11%	58.31%	58.01%	57.54%	54.78%
	CASMCD2	61.02%	60.35%	60.54%	60.10%	60.50%	
	CASMCD3	53.51%	54.57%	48.72%	47.44%	51.06%	
	CASMCD4	50.00%	50.08%	50.96%	49.04%	50.02%	
CASMCR1	56.74%	57.49%	59.05%	58.15%	57.85%	52.46%	
CASMCR2	54.18%	54.80%	55.26%	54.49%	54.69%		
CASMCR3	48.65%	48.31%	49.09%	47.61%	48.41%		
CASMCR4	48.37%	48.87%	49.23%	49.02%	48.87%		

Fuente: Elaboración propia (2025)

Este cuadro presenta los porcentajes de remoción de color obtenidos en las combinaciones que incluyeron el tratamiento con carbón activado hecho a partir de residuos de palma africana, calculados a partir de las cuatro lecturas espectrofotométricas independientes realizadas para cada muestra. Los valores de absorbancia inicial (A_0) y final (A) utilizados para este cálculo se encuentran en el Cuadro 7 y en el Cuadro 10, en la sección de datos

originales. En todos los casos se empleó el Colorante 3, tanto en su forma directa como reactiva, siguiendo la distribución experimental previamente establecida.

Nota: las variables empleadas en este cuadro se definen de la siguiente manera: CAMLCD (Combinación de Pretratamiento: Carbón activado a base de residuos de palma africana (CA) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Directo (CD)), CAMLCR (Combinación de Pretratamiento: Carbón activado a base de residuos de palma africana (CA) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Reactivo (CR)), CAMMCD (Combinación de Pretratamiento: Carbón activado a base de residuos de palma africana (CA) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Directo (CD)), CAMMCR (Combinación de Pretratamiento: Carbón activado a base de residuos de palma africana (CA) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Reactivo (CR)), CASMCD (Combinación de Pretratamiento: Carbón activado a base de residuos de palma africana (CA) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Directo (CD)), CASMCR (Combinación de Pretratamiento: Carbón activado a base de residuos de palma africana (CA) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Reactivo (CR)).

Cuadro 30: Porcentaje de remoción de color obtenido para las combinaciones sin pretratamiento

	Combinación	% (m/m) de remoción Lectura 1 ($\pm 0.13\%$)	% (m/m) de remoción Lectura 2 ($\pm 0.13\%$)	% (m/m) de remoción Lectura 3 ($\pm 0.13\%$)	% (m/m) de remoción Lectura 4 ($\pm 0.13\%$)	% (m/m) de remoción promedio ($\pm 0.26\%$)	% (m/m) de remoción promedio ($\pm 0.52\%$)
SIN PRETRATAMIENTO	SPMLCD1	32.54%	34.52%	34.46%	32.10%	33.41%	32.43%
	SPMLCD2	26.54%	30.19%	31.08%	31.34%	29.78%	
	SPMLCD3	31.91%	33.44%	32.92%	34.10%	33.09%	
	SPMLCD4	32.86%	32.35%	34.77%	33.79%	33.44%	
	SPMLCR1	27.56%	27.30%	28.65%	27.68%	27.80%	31.00%
	SPMLCR2	41.19%	43.56%	40.14%	43.50%	42.10%	
	SPMLCR3	33.66%	29.28%	33.76%	30.08%	31.70%	
	SPMLCR4	20.88%	21.50%	24.96%	22.32%	22.42%	
	SPMMCD1	35.75%	37.20%	35.39%	33.23%	35.39%	34.74%
	SPMMCD2	34.62%	34.78%	37.12%	32.10%	34.66%	
	SPMMCD3	33.01%	32.69%	34.44%	33.06%	33.30%	
	SPMMCD4	35.91%	35.43%	36.33%	34.84%	35.63%	
	SPMMCR1	27.70%	30.44%	32.77%	31.26%	30.54%	25.19%
	SPMMCR2	20.45%	20.06%	19.01%	20.37%	19.97%	
	SPMMCR3	21.59%	22.76%	23.40%	22.91%	22.67%	
	SPMMCR4	34.52%	20.91%	31.49%	23.48%	27.60%	
	SPSMCD1	33.87%	31.62%	33.39%	30.13%	32.25%	29.25%
	SPSMCD2	29.07%	28.09%	27.00%	29.01%	28.29%	
	SPSMCD3	31.47%	30.18%	30.03%	29.81%	30.37%	
	SPSMCD4	26.52%	25.84%	26.36%	25.64%	26.09%	
SPSMCR1	37.02%	35.17%	40.25%	38.48%	37.73%	34.16%	
SPSMCR2	39.43%	38.14%	38.29%	37.92%	38.44%		
SPSMCR3	31.35%	31.21%	31.28%	32.87%	31.68%		
SPSMCR4	32.06%	25.99%	29.59%	27.53%	28.79%		

Fuente: Elaboración propia (2025)

Este cuadro presenta los porcentajes de remoción de color obtenidos en las combinaciones que no incluyeron ningún pretratamiento sobre el residuo de palma africana, calculados a partir de las cuatro lecturas espectrofotométricas independientes realizadas para cada muestra. Los valores de absorbancia inicial (A_0) y final (A) utilizados para el cálculo se encuentran en el Cuadro 7 y en el Cuadro 11, en la sección de datos originales. El colorante tanto, directo como reactivo, empleado en cada combinación varió según el tipo de corte

aplicado: Colorante 1 para molienda licuada, Colorante 2 para molienda con mazo y Colorante 3 para muestras sin molienda, siguiendo la distribución indicada previamente.

Nota: las variables empleadas en este cuadro se definen de la siguiente manera: SPMLCD = Combinación de Pretratamiento: Sin pretratamiento (SP) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Directo (CD), SPMLCR (Combinación de Pretratamiento: Sin pretratamiento (SP) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Reactivo (CR)), SPMACD (Combinación de Pretratamiento: Sin pretratamiento (SP) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Directo (CD)), SPMACR (Combinación de Pretratamiento: Sin pretratamiento (SP) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Reactivo (CR)), SPSMCD (Combinación de Pretratamiento: Sin pretratamiento (SP) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Directo (CD)), SPSMCR (Combinación de Pretratamiento: Sin pretratamiento (SP) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Reactivo (CR)).

Cuadro 31: Estadísticos descriptivos generales de la remoción de color considerando todas las combinaciones experimentales (n = 384)

Todas las combinaciones (% m/m \pm 2.53%)	
No. De lecturas	384
Media de remoción	36.49%
Desviación estándar	27.59%
Remoción mínima	-8.37%
Remoción máxima	86.73%
Q1	5.56%
Q2 (Mediana)	37.62%
Q3	59.01%
Q4	86.73%
IC 95% Inferior	33.72%
IC 95% Superior	39.25%

Fuente: Elaboración propia (2025)

El cuadro presenta los estadísticos descriptivos de la remoción de color considerando el total de lecturas experimentales (n = 384). Se muestran la media, la mediana, los valores mínimo y máximo, así como la desviación estándar, los cuartiles y el intervalo de confianza al 95% (IC). Estos valores permiten caracterizar el comportamiento global del sistema, mostrando tanto la tendencia central como la dispersión de los datos. Para elaborar este cuadro se utilizaron los datos de los Cuadros 27, 28, 29 y 30.

Nota: las variables empleadas en este cuadro se definen de la siguiente manera: Q1 (Cuartil 1), Q2 (Cuartil 2 o mediana), Q3 (Cuartil 3), Q4 (Cuartil 4), IC (Intervalo de confianza).

Cuadro 32: Estadísticos descriptivos de la remoción de color (% m/m) para cada nivel experimental

Factor	Pretratamiento (% m/m \pm 1.26%)				Molienda (% m/m \pm 1.46%)			Colorante (% m/m \pm 1.79%)	
	HB	HA	CA	SP	ML	MM	SM	CD	CR
No. De lecturas	96	96	96	96	128	128	128	192	192
Media de remoción	-3.00%	65.92%	51.89%	31.13%	34.47%	37.44%	37.55%	36.74%	36.23%
Desviación estándar	1.83%	15.50%	8.68%	5.41%	26.02%	28.89%	27.88%	27.97%	27.27%
Remoción mínima	-8.37%	35.42%	31.63%	19.01%	-4.58%	-7.74%	-8.37%	-8.37%	-4.12%
Remoción máxima	1.08%	86.73%	66.99%	43.56%	81.36%	86.73%	85.65%	86.73%	85.65%
Q1	-4.05%	57.36%	47.12%	27.65%	15.93%	13.97%	19.30%	19.50%	14.33%
Q2 (Mediana)	-2.97%	69.75%	50.04%	31.77%	35.09%	38.90%	43.84%	35.83%	38.39%
Q3	-1.84%	77.38%	59.08%	34.52%	45.35%	60.25%	58.49%	58.04%	59.08%
Q4	1.08%	86.73%	66.99%	43.56%	81.36%	86.73%	85.65%	86.73%	85.65%
Intervalo de confianza 95% inferior	-3.37%	62.78%	50.13%	30.03%	29.92%	32.39%	32.67%	32.76%	32.35%
Intervalo de confianza 95% superior	-2.63%	69.06%	53.65%	32.23%	39.02%	42.50%	42.43%	40.72%	40.11%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Los valores corresponden al porcentaje de remoción de color obtenido en cada combinación experimental. Se presentan la media, desviación estándar, valores mínimos y máximos, cuartiles y el intervalo de confianza al 95%. Para elaborar este cuadro se utilizaron los datos de los Cuadros 27, 28, 29 y 30.

Nota: las variables empleadas en este cuadro se definen de la siguiente manera: Q1 (Cuartil 1), Q2 (Cuartil 2 o mediana), Q3 (Cuartil 3), Q4 (Cuartil 4), HB (Pretratamiento de una hidrólisis básica a los residuos de palma africana), HA (Pretratamiento de una hidrólisis ácida a los residuos de palma africana), CA (Pretratamiento de realizar carbón activado a base de los residuos de palma africana), SP (Residuos de palma africana que no recibieron ningún pretratamiento), ML (Molienda con licuadora/procesadora de alimentos), MM (Molienda manual con mazo), SM (Sin molienda), CD (Colorante directo) y CR (Colorante reactivo)).

Cuadro 33: Análisis de varianza (ANOVA) para los factores y sus interacciones en la remoción de color

Factor	Df (Grados de libertad)	Sum Sq (Suma de cuadrados del factor)	Mean Sq (Cuadrado medio)	F value (Valor F)	Pr(>F) (Valor P)	Signif. Codes	¿Significativo?
Pretratamiento	3	25.839	8.613	3101.164	< 2e-16	***	Si
Molienda	2	0.078	0.039	14.111	1.26E-06	***	Si
Colorante	1	0.003	0.003	0.902	0.343		No
Pretratamiento: Molienda	6	0.26	0.043	15.595	6.34E-16	***	Si
Pretratamiento: Colorante	3	0.58	0.193	69.61	< 2e-16	***	Si
Molienda: Colorante	2	0.136	0.068	24.445	1.11E-10	***	Si
Pretratamiento: Molienda: Colorante	6	1.252	0.209	75.141	< 2e-16	***	Si
Residuals	360	1	0.003				
Signif. codes:							
<ul style="list-style-type: none"> • *** = muy significativo ($p < 0.001$) • ** = significativo ($p < 0.01$) • * = moderadamente significativo ($p < 0.05$) • Ningún símbolo = no significativo 							

Fuente: Elaboración propia (2025) a partir de datos experimentales procesados en RStudio

Este cuadro presenta el análisis de varianza (ANOVA) realizado para evaluar la influencia de los factores pretratamiento, molienda y colorante, así como sus interacciones, sobre el porcentaje de remoción de color. Se muestran los grados de libertad (Df), la suma de cuadrados (Sum Sq), el cuadrado medio (Mean Sq), el valor F (F value), el valor p (Pr(>F)) y el nivel de significancia estadística (Signif. Codes) correspondiente. Los cálculos se efectuaron en RStudio, utilizando los datos experimentales obtenidos a lo largo de la práctica. El modelo incluyó también el término de residuales, que representa la variabilidad no explicada por los factores evaluados. La codificación de los niveles de significancia

sigue la convención indicada al pie del cuadro. Este análisis fue utilizado como resultado principal en el Cuadro 35.

Cuadro 34: Análisis de varianza para las interacciones entre factores, ordenadas por su contribución a la variabilidad explicada (según suma de cuadrados)

Combinación	Df (Grados de libertad)	Sum Sq (Suma de cuadrados del factor)	Mean Sq (Cuadrado medio)	F value (Valor F)	Pr(>F) (Valor P)	Signif. Codes	¿Significativo?
Pretratamiento: Molienda: Colorante	6	1.252	0.209	75.141	< 2e-16	***	Si
Pretratamiento: Colorante	3	0.58	0.193	69.61	< 2e-16	***	Si
Pretratamiento: Molienda	6	0.26	0.043	15.595	6.34E-16	***	Si
Molienda: Colorante	2	0.136	0.068	24.445	1.11E-10	***	Si
Signif. codes:							
<ul style="list-style-type: none"> • *** = muy significativo ($p < 0.001$) • ** = significativo ($p < 0.01$) • * = moderadamente significativo ($p < 0.05$) • Ningún símbolo = no significativo 							

Fuente: Elaboración propia (2025) a partir de datos experimentales procesados en RStudio

Este cuadro presenta el análisis de varianza (ANOVA) correspondiente a las interacciones entre los factores pretratamiento, molienda y colorante, ordenadas de acuerdo con su contribución relativa a la variabilidad explicada, según la suma de cuadrados. Se incluyen los grados de libertad (Df), la suma de cuadrados (Sum Sq), el cuadrado medio (Mean Sq), el valor F (F value), el valor p (Pr(>F)) y el nivel de significancia estadística (Signif. Codes), así como la indicación de significancia para cada interacción evaluada. Los cálculos se realizaron en RStudio utilizando los datos experimentales obtenidos a lo largo de la práctica. La codificación de niveles de significancia se detalla al pie del cuadro.

Cuadro 35: Resultados del análisis de la varianza (ANOVA) para los factores los factores evaluados en la remoción de color

Factor	Df (Grados de libertad)	Sum Sq (Suma de cuadrados del factor)	Mean Sq (Cuadrado medio)	F value (Valor F)	Pr(>F) (Valor P)	Signif. Codes	¿Significativo?
Pretratamiento	3	25.839	8.613	3101.164	< 2e-16	***	Si
Molienda	2	0.078	0.039	14.111	1.26E-06	***	Si
Colorante	1	0.003	0.003	0.902	0.343		No
Signif. codes:							
<ul style="list-style-type: none"> • *** = muy significativo ($p < 0.001$) • ** = significativo ($p < 0.01$) • * = moderadamente significativo ($p < 0.05$) • Ningún símbolo = no significativo 							

Fuente: Elaboración propia (2025) a partir de datos experimentales procesados en RStudio

En este cuadro se presentan los resultados del análisis de varianza (ANOVA) aplicado para evaluar el efecto individual de los factores pretratamiento, molienda y colorante sobre la remoción de color. Se reportan los grados de libertad, la suma de cuadrados, el cuadrado medio, el valor F, el valor p y el nivel de significancia estadística de cada factor. El análisis fue realizado en RStudio, a partir de los datos experimentales obtenidos durante los ensayos de adsorción.

Cuadro 36: Medias y efectos principales por nivel experimental para cada factor evaluado en la remoción de color

Nivel	Media de remoción (% m/m)	Efecto sobre la media global (% m/m)	Efecto absoluto sobre la media global (% m/m)	Factor
CA	51.89% ±1.26%	15.41% ±2.83%	15.41% ±2.83%	Pretratamiento
HA	65.92% ±1.26%	29.44% ±2.83%	29.44% ±2.83%	Pretratamiento
HB	-3.00% ±1.26%	-39.49% ±2.83%	39.49% ±2.83%	Pretratamiento
SP	31.13% ±1.26%	-5.36% ±2.83%	5.36% ±2.83%	Pretratamiento
ML	34.47% ±1.46%	-2.02% ±2.92%	2.02% ±2.92%	Molienda
MM	37.44% ±1.46%	0.96% ±2.92%	0.96% ±2.92%	Molienda
SM	37.55% ±1.46%	1.06% ±2.92%	1.06% ±2.92%	Molienda
CD	36.74% ±1.79%	0.26% ±3.10%	0.26% ±3.10%	Colorante
CR	36.23% ±1.79%	-0.26% ±3.10%	0.26% ±3.10%	Colorante

Fuente: Fuente: Elaboración propia (2025) a partir de datos experimentales procesados en RStudio

Este cuadro presenta las medias de remoción de color, los efectos principales y los efectos absolutos correspondientes a cada nivel experimental de los factores pretratamiento, molienda y colorante. Cada efecto se calculó como la diferencia porcentual del nivel respecto al promedio general. Los datos fueron procesados en RStudio a partir de los ensayos realizados a lo largo de la práctica. Esta información se utilizó para la elaboración de la Figura 8, incluida en la sección de resultados. Para elaborar este cuadro se utilizaron los datos del Cuadro 31 y del Cuadro 32.

Nota: las variables empleadas en este cuadro se definen de la siguiente manera: HB (Pretratamiento de una hidrólisis básica a los residuos de palma africana), HA (Pretratamiento de una hidrólisis ácida a los residuos de palma africana), CA (Pretratamiento de realizar carbón activado a base de los residuos de palma africana), SP (Residuos de palma africana que no recibieron ningún pretratamiento), ML (Molienda con

licuadora/procesadora de alimentos), MM (Molienda manual con mazo), SM (Sin molienda), CD (Colorante Directo) y CR (Colorante Reactivo)).

Cuadro 37: Influencia porcentual promedio de los factores pretratamiento, molienda y colorante sobre la remoción media de color

Factor	Influencia promedio (% m/m)
Pretratamiento	22.43% \pm 2.83%
Molienda	1.35% \pm 2.92%
Colorante	0.26% \pm 3.10%

Fuente: Fuente: Elaboración propia (2025) a partir de datos experimentales procesados en RStudio

Este cuadro presenta la influencia porcentual promedio de los factores pretratamiento, molienda y colorante sobre la remoción promedio de color. Los resultados se calcularon a partir de los principales efectos de cada nivel experimental incluidos en el Cuadro 36. El procesamiento de datos se realizó en RStudio. La información contenida en este cuadro se utilizó para la elaboración de la Figura 6, incluida en la sección de resultados. Para elaborar este cuadro se utilizaron los datos del Cuadro 36.

Cuadro 38: Estadísticos descriptivos de remoción de color por combinación experimental

No°	Combinación	Media de remoción (% m/m $\pm 0.52\%$)	Desviación estándar	Mínimo (% m/m $\pm 0.26\%$)	Máximo (% m/m $\pm 0.26\%$)
1	HAMLCD	78.18%	3.11%	73.83%	80.96%
2	HASMCR	73.86%	12.50%	62.54%	85.28%
3	HAMMCD	73.65%	10.05%	61.73%	86.33%
4	HAMMCR	68.54%	13.32%	48.67%	76.94%
5	HASMCD	63.06%	6.04%	57.10%	69.86%
6	CAMLCR	60.07%	7.89%	48.81%	66.31%
7	CAMMCR	58.68%	4.31%	52.71%	63.00%
8	CASMCD	54.78%	5.06%	50.02%	60.50%
9	CASMCR	52.46%	4.59%	48.41%	57.85%
10	CAMMCD	46.20%	3.65%	41.18%	49.30%
11	CAMLCD	39.17%	5.19%	32.41%	43.34%
12	HAMLCR	38.24%	1.75%	35.79%	39.59%
13	SPMMCD	34.74%	1.05%	33.30%	35.63%
14	SPSMCR	34.16%	4.69%	28.79%	38.44%
15	SPMLCD	32.43%	1.77%	29.78%	33.44%
16	SPMLCR	31.00%	8.32%	22.42%	42.10%
17	SPSMCD	29.25%	2.66%	26.09%	32.25%
18	SPMMCR	25.19%	4.76%	19.97%	30.54%
19	HBMLCD	-1.22%	0.68%	-1.91%	-0.63%
20	HBMLCR	-2.14%	0.71%	-3.08%	-1.38%
21	HBSMCR	-2.64%	1.04%	-3.79%	-1.27%
22	HBMMCR	-2.65%	0.53%	-3.08%	-2.02%
23	HBSMCD	-4.54%	1.68%	-6.60%	-2.49%
24	HBMMCD	-4.81%	0.78%	-5.71%	-4.12%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Este cuadro presenta los estadísticos descriptivos de remoción de color para cada combinación experimental evaluada. Se incluyen la media, la desviación estándar, el valor mínimo y el valor máximo de remoción obtenidos a partir de las repeticiones correspondientes. Los datos fueron procesados en Excel utilizando los resultados experimentales. Este análisis complementa la clasificación general por combinación,

permitiendo caracterizar tanto la eficiencia como la variabilidad de cada tratamiento aplicado.

Nota: las variables empleadas en este cuadro se definen de la siguiente manera: HAMLCD (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis ácida (HA) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Directo (CD)), HAMLCD (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis ácida (HA) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Reactivo (CR)), HAMMCD (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis ácida (HA) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Directo (CD)), HAMMCD (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis ácida (HA) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Reactivo (CR)), HASMCD (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis ácida (HA) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Directo (CD)), HASMCD (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis ácida (HA) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Reactivo (CR)), CAMLCD (Combinación de Pretratamiento: Carbón activado a base de residuos de palma africana (CA) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Directo (CD)), CAMLCD (Combinación de Pretratamiento: Carbón activado a base de residuos de palma africana (CA) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Reactivo (CR)), CAMMCD (Combinación de Pretratamiento: Carbón activado a base de residuos de palma africana (CA) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Directo (CD)), CAMMCD (Combinación de Pretratamiento: Carbón activado a base de residuos de palma africana (CA) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Reactivo (CR)), CASMCD (Combinación de Pretratamiento: Carbón activado a base de residuos de palma africana (CA) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Directo (CD)), CASMCD (Combinación de Pretratamiento: Carbón activado a base de residuos de palma africana (CA) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Reactivo (CR)), SPMLCD = Combinación de Pretratamiento: Sin pretratamiento (SP) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Directo (CD), SPMLCD (Combinación de Pretratamiento: Sin pretratamiento (SP) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Reactivo (CR)), SPMMCD (Combinación de Pretratamiento: Sin pretratamiento (SP) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Directo (CD)), SPMMCD (Combinación de Pretratamiento: Sin pretratamiento (SP) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Reactivo (CR)),

SPSMCD (Combinación de Pretratamiento: Sin pretratamiento (SP) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Directo (CD)), SPSMCR (Combinación de Pretratamiento: Sin pretratamiento (SP) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Reactivo (CR)), HBMLCD (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis básica (HB) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Directo (CD)), HBMLCR (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis básica (HB) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Reactivo (CR)), HBMMCD (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis básica (HB) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Directo (CD)), HBMMCR (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis básica (HB) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Reactivo (CR)), HBSMCD (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis básica (HB) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Directo (CD)), HBSMCR (Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis básica (HB) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Reactivo (CR)).

Cuadro 39: Comparaciones múltiples de Tukey para los niveles del factor pretratamiento

Comparación de pretratamientos	Diferencia	Límite inferior	Límite superior	Valor p	Diferencia significativa
HA-CA	14.03%	12.07%	15.99%	0	Sí ($p < 0.05$)
HB-CA	-54.89%	-56.85%	-52.93%	0	Sí ($p < 0.05$)
SP-CA	-20.76%	-22.72%	-18.80%	0	Sí ($p < 0.05$)
HB-HA	-68.92%	-70.88%	-66.96%	0	Sí ($p < 0.05$)
SP-HA	-34.79%	-36.75%	-32.83%	0	Sí ($p < 0.05$)
SP-HB	34.13%	32.17%	36.09%	0	Sí ($p < 0.05$)

Fuente: Elaboración propia (2025) a partir de datos experimentales procesados en RStudio

En este cuadro se presentan los resultados de la prueba de comparaciones múltiples de Tukey aplicada al factor pretratamiento. Se incluyen las diferencias entre medias (%), los intervalos de confianza al 95 % y los valores p ajustados. Una diferencia positiva indica que el primer tratamiento logró una mayor remoción que el segundo, mientras que una

diferencia negativa señala que el segundo tratamiento fue superior. Los datos fueron procesados en RStudio a partir de los ensayos obtenidos.

Nota: las variables empleadas en este cuadro se definen de la siguiente manera: HB (Pretratamiento de una hidrólisis básica a los residuos de palma africana), HA (Pretratamiento de una hidrólisis ácida a los residuos de palma africana), CA (Pretratamiento de realizar carbón activado a base de los residuos de palma africana), SP (Residuos de palma africana que no recibieron ningún pretratamiento).

Cuadro 40: hiComparaciones múltiples de Tukey para los niveles del factor molienda

Comparación de moliendas	Diferencia	Límite inferior	Límite superior	Valor p	Diferencia significativa
MM-ML	2.98%	1.42%	4.53%	2.54E-05	Sí ($p < 0.05$)
SM-ML	3.08%	1.53%	4.63%	1.21E-05	Sí ($p < 0.05$)
SM-MM	0.11%	-1.44%	1.66%	0.985287	No

Fuente: Elaboración propia (2025) a partir de datos experimentales procesados en RStudio

En este cuadro se presentan los resultados de la prueba de comparaciones múltiples de Tukey aplicada al factor molienda. Se incluyen las diferencias entre medias (%), los intervalos de confianza al 95 % y los valores p ajustados. Una diferencia positiva indica que el primer tratamiento logró una mayor remoción que el segundo, mientras que una diferencia negativa señala que el segundo tratamiento fue superior. Los datos fueron procesados en RStudio a partir de los ensayos obtenidos.

Nota: las variables empleadas en este cuadro se definen de la siguiente manera: ML (Molienda con licuadora/procesadora de alimentos), MM (Molienda manual con mazo), SM (Sin molienda),

Cuadro 41: Comparación de Tukey entre los niveles del factor colorante

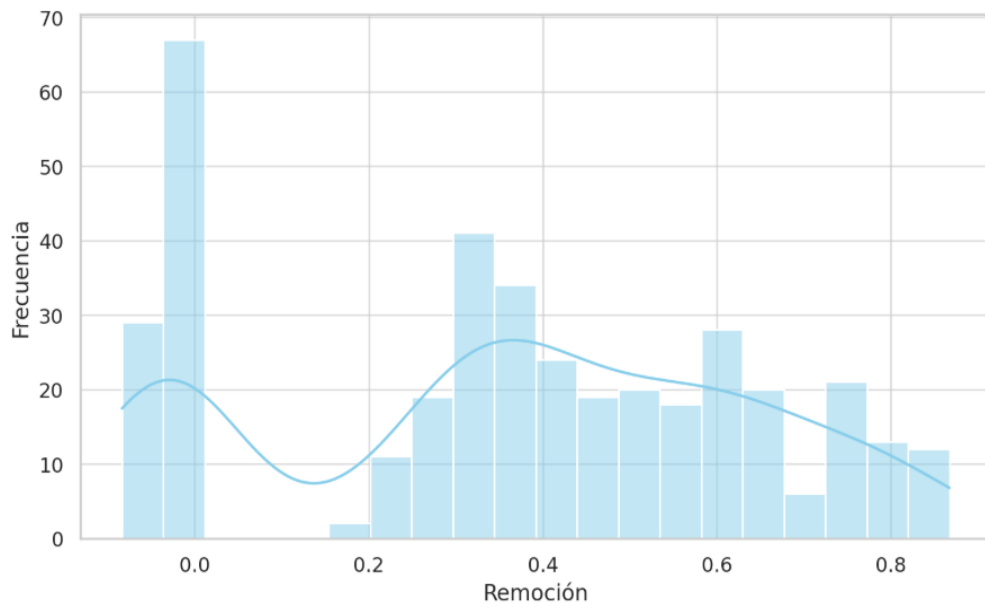
Comparación de colorantes	Diferencia	Límite inferior	Límite superior	Valor p	Diferencia significativa
CR-CD	-0.51%	-1.57%	0.55%	0.342908	No

Fuente: Elaboración propia (2025) a partir de datos experimentales procesados en RStudio

En este cuadro se presentan los resultados de la prueba de comparaciones múltiples de Tukey aplicada al factor colorante. Se incluyen las diferencias entre medias (%), los intervalos de confianza al 95 % y los valores p ajustados. Una diferencia positiva indica que el primer tratamiento logró una mayor remoción que el segundo, mientras que una diferencia negativa señala que el segundo tratamiento fue superior. Los datos fueron procesados en RStudio a partir de los ensayos obtenidos.

Nota: las variables empleadas en este cuadro se definen de la siguiente manera: CD (Colorante Directo) y CR (Colorante Reactivo))

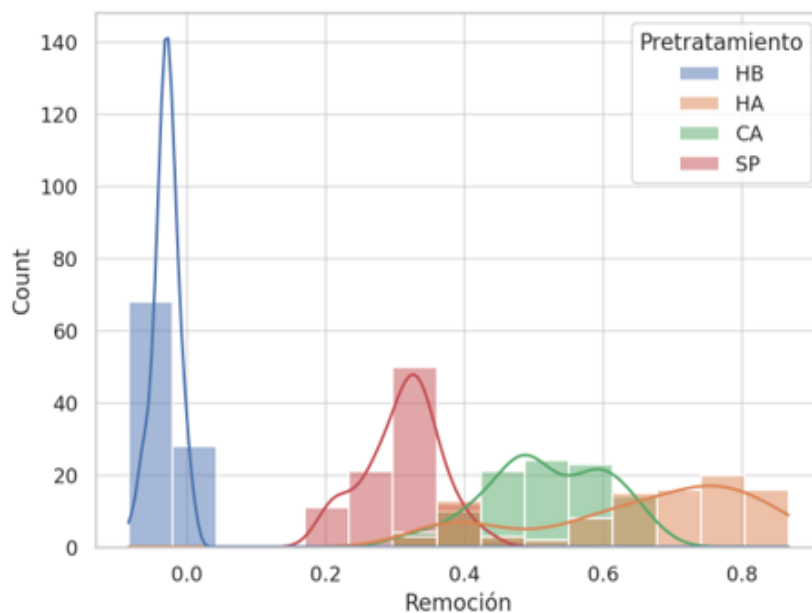
Figura 12: Distribución general de los valores de remoción de color



Fuente: Elaboración propia (2025)

Esta gráfica muestra la distribución de todos los valores de remoción de color obtenidos en el experimento, sin distinguir entre tratamientos. La curva azul representa una estimación de densidad suavizada (kernel), que ayuda a visualizar la forma general de la distribución. Los datos utilizados para generar esta gráfica corresponden a los porcentajes de remoción calculados a partir de cada lectura individual del experimento.

Figura 13: Distribución de los valores de remoción de color según el pretratamiento aplicado



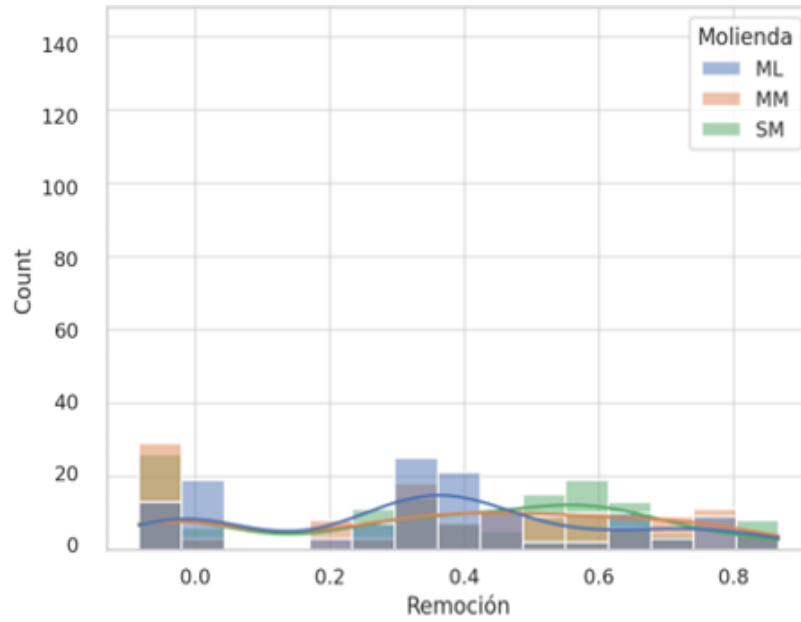
Fuente: Elaboración propia (2025)

Esta gráfica presenta la distribución de los valores de remoción de color para cada uno de los niveles del factor pretratamiento. La curva suavizada permite visualizar la forma general de la distribución para cada tratamiento, sin necesidad de agrupar los datos en intervalos. Los datos utilizados para esta gráfica corresponden a los porcentajes de remoción obtenidos en cada lectura individual del experimento.

Nota: las variables empleadas en este cuadro se definen de la siguiente manera: HB (Pretratamiento de una hidrólisis básica a los residuos de palma africana), HA (Pretratamiento de una hidrólisis ácida a los residuos de palma africana), CA

(Pretratamiento de realizar carbón activado a base de los residuos de palma africana), SP (Residuos de palma africana que no recibieron ningún pretratamiento).

Figura 14: Distribución de los valores de remoción de color según el tipo de molienda aplicado

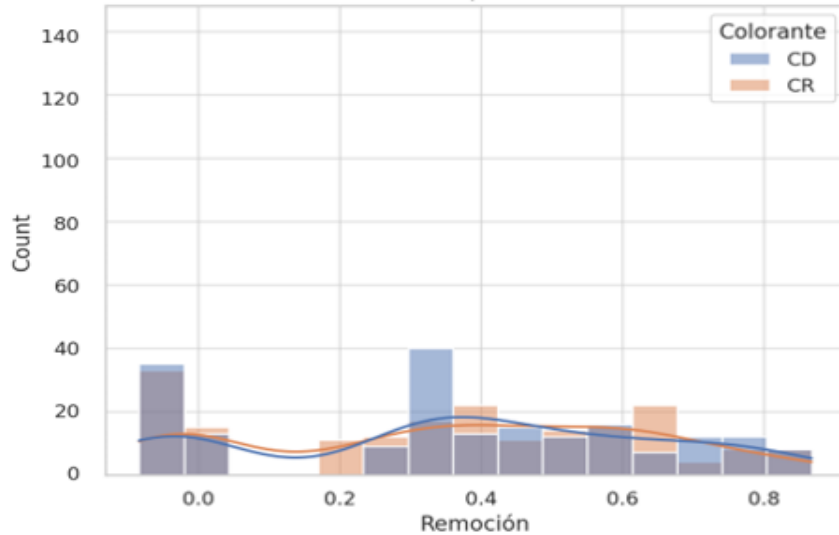


Fuente: Elaboración propia (2025)

Esta gráfica muestra la distribución de los valores de remoción de color para cada uno de los niveles del factor molienda. Las curvas suavizadas permiten observar el comportamiento de los tratamientos sin necesidad de agrupar los datos en intervalos. Los datos utilizados para generar esta gráfica corresponden a los porcentajes de remoción calculados a partir de cada lectura individual del experimento.

Nota: las variables empleadas en este cuadro se definen de la siguiente manera: ML (Molienda con licuadora/procesadora de alimentos), MM (Molienda manual con mazo), SM (Sin molienda).

Figura 15: Distribución de los valores de remoción de color según el tipo de colorante utilizado



Fuente: Elaboración propia (2025)

Esta gráfica presenta la distribución de los valores de remoción de color para los dos niveles del factor colorante: colorante directo (CD) y colorante reactivo (CR). Las curvas suavizadas permiten visualizar el comportamiento general de cada tipo de colorante en términos de remoción, basándose en los datos individuales del experimento. Los datos utilizados para esta gráfica corresponden a los porcentajes de remoción obtenidos en cada lectura individual.

Nota: las variables empleadas en este cuadro se definen de la siguiente manera: CD (Colorante directo) y CR (Colorante reactivo).

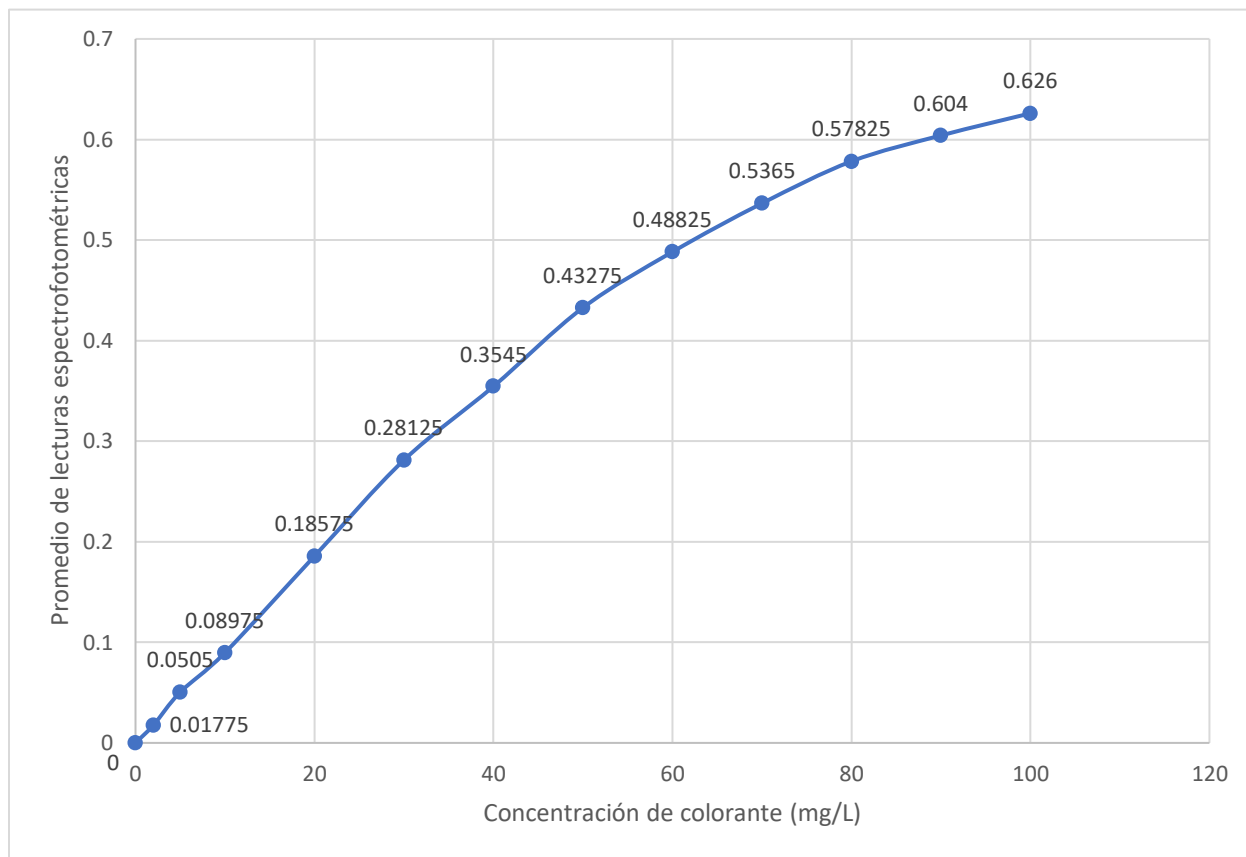
Cuadro 42: Promedio de lecturas espectrofotométricas para soluciones estándar de colorante directo utilizadas en la construcción de la curva de calibración

Concentración de colorante (mg/L \pm 0.01)	Promedio de las lecturas espectrofotométricas (\pm0.0009)
0	0.000
2	0.018
5	0.051
10	0.090
20	0.186
30	0.281
40	0.355
50	0.433
60	0.488
70	0.537
80	0.578
90	0.604
100	0.626

Fuente: Elaboración propia (2025)

En este cuadro se muestran los valores promedios de absorbancia obtenidos a partir de cuatro lecturas independientes para cada solución estándar de colorante directo. Los datos individuales correspondientes a cada lectura espectrofotométrica se encuentran en la sección de Datos originales, en el Cuadro 12.

Figura 16: Curva de calibración construida a partir del promedio de lecturas espectrofotométricas para soluciones estándar de colorante directo



Fuente: Elaboración propia (2025)

Esta figura muestra la relación entre la concentración de colorante directo (mg/L) y el promedio de absorbancia obtenida en cuatro lecturas espectrofotométricas independientes para cada solución estándar. Los datos utilizados para construir esta curva se presentan en el Cuadro 42. La curva de calibración obtenida se utilizó como referencia para determinar las concentraciones finales de colorante en los ensayos de adsorción realizados posteriormente.

Cuadro 43: Ensayo preliminar para la selección de la concentración de adsorbente utilizada en la construcción de la isoterma de Langmuir

Concentración de adsorbente (±0.27)	Concentración de adsorbente (±0.0003 g/mL)	Promedio de las lecturas (±0.0009)	% de remoción promedio (±0.26%)
0 g/L	0 g por 50 mL de sol madre (100 mg/L ±0.01 de colorante)	0.626	0.00%
2 g/L	0.1 g por 50 mL de sol madre (100 mg/L ±0.01 de colorante)	0.632	-0.96%
6 g/L	0.3 g por 50 mL de sol madre (100 mg/L ±0.01 de colorante)	0.624	0.28%
12 g/L	0.6 g por 50 mL de sol madre (100 mg/L ±0.01 de colorante)	0.387	38.26%
18 g/L	0.9 g por 50 mL de sol madre (100 mg/L ±0.01 de colorante)	0.210	66.53%
24 g/L	1.2 g por 50 mL de sol madre (100 mg/L ±0.01 de colorante)	0.169	73.04%
30 g/L	1.5 g por 50 mL de sol madre (100 mg/L ±0.01 de colorante)	0.092	85.34%

Fuente: Elaboración propia (2025)

En este cuadro se presentan los resultados de un ensayo preliminar realizado con el objetivo de seleccionar la concentración de adsorbente (HAML) adecuada para la construcción de la isoterma de Langmuir. Se evaluaron distintas dosis de adsorbente (HAML) en una solución madre de colorante directo a 100 mg/L, utilizando un volumen constante de 50 mL. Las lecturas espectrofotométricas se obtuvieron a una longitud de onda de 540 nm y permitieron calcular el porcentaje de remoción promedio para cada concentración. Con base en estos resultados, se seleccionó la concentración de 18 g/L por presentar una remoción intermedia, evitando tanto la saturación del sistema como una baja sensibilidad analítica.

Cuadro 44: Lecturas espectrofotométricas corregidas por blanco promedio para la construcción de la isoterma de Langmuir con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo

No.	Triplicado	Concentración inicial de colorante (mg/L ± 0.01)	Lectura 1 (± 0.0005)	Lectura 2 (± 0.0005)	Lectura 3 (± 0.0005)
1	1	10	0.010	0.009	0.008
	2	10	0.011	0.009	0.012
	3	10	0.011	0.011	0.008
2	1	20	0.021	0.020	0.020
	2	20	0.021	0.020	0.024
	3	20	0.019	0.023	0.018
3	1	30	0.036	0.036	0.034
	2	30	0.035	0.037	0.036
	3	30	0.034	0.033	0.036
4	1	40	0.051	0.051	0.051
	2	40	0.050	0.048	0.054
	3	40	0.048	0.050	0.049
5	1	50	0.061	0.064	0.062
	2	50	0.066	0.062	0.064
	3	50	0.062	0.061	0.059
6	1	60	0.077	0.074	0.075
	2	60	0.076	0.078	0.072
	3	60	0.072	0.081	0.073
7	1	70	0.087	0.087	0.086
	2	70	0.085	0.092	0.089
	3	70	0.089	0.089	0.086
8	1	80	0.100	0.104	0.105
	2	80	0.107	0.106	0.102
	3	80	0.099	0.111	0.102
9	1	90	0.122	0.121	0.117
	2	90	0.119	0.124	0.117
	3	90	0.124	0.119	0.121
10	1	100	0.137	0.140	0.138
	2	100	0.145	0.135	0.138
	3	100	0.140	0.143	0.137

Fuente: Elaboración propia (2025)

En este cuadro se presentan las lecturas espectrofotométricas corregidas por blanco promedio para las soluciones con diferentes concentraciones iniciales de colorante directo,

tratadas con residuos de palma africana (HAML) a una concentración fija de adsorbente de 18 g/L. Estos datos fueron obtenidos a partir de las lecturas originales presentadas en el Cuadro 14, al cual se les aplicó la corrección correspondiente con el valor promedio del blanco. Los datos aquí presentados sirvieron como base para calcular la concentración remanente de colorante (C_e) y la cantidad adsorbida en equilibrio (q_e), utilizadas posteriormente en la construcción de la isoterma de Langmuir.

Cuadro 45: Concentración de equilibrio (Ce) estimada a partir de la curva de calibración para el tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo

No.	Triplicado	Concentración inicial de colorante (mg/L ± 0.01)	Ce1 (mg/L ± 0.016)	Ce2 (mg/L ± 0.016)	Ce3 (mg/L ± 0.016)	Ce promedio (mg/L ± 0.027)
1	1	10	1.111	1.000	0.889	1.000
	2	10	1.222	1.000	1.333	1.185
	3	10	1.222	1.222	0.889	1.111
2	1	20	2.273	2.182	2.182	2.212
	2	20	2.273	2.182	2.545	2.333
	3	20	2.091	2.455	2.000	2.182
3	1	30	3.636	3.636	3.455	3.576
	2	30	3.545	3.727	3.636	3.636
	3	30	3.455	3.364	3.636	3.485
4	1	40	5.000	5.000	5.000	5.000
	2	40	4.909	4.727	5.385	5.007
	3	40	4.727	4.909	4.818	4.818
5	1	50	6.282	6.667	6.410	6.453
	2	50	6.923	6.410	6.667	6.667
	3	50	6.410	6.282	6.026	6.239
6	1	60	8.333	7.949	8.077	8.120
	2	60	8.205	8.462	7.692	8.120
	3	60	7.692	8.846	7.821	8.120
7	1	70	9.615	9.615	9.487	9.573
	2	70	9.359	10.208	9.872	9.813
	3	70	9.872	9.872	9.487	9.744
8	1	80	11.042	11.458	11.563	11.354
	2	80	11.771	11.667	11.250	11.563
	3	80	10.938	12.188	11.250	11.458
9	1	90	13.333	13.229	12.813	13.125
	2	90	13.021	13.542	12.813	13.125
	3	90	13.542	13.021	13.229	13.264
10	1	100	14.896	15.208	15.000	15.035
	2	100	15.729	14.688	15.000	15.139
	3	100	15.208	15.521	14.896	15.208

Fuente: Elaboración propia (2025)

En este cuadro se muestran los valores de concentración de equilibrio (Ce) obtenidos a partir de la curva de calibración, utilizando las lecturas espectrofotométricas corregidas del

tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo. Las absorbancias utilizadas fueron tomadas del Cuadro 44, y se convirtieron a concentración mediante interpolación en la curva de calibración previamente construida. Cada valor corresponde a una de las tres repeticiones experimentales por concentración inicial, y se presenta también el valor promedio de C_e , que se utilizó posteriormente para calcular la cantidad adsorbida en equilibrio (q_e).

Nota: las variables empleadas en este cuadro se definen de la siguiente manera: C_c (Coeficiente de curvatura)

Cuadro 46: Capacidad de adsorción en equilibrio (q_e) obtenida para el tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo

No.	Triplicado	Concentración de colorante inicial (mg/L ± 0.01)	q_e promedio (mg/g ± 0.0075)
1	1	10	0.5000
	2	10	0.4897
	3	10	0.4938
2	1	20	0.9882
	2	20	0.9815
	3	20	0.9899
3	1	30	1.4680
	2	30	1.4646
	3	30	1.4731
4	1	40	1.9444
	2	40	1.9441
	3	40	1.9545
5	1	50	2.4193
	2	50	2.4074
	3	50	2.4311
6	1	60	2.8822
	2	60	2.8822
	3	60	2.8822
7	1	70	3.3571
	2	70	3.3437
	3	70	3.3476
8	1	80	3.8137
	2	80	3.8021
	3	80	3.8079
9	1	90	4.2708
	2	90	4.2708
	3	90	4.2631
10	1	100	4.7203
	2	100	4.7145
	3	100	4.7106

Fuente: Elaboración propia (2025)

En este cuadro se presentan los valores de capacidad de adsorción en equilibrio (q_e) obtenidos a partir de las concentraciones de equilibrio (C_e) previamente calculadas para cada muestra tratada con residuos de palma africana (HAML, Residuos de palma africana con hidrólisis ácida como pretratamiento y molienda con licuadora). Los valores de q_e se

calcularon utilizando la ecuación correspondiente a un sistema en fase líquida, considerando la concentración inicial de colorante, la concentración en equilibrio, el volumen de la solución (50 mL) y la masa de adsorbente utilizada (0.9 g). Las concentraciones de equilibrio empleadas provienen del Cuadro 45. Todos los cálculos se realizaron con base en los valores promedios de C_e por triplicado.

Cuadro 47: Relación C_e/q_e para el tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo

No.	Triplicado	Concentración de colorante inicial (mg/L ± 0.01)	C_e/q_e promedio (g/L ± 0.031)
1	1	10	2.0000
	2	10	2.4202
	3	10	2.2500
2	1	20	2.2385
	2	20	2.3774
	3	20	2.2041
3	1	30	2.4358
	2	30	2.4828
	3	30	2.3657
4	1	40	2.5714
	2	40	2.5755
	3	40	2.4651
5	1	50	2.6673
	2	50	2.7692
	3	50	2.5664
6	1	60	2.8171
	2	60	2.8171
	3	60	2.8171
7	1	70	2.8515
	2	70	2.9348
	3	70	2.9106
8	1	80	2.9772
	2	80	3.0411
	3	80	3.0091
9	1	90	3.0732
	2	90	3.0732
	3	90	3.1113
10	1	100	3.1851
	2	100	3.2111
	3	100	3.2285

Fuente: Elaboración propia (2025)

En este cuadro se presenta la relación C_e/q_e calculada para cada punto experimental del tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo. Los valores de concentración de equilibrio (C_e) y la capacidad de adsorción en equilibrio (q_e) utilizados para este cálculo provienen del Cuadro 45 y en el Cuadro 46, respectivamente. Esta relación se utilizó para construir la gráfica lineal del modelo de Langmuir.

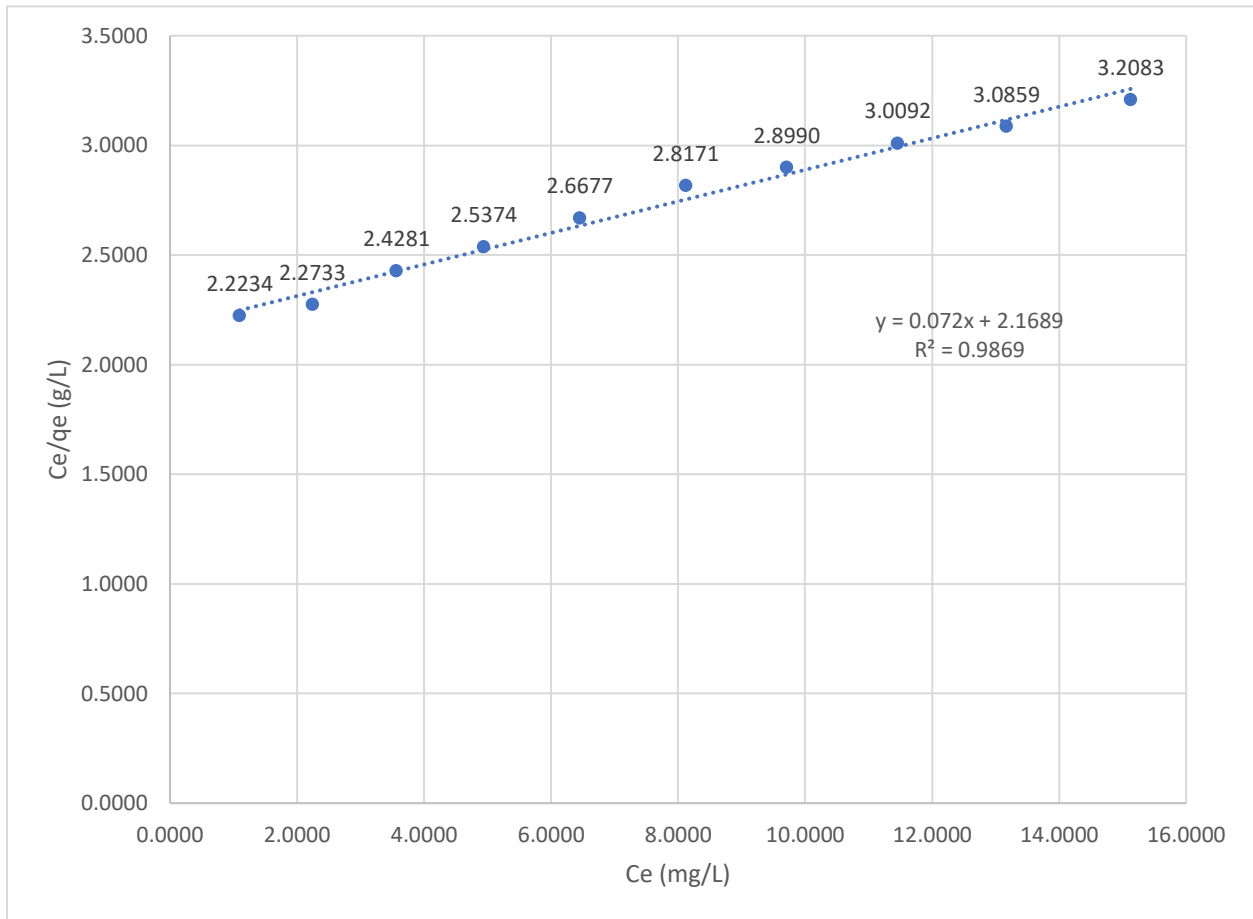
Cuadro 48: Valores promedio de C_e y C_e/q_e para el tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo

C_0 (mg/L ± 0.01)	C_e promedio (mg/L ± 0.027)	C_e/q_e promedio (g/L ± 0.031)
10	1.0988	2.2234
20	2.2424	2.2733
30	3.5657	2.4281
40	4.9417	2.5374
50	6.4530	2.6677
60	8.1197	2.8171
70	9.7098	2.8990
80	11.4583	3.0092
90	13.1713	3.0859
100	15.1273	3.2083

Fuente: Elaboración propia (2025)

En este cuadro se presentan los valores promedio de concentración de equilibrio (C_e) y la relación C_e/q_e correspondientes a cada concentración inicial de colorante (C_0) para el tratamiento con residuos de palma africana (HAML, Residuos de palma africana con hidrólisis ácida como pretratamiento y molienda con licuadora). Estos datos fueron utilizados para construir la gráfica lineal del modelo de Langmuir que se presenta en la sección de Resultados, en la Figura 16.

Figura 17: Construcción de la representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo, a partir de los valores promedio obtenidos experimentalmente



Fuente: Elaboración propia (2025)

Esta figura presenta la representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con residuos de palma africana (HAML, Residuos de palma africana con hidrólisis ácida como pretratamiento y molienda con licuadora) y colorante directo, construida a partir de los valores promedio de concentración de equilibrio (C_e) y la relación C_e/q_e obtenidos experimentalmente. Los datos utilizados para elaborar esta gráfica provienen del Cuadro 48. A partir de esta representación se obtuvieron la pendiente y la ordenada al origen de la recta, lo cual permitió estimar los parámetros característicos del modelo de Langmuir: la capacidad máxima de adsorción (Q_m), la constante de afinidad o de Langmuir (K_L) y el coeficiente de determinación (R^2).

Cuadro 49: Parámetros del modelo de Langmuir obtenidos a partir del promedio de las tres repeticiones del tratamiento con residuos de palma africana (HAMLCD)

No. De muestra	m (g/mg)	Qm (mg/g ±0.3170)	b (g/L)	KL (L/mg ±0.0011)	R²
Promedio	0.0720	13.8979	2.1689	0.0332	0.9869

Fuente: Elaboración propia (2025)

En este cuadro se presentan los parámetros del modelo de Langmuir obtenidos a partir del ajuste lineal realizado con los valores promedio de las tres repeticiones del tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo. La pendiente (m) y la ordenada al origen (b) fueron obtenidas a partir de la gráfica lineal construida en la Figura 9. A partir de estos valores se calcularon la capacidad máxima de adsorción (Qm), la constante de afinidad o de Langmuir (KL) y el coeficiente de determinación (R²).

Cuadro 50: Lecturas espectrofotométricas corregidas por blanco promedio para la construcción de la isoterma de Langmuir con carbón activado comercial y colorante directo

No.	Triplicado	Concentración inicial de colorante (mg/L ± 0.010)	Lectura 1 (± 0.0005)	Lectura 2 (± 0.0005)	Lectura 3 (± 0.0005)
1	1	10	0.019	0.018	0.021
	2	10	0.017	0.019	0.019
	3	10	0.022	0.021	0.017
2	1	20	0.052	0.055	0.055
	2	20	0.054	0.055	0.053
	3	20	0.054	0.055	0.055
3	1	30	0.086	0.080	0.080
	2	30	0.075	0.083	0.083
	3	30	0.080	0.080	0.077
4	1	40	0.118	0.121	0.120
	2	40	0.121	0.122	0.124
	3	40	0.122	0.126	0.120
5	1	50	0.162	0.164	0.165
	2	50	0.159	0.160	0.170
	3	50	0.160	0.160	0.161
6	1	60	0.216	0.215	0.218
	2	60	0.215	0.216	0.220
	3	60	0.218	0.218	0.223
7	1	70	0.268	0.264	0.264
	2	70	0.262	0.263	0.262
	3	70	0.263	0.265	0.269
8	1	80	0.307	0.301	0.307
	2	80	0.306	0.304	0.303
	3	80	0.302	0.302	0.304
9	1	90	0.370	0.374	0.373
	2	90	0.375	0.367	0.369
	3	90	0.371	0.369	0.375
10	1	100	0.449	0.450	0.448
	2	100	0.448	0.451	0.449
	3	100	0.450	0.448	0.449

Fuente: Elaboración propia (2025)

En este cuadro se presentan las lecturas espectrofotométricas corregidas por blanco promedio para las soluciones con diferentes concentraciones iniciales de colorante directo,

tratadas con carbón activado comercial a una concentración fija de adsorbente de 18 g/L. Estos datos fueron obtenidos a partir de las lecturas originales presentadas en el Cuadro 15, al cual se les aplicó la corrección correspondiente con el valor promedio del blanco. Los datos aquí presentados sirvieron como base para calcular la concentración remanente de colorante (C_e) y la cantidad adsorbida en equilibrio (q_e), utilizadas posteriormente en la construcción de la isoterma de Langmuir.

Cuadro 51: Concentración de equilibrio (Ce) estimada a partir de la curva de calibración para el carbón activado comercial y colorante directo

No.	Triplicado	Concentración inicial de colorante (mg/L ±0.01)	Ce1 (mg/L ±0.016)	Ce2 (mg/L ±0.016)	Ce3 (mg/L ±0.016)	Ce promedio (mg/L ±0.027)
1	1	10	2.111	2.000	2.333	2.148
	2	10	1.889	2.111	2.111	2.037
	3	10	2.444	2.333	1.889	2.222
2	1	20	5.128	5.513	5.513	5.385
	2	20	5.385	5.513	5.256	5.385
	3	20	5.385	5.513	5.513	5.470
3	1	30	9.487	8.718	8.718	8.974
	2	30	8.077	9.103	9.103	8.761
	3	30	8.718	8.718	8.333	8.590
4	1	40	12.917	13.229	13.125	13.090
	2	40	13.229	13.333	13.542	13.368
	3	40	13.333	13.750	13.125	13.403
5	1	50	17.500	17.708	17.813	17.674
	2	50	17.188	17.292	18.333	17.604
	3	50	17.292	17.292	17.396	17.326
6	1	60	23.158	23.053	23.368	23.193
	2	60	23.053	23.158	23.579	23.263
	3	60	23.368	23.368	23.895	23.544
7	1	70	28.632	28.211	28.211	28.351
	2	70	28.000	28.105	28.000	28.035
	3	70	28.105	28.316	28.737	28.386
8	1	80	33.514	32.703	33.514	33.243
	2	80	33.378	33.108	32.973	33.153
	3	80	32.838	32.838	33.108	32.928
9	1	90	41.923	42.436	42.308	42.222
	2	90	42.564	41.538	41.795	41.966
	3	90	42.051	41.795	42.564	42.137
10	1	100	47.396	47.500	47.292	47.396
	2	100	47.292	47.604	47.396	47.431
	3	100	47.500	47.292	47.396	47.396

Fuente: Elaboración propia (2025)

En este cuadro se muestran los valores de concentración de equilibrio (Ce) obtenidos a partir de la curva de calibración, utilizando las lecturas espectrofotométricas corregidas del tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo. Las absorbancias utilizadas

fueron tomadas del Cuadro 44, y se convirtieron a concentración mediante interpolación en la curva de calibración previamente construida. Cada valor corresponde a una de las tres repeticiones experimentales por concentración inicial, y se presenta también el valor promedio de C_e , que se utilizó posteriormente para calcular la cantidad adsorbida en equilibrio (q_e).

Cuadro 52: Capacidad de adsorción en equilibrio (q_e) obtenida para carbón activado comercial y colorante directo

No.	Triplicado	Concentración inicial de colorante (mg/L ± 0.010)	q_e promedio (mg/g ± 0.0075)
1	1	10	0.4362
	2	10	0.4424
	3	10	0.4321
2	1	20	0.8120
	2	20	0.8120
	3	20	0.8072
3	1	30	1.1681
	2	30	1.1800
	3	30	1.1895
4	1	40	1.4950
	2	40	1.4796
	3	40	1.4776
5	1	50	1.7959
	2	50	1.7998
	3	50	1.8152
6	1	60	2.0448
	2	60	2.0409
	3	60	2.0253
7	1	70	2.3138
	2	70	2.3314
	3	70	2.3119
8	1	80	2.5976
	2	80	2.6026
	3	80	2.6151
9	1	90	2.6543
	2	90	2.6686
	3	90	2.6591
10	1	100	2.9225
	2	100	2.9205
	3	100	2.9225

Fuente: Elaboración propia (2025)

En este cuadro se presentan los valores de capacidad de adsorción en equilibrio (q_e) obtenidos a partir de las concentraciones de equilibrio (C_e) previamente calculadas para cada muestra tratada con carbón activado comercial. Los valores de q_e se calcularon utilizando la ecuación correspondiente a un sistema en fase líquida, considerando la concentración inicial de colorante, la concentración en equilibrio, el volumen de la solución (50 mL) y la masa de adsorbente utilizada (0.9 g). Las concentraciones de equilibrio empleadas provienen del Cuadro 51. Todos los cálculos se realizaron con base en los valores promedios de C_e por triplicado.

Cuadro 53: Relación C_e/q_e para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo

No.	Triplicado	Concentración inicial de colorante (mg/L ± 0.010)	C_e/q_e promedio (g/L ± 0.031)
1	1	10	4.9245
	2	10	4.6047
	3	10	5.1429
2	1	20	6.6316
	2	20	6.6316
	3	20	6.7765
3	1	30	7.6829
	2	30	7.4245
	3	30	7.2216
4	1	40	8.7561
	2	40	9.0352
	3	40	9.0705
5	1	50	9.8410
	2	50	9.7814
	3	50	9.5452
6	1	60	11.3422
	2	60	11.3983
	3	60	11.6246
7	1	70	12.2527
	2	70	12.0251
	3	70	12.2782
8	1	80	12.7977
	2	80	12.7385
	3	80	12.5914
9	1	90	15.9070
	2	90	15.7260
	3	90	15.8464
10	1	100	16.2178
	2	100	16.2404
	3	100	16.2178

Fuente: Elaboración propia (2025)

En este cuadro se presenta la relación C_e/q_e calculada para cada punto experimental del tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo. Los valores de concentración de equilibrio (C_e) y la capacidad de adsorción en equilibrio (q_e) utilizados

para este cálculo provienen del Cuadro 51 y del Cuadro 52, respectivamente. Esta relación se utilizó para construir la gráfica lineal del modelo de Langmuir.

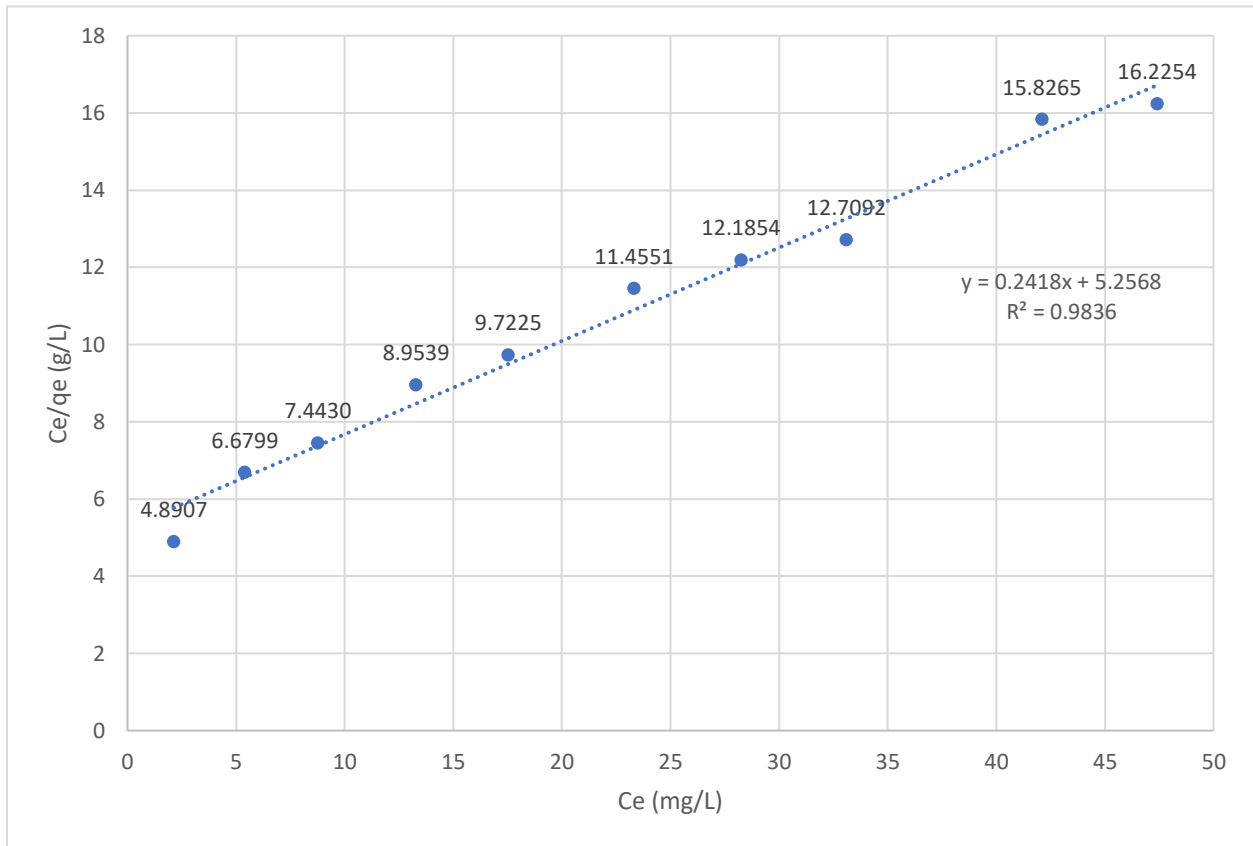
Cuadro 54: Valores promedio de C_e y C_e/q_e para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo

C_0 (mg/L ± 0.010)	C_e promedio (mg/L ± 0.027)	C_e/q_e promedio (g/L ± 0.031)
10	2.1358	4.8907
20	5.4131	6.6799
30	8.7749	7.4430
40	13.2870	8.9539
50	17.5347	9.7225
60	23.3333	11.4551
70	28.2573	12.1854
80	33.1081	12.7092
90	42.1083	15.8265
100	47.4074	16.2254

Fuente: Elaboración propia (2025)

En este cuadro se presentan los valores promedio de concentración de equilibrio (C_e) y la relación C_e/q_e correspondientes a cada concentración inicial de colorante (C_0) para el tratamiento con carbón activado comercial. Estos datos fueron utilizados para construir la gráfica lineal del modelo de Langmuir que se presenta en la sección de Resultados, en la Figura 10.

Figura 18: Construcción de la representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo, a partir de los valores promedio obtenidos experimentalmente



Fuente: Elaboración propia (2025)

Esta figura presenta la representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo, construida a partir de los valores promedio de concentración de equilibrio (C_e) y la relación C_e/q_e obtenidos experimentalmente. Los datos utilizados para elaborar esta gráfica provienen del Cuadro 54. A partir de esta representación se obtuvieron la pendiente y la ordenada al origen de la recta, lo cual permitió estimar los parámetros característicos del modelo de Langmuir: la capacidad máxima de adsorción (Q_m), la constante de afinidad o de Langmuir (K_L) y el coeficiente de determinación (R^2).

Cuadro 55: Parámetros del modelo de Langmuir obtenidos a partir del promedio de las tres repeticiones del carbón activado comercial

No. De muestra	m (g/mg)	Qm (mg/g ±0.3170)	b (g/L)	KL (L/mg ±0.0011)	R²
Promedio	0.2418	4.1357	5.2568	0.0460	0.9836

Fuente: Elaboración propia (2025)

En este cuadro se presentan los parámetros del modelo de Langmuir obtenidos a partir del ajuste lineal realizado con los valores promedio de las tres repeticiones del tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo. La pendiente (m) y la ordenada al origen (b) fueron obtenidas a partir de la gráfica lineal construida en la Figura 17. A partir de estos valores se calcularon la capacidad máxima de adsorción (Qm), la constante de afinidad o de Langmuir (KL) y el coeficiente de determinación (R²).

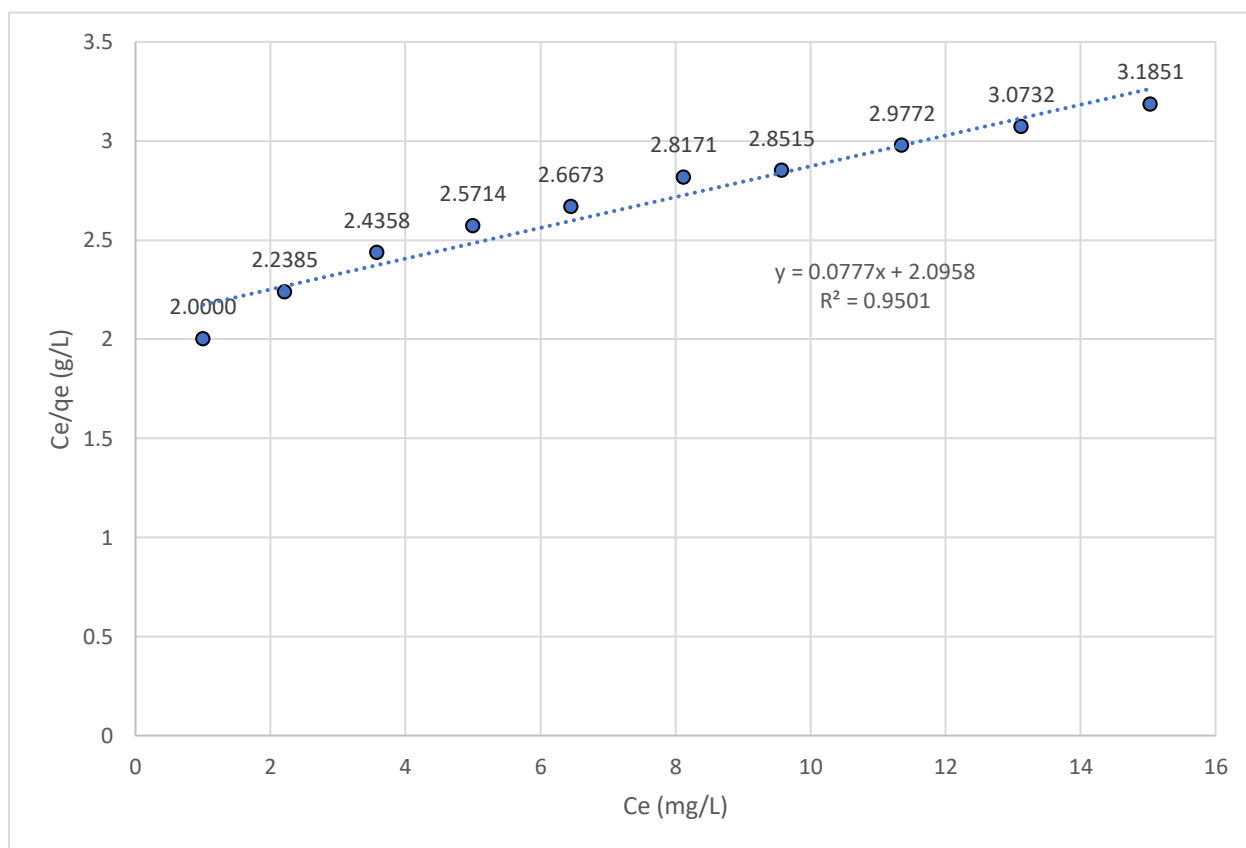
Cuadro 56: Valores de la Muestra 1 de Ce y Ce/qe para el tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo

C0 (mg/L ±0.010)	Ce Muestra 1 (mg/L ±0.027)	Ce/qe Muestra 1 (g/L ±0.031)
10	1.0000	2.0000
20	2.2121	2.2385
30	3.5758	2.4358
40	5.0000	2.5714
50	6.4530	2.6673
60	8.1197	2.8171
70	9.5726	2.8515
80	11.3542	2.9772
90	13.1250	3.0732
100	15.0347	3.1851

Fuente: Elaboración propia (2025)

En este cuadro se presentan los valores promedio de concentración de equilibrio (C_e) y la relación C_e/q_e correspondientes a la Muestra 1 del tratamiento con residuos de palma africana (HAML) para la Muestra 1. Estos datos fueron parte del conjunto de diez muestras experimentales utilizadas para calcular los valores promedio que posteriormente se emplearon en la construcción de la representación lineal del modelo de Langmuir, incluida en la sección de Resultados como Figura 16.

Figura 19: Construcción de la representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo, a partir de los valores de la Muestra 1 obtenidos experimentalmente



Fuente: Elaboración propia (2025)

Esta figura presenta la representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con residuos de palma africana con hidrólisis ácida como pretratamiento y molienda con licuadora (HAML) y colorante directo, construida a partir de los valores promedio de concentración de equilibrio (C_e) y la relación C_e/q_e obtenidos experimentalmente para la

Muestra 1. Los datos utilizados para elaborar esta gráfica provienen del Cuadro 56. A partir de esta representación se obtuvieron la pendiente y la ordenada al origen de la recta, lo cual permitió estimar los parámetros característicos del modelo de Langmuir: la capacidad máxima de adsorción (Q_m), la constante de afinidad o de Langmuir (K_L) y el coeficiente de determinación (R^2).

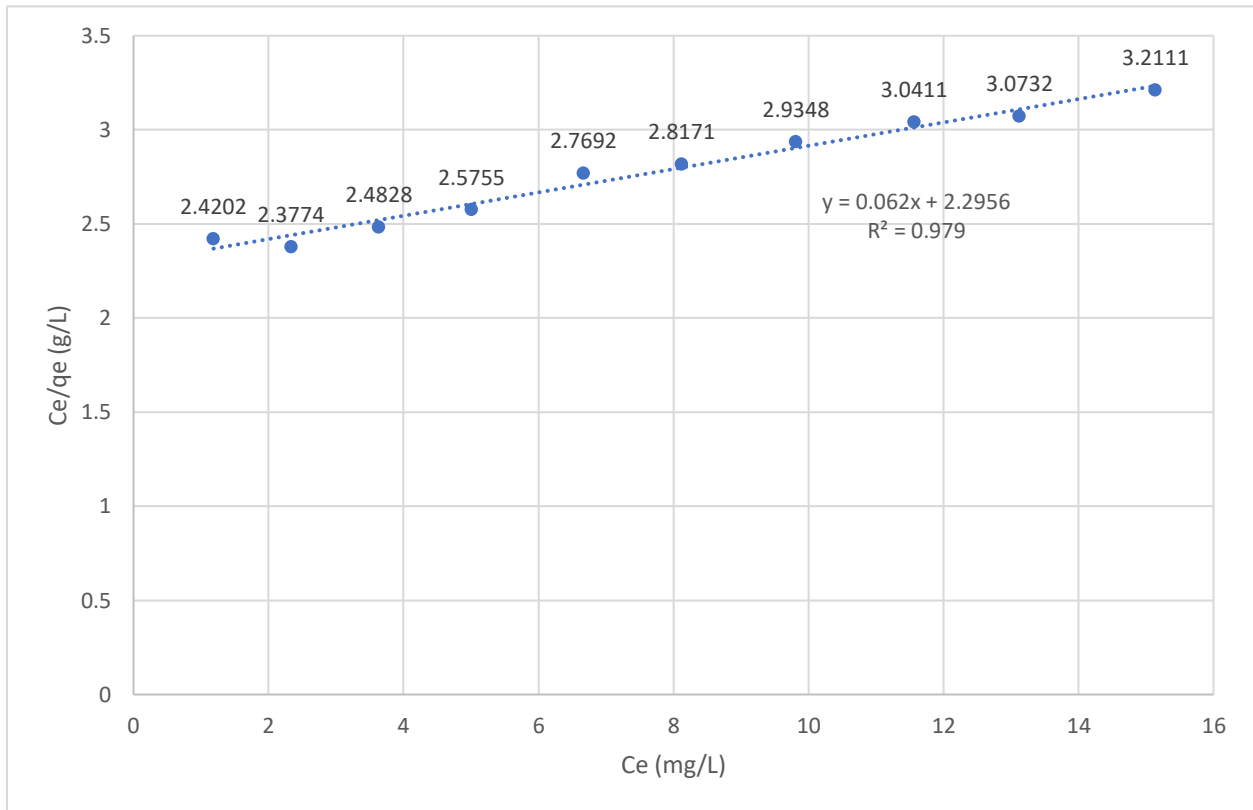
Cuadro 57: Valores de la Muestra 2 de C_e y C_e/q_e para el tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo

C_0 (mg/L ± 0.010)	C_e Muestra 2 (mg/L ± 0.027)	C_e/q_e Muestra 2 (g/L ± 0.031)
10	1.1852	2.4202
20	2.3333	2.3774
30	3.6364	2.4828
40	5.0070	2.5755
50	6.6667	2.7692
60	8.1197	2.8171
70	9.8130	2.9348
80	11.5625	3.0411
90	13.1250	3.0732
100	15.1389	3.2111

Fuente: Elaboración propia (2025)

En este cuadro se presentan los valores promedio de concentración de equilibrio (C_e) y la relación C_e/q_e correspondientes a la Muestra 2 del tratamiento con residuos de palma africana (HAML) para la Muestra 2. Estos datos fueron parte del conjunto de diez muestras experimentales utilizadas para calcular los valores promedio que posteriormente se emplearon en la construcción de la representación lineal del modelo de Langmuir, incluida en la sección de Resultados como Figura 9.

Figura 20: Construcción de la representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo, a partir de los valores de la Muestra 2 obtenidos experimentalmente



Fuente: Elaboración propia (2025)

Esta figura presenta la representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo, construida a partir de los valores promedio de concentración de equilibrio (C_e) y la relación C_e/q_e obtenidos experimentalmente para la Muestra 2. Los datos utilizados para elaborar esta gráfica provienen del Cuadro 57. A partir de esta representación se obtuvieron la pendiente y la ordenada al origen de la recta, lo cual permitió estimar los parámetros característicos del modelo de Langmuir: la capacidad máxima de adsorción (Q_m), la constante de afinidad o de Langmuir (K_L) y el coeficiente de determinación (R^2).

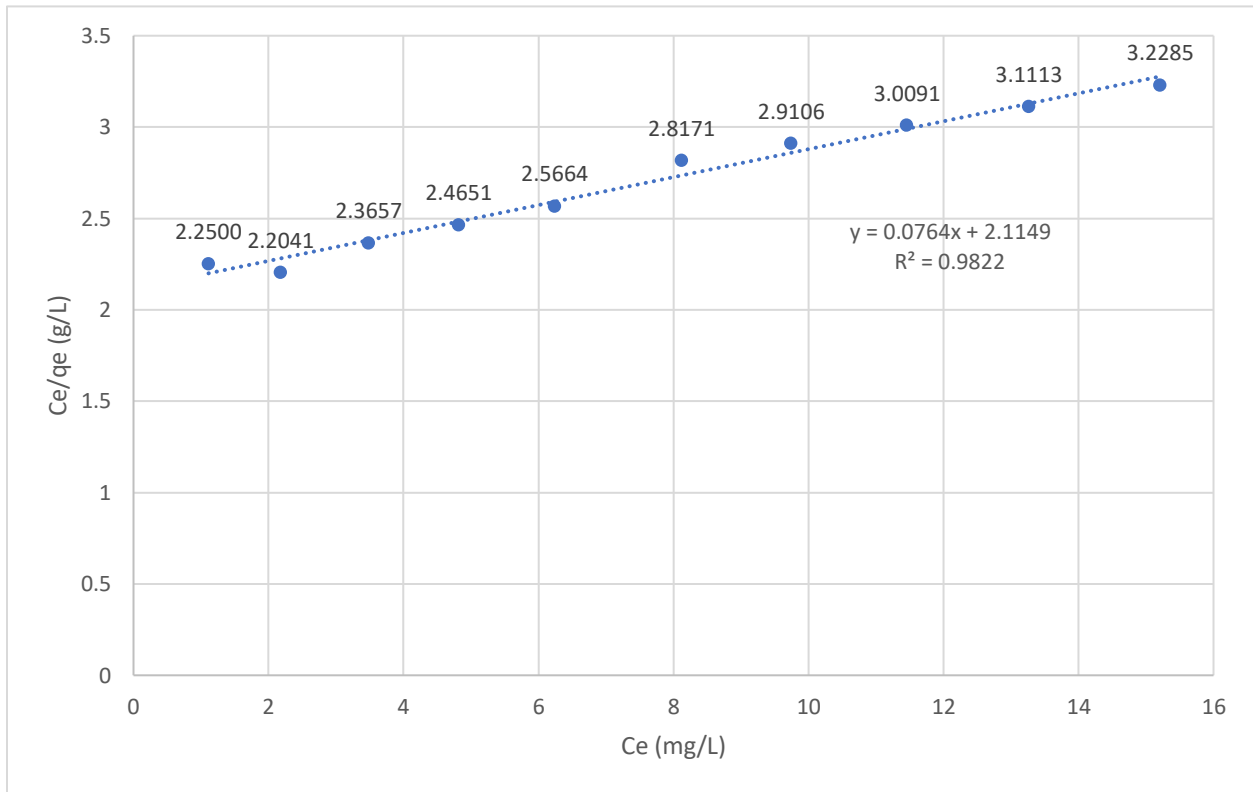
Cuadro 58: Valores de la Muestra 3 de Ce y Ce/qe para el tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo

C0 (mg/L ±0.010)	Ce Muestra 3 (mg/L ±0.027)	Ce/qe Muestra 3 (g/L ±0.031)
10	1.1111	2.2500
20	2.1818	2.2041
30	3.4848	2.3657
40	4.8182	2.4651
50	6.2393	2.5664
60	8.1197	2.8171
70	9.7436	2.9106
80	11.4583	3.0091
90	13.2639	3.1113
100	15.2083	3.2285

Fuente: Elaboración propia (2025)

En este cuadro se presentan los valores promedio de concentración de equilibrio (Ce) y la relación Ce/qe correspondientes a la Muestra 3 del tratamiento con residuos de palma africana (HAML) para la Muestra 3. Estos datos fueron parte del conjunto de diez muestras experimentales utilizadas para calcular los valores promedio que posteriormente se emplearon en la construcción de la representación lineal del modelo de Langmuir, incluida en la sección de Resultados como Figura 9.

Figura 21: Construcción de la representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo, a partir de los valores de la Muestra 3 obtenidos experimentalmente



Fuente: Elaboración propia (2025)

Esta figura presenta la representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo, construida a partir de los valores promedio de concentración de equilibrio (C_e) y la relación C_e/q_e obtenidos experimentalmente para la Muestra 3. Los datos utilizados para elaborar esta gráfica provienen del Cuadro 58. A partir de esta representación se obtuvieron la pendiente y la ordenada al origen de la recta, lo cual permitió estimar los parámetros característicos del modelo de Langmuir: la capacidad máxima de adsorción (Q_m), la constante de afinidad o de Langmuir (K_L) y el coeficiente de determinación (R^2).

Cuadro 59: Parámetros del modelo de Langmuir obtenidos de cada una de las muestras del tratamiento con residuos de palma africana (HAMLCD)

No. De muestra	m (g/mg)	Qm (mg/g ±0.3170)	b (g/L)	KL (L/mg ±0.0011)	R ²
1	0.0777	12.8768	2.0958	0.0371	0.9501
2	0.0620	16.1351	2.2956	0.0270	0.9790
3	0.0764	13.0863	2.1149	0.0361	0.9822
Promedio	0.0720	13.8979	2.1689	0.0332	0.9869

Fuente: Elaboración propia (2025)

En este cuadro se presentan los parámetros del modelo de Langmuir obtenidos individualmente para cada una de las tres muestras a partir del tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo. Los valores de pendiente (m) y la ordenada al origen (b), capacidad máxima de adsorción (Qm), constante de afinidad o de Langmuir (KL) y el coeficiente de determinación (R²) fueron calculados a partir de las respectivas gráficas de representación lineal construidas para cada muestra, utilizando los valores específicos de concentración de equilibrio (Ce) y la relación Ce/qe.

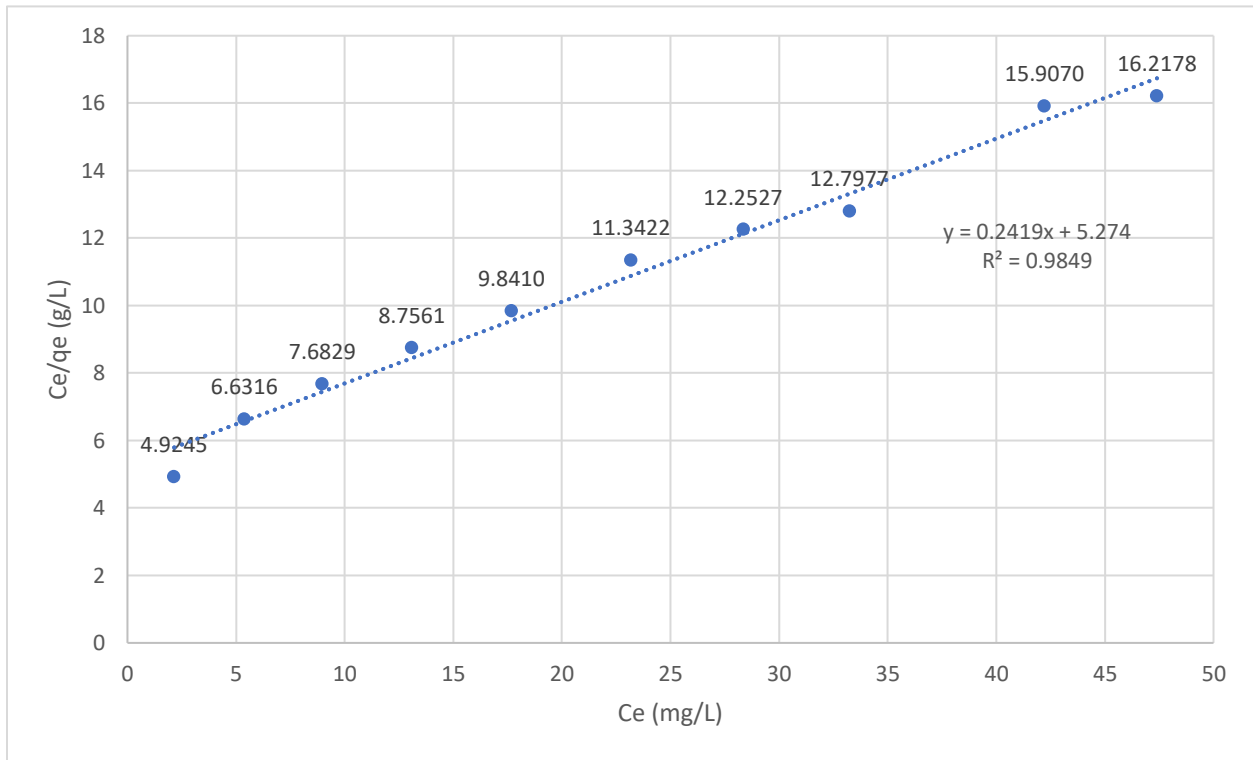
Cuadro 60: Valores de la Muestra 1 de Ce y Ce/qe para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo

C0 (mg/L ±0.010)	Ce Muestra 1 (mg/L ±0.027)	Ce/qe Muestra 1 (g/L ±0.031)
10	2.1481	4.9245
20	5.3846	6.6316
30	8.9744	7.6829
40	13.0903	8.7561
50	17.6736	9.8410
60	23.1930	11.3422
70	28.3509	12.2527
80	33.2432	12.7977
90	42.2222	15.9070
100	47.3958	16.2178

Fuente: Elaboración propia (2025)

En este cuadro se presentan los valores promedio de concentración de equilibrio (Ce) y la relación Ce/qe correspondientes a la Muestra 1 del tratamiento con carbón activado comercial para la Muestra 1. Estos datos fueron parte del conjunto de diez muestras experimentales utilizadas para calcular los valores promedio que posteriormente se emplearon en la construcción de la representación lineal del modelo de Langmuir, incluida en la sección de Resultados como Figura 10.

Figura 22: Construcción de la representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo, a partir de los valores de la Muestra 1 obtenidos experimentalmente



Fuente: Elaboración propia (2025)

Esta figura presenta la representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo, construida a partir de los valores promedio de concentración de equilibrio (C_e) y la relación C_e/q_e obtenidos experimentalmente para la Muestra 1. Los datos utilizados para elaborar esta gráfica provienen del Cuadro 60. A partir de esta representación se obtuvieron la pendiente y la ordenada al origen de la recta, lo cual permitió estimar los parámetros característicos del modelo de Langmuir: la capacidad máxima de adsorción (Q_m), la constante de afinidad o de Langmuir (K_L) y el coeficiente de determinación (R^2).

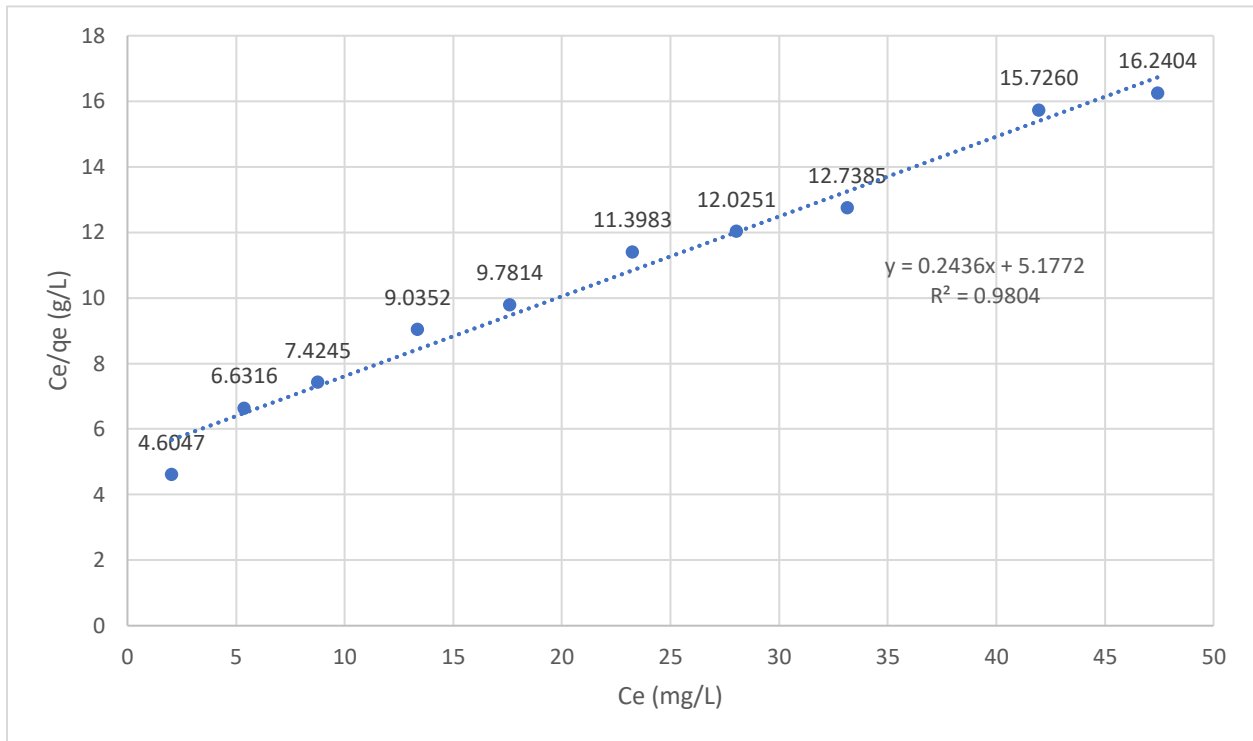
Cuadro 61: Valores de la Muestra 2 de Ce y Ce/qe para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo

C0 (mg/L ±0.010)	Ce Muestra 2 (mg/L ±0.027)	Ce/qe Muestra 2 (g/L ±0.031)
10	2.0370	4.6047
20	5.3846	6.6316
30	8.7607	7.4245
40	13.3681	9.0352
50	17.6042	9.7814
60	23.2632	11.3983
70	28.0351	12.0251
80	33.1532	12.7385
90	41.9658	15.7260
100	47.4306	16.2404

Fuente: Elaboración propia (2025)

En este cuadro se presentan los valores promedio de concentración de equilibrio (Ce) y la relación Ce/qe correspondientes a la Muestra 2 del tratamiento con carbón activado comercial para la Muestra 2. Estos datos fueron parte del conjunto de diez muestras experimentales utilizadas para calcular los valores promedio que posteriormente se emplearon en la construcción de la representación lineal del modelo de Langmuir, incluida en la sección de Resultados como Figura 10.

Figura 23: Construcción de la representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo, a partir de los valores de la Muestra 2 obtenidos experimentalmente



Fuente: Elaboración propia (2025)

Esta figura presenta la representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo, construida a partir de los valores promedio de concentración de equilibrio (C_e) y la relación C_e/q_e obtenidos experimentalmente para la Muestra 2. Los datos utilizados para elaborar esta gráfica provienen del Cuadro 61. A partir de esta representación se obtuvieron la pendiente y la ordenada al origen de la recta, lo cual permitió estimar los parámetros característicos del modelo de Langmuir: la capacidad máxima de adsorción (Q_m), la constante de afinidad o de Langmuir (K_L) y el coeficiente de determinación (R^2).

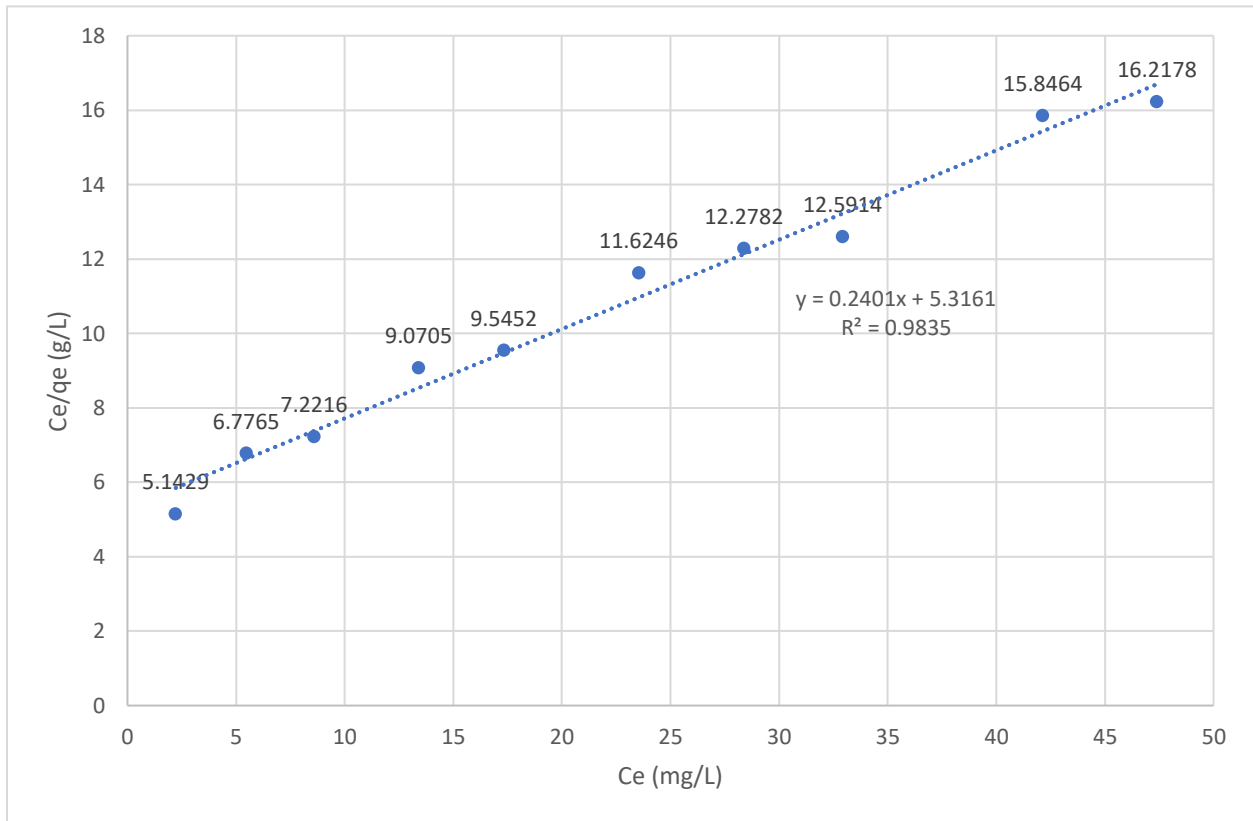
Cuadro 62: Valores de la Muestra 3 de Ce y Ce/qe para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo

C0 (mg/L ±0.010)	Ce Muestra 3 (mg/L ±0.027)	Ce/qe Muestra 3 (g/L ±0.031)
10	2.2222	5.1429
20	5.4701	6.7765
30	8.5897	7.2216
40	13.4028	9.0705
50	17.3264	9.5452
60	23.5439	11.6246
70	28.3860	12.2782
80	32.9279	12.5914
90	42.1368	15.8464
100	47.3958	16.2178

Fuente: Elaboración propia (2025)

En este cuadro se presentan los valores promedio de concentración de equilibrio (Ce) y la relación Ce/qe correspondientes a la Muestra 3 del tratamiento con carbón activado comercial para la Muestra 3. Estos datos fueron parte del conjunto de diez muestras experimentales utilizadas para calcular los valores promedio que posteriormente se emplearon en la construcción de la representación lineal del modelo de Langmuir, incluida en la sección de Resultados como Figura 10.

Figura 24: Construcción de la representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo, a partir de los valores de la Muestra 3 obtenidos experimentalmente



Fuente: Elaboración propia (2025)

Esta figura presenta la representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo, construida a partir de los valores promedio de concentración de equilibrio (C_e) y la relación C_e/q_e obtenidos experimentalmente para la Muestra 3. Los datos utilizados para elaborar esta gráfica provienen del Cuadro 62. A partir de esta representación se obtuvieron la pendiente y la ordenada al origen de la recta, lo cual permitió estimar los parámetros característicos del modelo de Langmuir: la capacidad máxima de adsorción (Q_m), la constante de afinidad o de Langmuir (K_L) y el coeficiente de determinación (R^2).

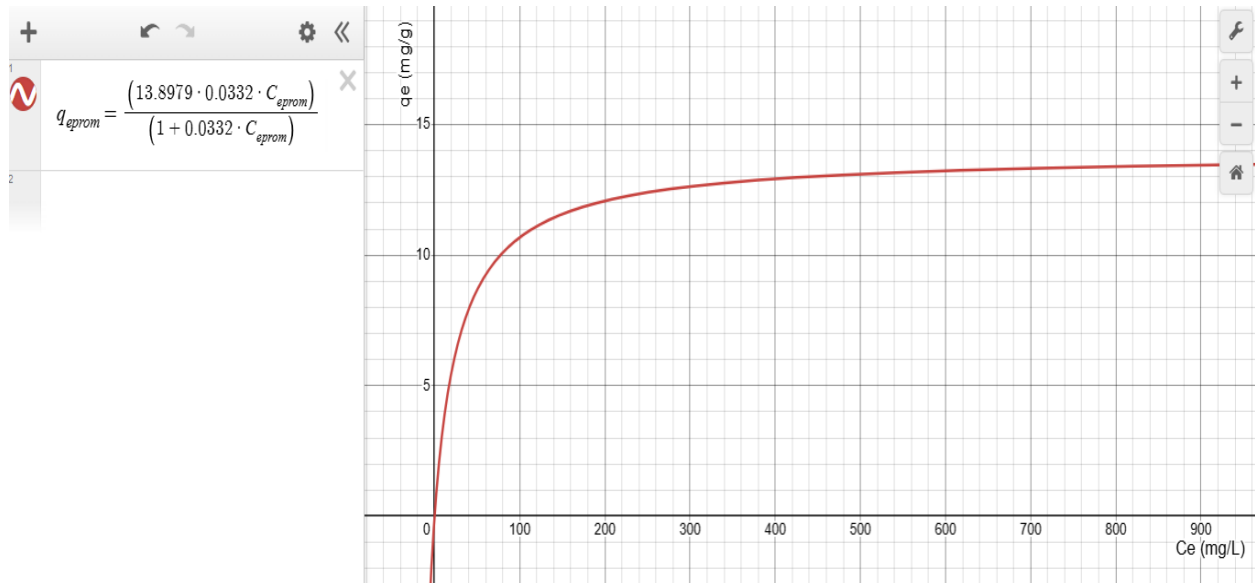
Cuadro 63: Parámetros del modelo de Langmuir obtenidos a partir de cada una de las muestras del carbón activado comercial

No. De muestra	m (g/mg)	Qm (mg/g ±0.3170)	b (g/L)	KL (L/mg ±0.0011)	R ²
1	0.2419	4.1347	5.2740	0.0459	0.9849
2	0.2436	4.1053	5.1772	0.0471	0.9804
3	0.2401	4.1653	5.3161	0.0452	0.9835
Promedio	0.2418	4.1357	5.2568	0.0460	0.9836

Fuente: Elaboración propia (2025)

En este cuadro se presentan los parámetros del modelo de Langmuir obtenidos individualmente para cada una de las tres muestras a partir del tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo. Los valores de pendiente (m) y la ordenada al origen (b), capacidad máxima de adsorción (Qm), constante de afinidad o de Langmuir (KL) y el coeficiente de determinación (R²) fueron calculados a partir de las respectivas gráficas de representación lineal construidas para cada muestra, utilizando los valores específicos de concentración de equilibrio (Ce) y la relación Ce/qe.

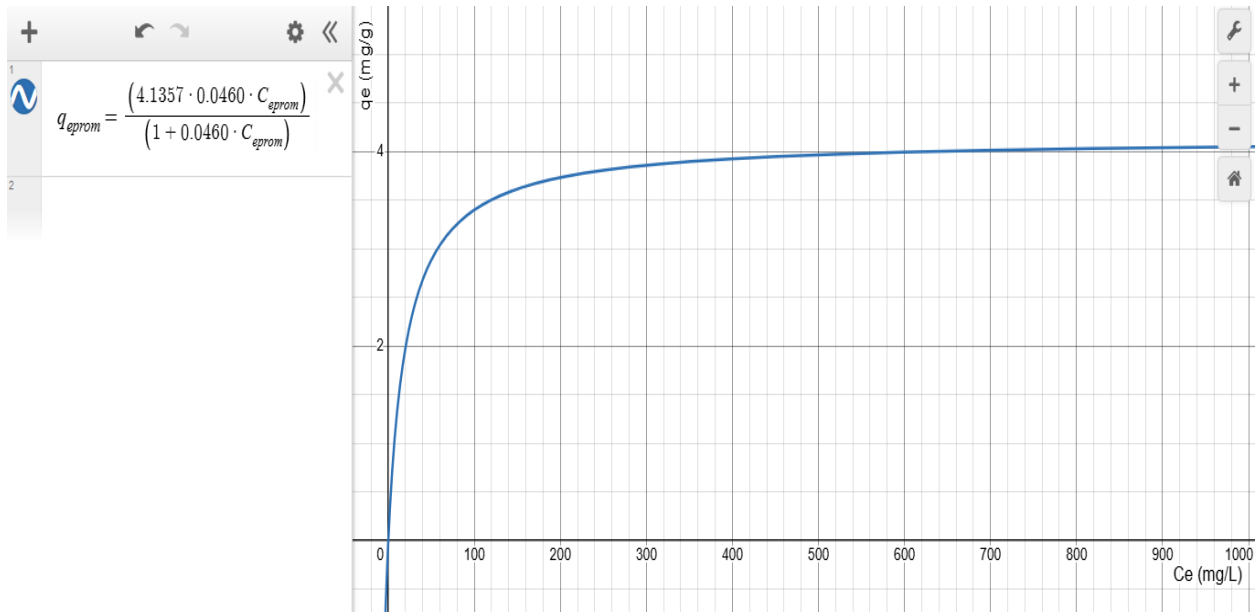
Figura 25: Representación no lineal del modelo de Langmuir utilizando los parámetros promedio del tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo



Fuente: Elaboración propia (2025) con apoyo de la plataforma Desmos

En esta figura se muestra la representación no lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con residuos de palma africana con hidrólisis ácida como pretratamiento y molienda con licuadora (HAML) y colorante directo, construida a partir de la ecuación original del modelo y utilizando los valores promedio de Q_m y KL obtenidos experimentalmente, los cuales fueron reportados previamente en la sección de Resultados. La gráfica fue elaborada en la plataforma Desmos y permite visualizar el comportamiento teórico del sistema sin recurrir a la forma linealizada.

Figura 26: Representación no lineal del modelo de Langmuir utilizando los parámetros promedio del tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo



Fuente: Elaboración propia (2025) con apoyo de la plataforma Desmos

En esta figura se muestra la representación no lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo, construida a partir de la ecuación original del modelo y utilizando los valores promedio de Qm (Capacidad máxima de adsorción) y KL (Constante de Langmuir) obtenidos experimentalmente, los cuales fueron reportados previamente en la sección de Resultados. La gráfica fue elaborada en la plataforma Desmos y permite visualizar el comportamiento teórico del sistema sin recurrir a la forma linealizada.

C. Datos de placa

Cuadro 64: Datos de placa del tamizador

Marca	W.S. Tyler
Modelo	RX-29
Tipo	ROTAP
Serie	19183

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 65: Datos de placa de la balanza

Marca	OHAUS
Modelo	V31XH2
Serie	B652517672

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 66: Datos de placa de la balanza analítica

Marca	OHAUS
Modelo	PA114
Serie	8329290114

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 67: Espectrofotómetro UV-VIS

Marca	Shimadzu
Modelo	206-89175-92
Tipo	UV-VIS
Serie	A1093433430705

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 68: Datos de placa del horno secador

Marca	VWR
Modelo	414CCA-550
Tipo	Gravity Convection Oven
Serie	0410042611A1013

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 69: Datos de placa del shaker

Marca	Lab Companion
Modelo	SI-600
Tipo	Incubated Shaker
Serie	P118043

Fuente: Elaboración propia (2025)

D. Cálculos de muestras

Ecuación 1: Nota individual de cada criterio

$$\text{Nota individual} = \text{Peso (\%)} * \text{Puntuación}$$

$$\text{Eficiencia de remoción de color de la adsorción} = 3 * 0.25 = 0.75$$

De esta manera se calcularon todas las notas individuales del Cuadro 2. El ejemplo de cálculo es para la eficiencia de remoción de color de la adsorción.

Ecuación 2: Puntaje total sobre 3

$$\text{Puntaje total sobre 3} = \sum \text{Nota individual}$$

$$\text{Puntaje total sobre 3} = 0.75 + 0.75 + 0.20 + 1.20 = 2.90$$

De esta manera se calcularon todos los puntajes sobre 3 del Cuadro 2. El ejemplo de cálculo es para el puntaje total sobre 3 de la adsorción.

Ecuación 3: Nota de cada tratamiento en porcentaje

$$\text{Nota en porcentaje} = \frac{\text{Puntaje sobre 3}}{3} * 100\%$$

$$\text{Nota en porcentaje} = \frac{2.90}{3} * 100\% = 96.67\%$$

De esta manera se calcularon todas las notas en porcentaje del Cuadro 2. El ejemplo de cálculo es para la nota en porcentaje de la adsorción.

Ecuación 4: Costo de la cantidad de insumo necesario

$$\text{Costo del Insumo} = \text{Cotizacion} * \text{Cantidad del insumo necesario}$$

$$\text{Costo del Insumo} = \frac{428.00 \text{ GTQ}}{500g \text{ NaOH}} * 1000g \text{ NaOH} = 856.00 \text{ GTQ}$$

De esta manera se calcularon todos los costos de los insumos del Cuadro 23. El ejemplo de cálculo es para determinar el costo de NaOH que se necesita para la adsorción con el pretratamiento de adsorción básica, para tratar un kilogramo de residuos de palma africana.

Ecuación 5: Costo total de los insumos

$$\text{Costo total de los insumos} = \sum \text{Costo del insumo}$$

$$\text{Costo total de los insumos} = 856.00 \text{ GTQ} + 11.64 \text{ GTQ} = 867.64 \text{ GTQ}$$

De esta manera se calcularon todos los costos totales de los insumos del Cuadro 23. El ejemplo de cálculo es para determinar costo total de insumos que se necesita para la adsorción con el pretratamiento de adsorción básica, para tratar un kilogramo de residuos de palma africana.

Ecuación 6: Porcentaje de retención en cada plato de la tamizadora

$$\% \text{ de retención} = \frac{\text{Peso final del plato} - \text{Peso inicial del plato}}{\text{Masa total que se tamizó}} * 100\%$$

$$\% \text{ de retención SPSM Corrida 3, No. 20} = \frac{396.9g - 381.9g}{20g} * 100\% = 75.00\%$$

De esta manera se calcularon todos los porcentajes de retención de cada uno de los platos de todos los cuadros del **Apéndice**. El ejemplo de cálculo es para el porcentaje de retención para SPSM en la tercera corrida para el plato No.20.

Ecuación 7: Cálculo del diámetro efectivo (D_{10}), Diametro D_{30} y Diametro D_{60}

Se realiza una interpolación lineal en escala semilogarítmica entre los platos donde el porcentaje que pasa por el tamiz (10%, 30% o 60%). Donde el valor conocido es el porcentaje que pasa (10%, 30% o 60%), los valores de “x” conocidos son el porcentaje que pasa por cada plato y los valores de “y” son la apertura de las mallas de cada plato.

$$\log(D) = \log(D_1) + \frac{P - P_1}{P_2 - P_1} * (\log(D_2) - \log(D_1))$$

Donde:

- D = Diametro (D_{10} , D_{30} o D_{60})
- D_1 = Apertura de la malla 1
- D_2 = Apertura de la malla 2
- P = 10%, 30% o 60%
- P_1 = Porcentaje que pasa en el plato 1
- P_2 = Porcentaje que pasa en el plato 2

Si el 30% o el 60% que pasa es menor al primer plato (El tamaño de partícula es superior a la primera malla) es necesario hacer una extrapolación.

$$m = \frac{\log(D_2) - \log(D_1)}{P_2 - P_1}$$

$$b = \log(D_1) - m * P_1$$

$$\log(D) = m * P + b$$

Donde:

- D = Diametro (D_{10} , D_{30} o D_{60})
- D_1 = Apertura de la malla 1
- D_2 = Apertura de la malla 2
- P = 10%, 30% o 60%
- P_1 = Porcentaje que pasa en el plato 1
- P_2 = Porcentaje que pasa en el plato 2
- m = Pendiente de la recta
- b = Intercepto en el eje y

Para SPSM corrida 3 D_{10}

Interpolación lineal en escala semilogarítmica donde el valor conocido es 10% que pasa entre la malla No. 30 (15%) y la malla No. 45 (7%). La apertura de la malla No. 30 es de 0.600mm y para la malla No. 45 es de 0.354mm.

$$\log(D_{10}) = \log(0.600) + \frac{10\% - 15\%}{7\% - 15\%} * (\log(0.354) - \log(0.600))$$

$$\log(D_{10}) = -0.3656$$

$$D_{10} = 10^{-0.3656} = 0.430mm$$

Para SPSM corrida 3 D_{30} y D_{60}

Extrapolación lineal en escala semilogarítmica donde el valor conocido son 30 y 60% que pasa entre la malla No. 20 (25%) y la malla No. 30 (7%). La apertura de la malla No. 20 es de 0.841mm y para la malla No. 30 es de 0.600mm.

$$m = \frac{\log(0.600) - \log(0.841)}{15\% - 25\%} = 0.0146645$$

$$b = \log(0.841) - 0.0146645 * 25\% = -0.4418159$$

$$\log(D_{30}) = 0.0146645 * 30\% - 0.4418159 = -0.00137$$

$$D_{30} = 10^{-0.00137} = 0.996$$

$$\log(D_{60}) = 0.0146645 * 60\% - 0.4418159 = 0.43705$$

$$D_{60} = 10^{0.43705} = 2.74mm$$

De esta manera se calcularon todos los D_{10} , D_{30} y D_{60} apartir los cuadros del **Apéndice** de SPSM. El promedio de este estos valores se pueden encontrar en el Cuadro 25. El ejemplo de cálculo es para el SPSM corrida 3.

Ecuación 8: Coeficiente de uniformidad (Cu)

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

$$C_u = \frac{2.72mm}{0.458mm} = 5.94mm$$

A partir de los datos del Cuadro 25 se terminó el coeficiente de uniformidad de este mismo cuadro.

Ecuación 9: Coeficiente de curvatura (Cc)

$$Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} * D_{10}}$$

$$Cc = \frac{(0.967mm)^2}{2.72mm * 0.458mm} = 0.75$$

A partir de los datos del Cuadro 25 se terminó el coeficiente de uniformidad de este mismo cuadro.

Ecuación 10: Porcentaje de remoción de las lecturas espectrofotométricas

$$\% \text{ de remoción} = \frac{A_0 - A}{A_0} * 100\%$$

Donde:

- A_0 = Lectura de Absorbancia inicial
- A = Lectura de Absorbancia final

$$\% \text{ de remoción} = \frac{0.621 \pm 0.0005 - 0.154 \pm 0.0005}{0.621 \pm 0.0005} * 100\% = 75.20\% \pm 0.13\%$$

De esta forma se calcularon todos los porcentajes de remoción de los adsorbentes a lo largo del proyecto de graduación. El ejemplo de cálculo es para el porcentaje de remoción para la Lectura 1 de HAMLCD1.

Ecuación 11: Efecto sobre la media global de cada nivel

$$\text{Efecto sobre la media global} = \text{media de remoción de cada nivel} - \text{Media de remoción global}$$

$$\text{Efecto sobre la media global de HA} = 65.92\% \pm 1.26\% - 36.49\% \pm 2.53\% = 29.44\% \pm 2.83\%$$

De esta forma se calcularon todos los efectos sobre la media global de cada uno de los niveles del Cuadro 36. El ejemplo de cálculo es para HA, de ese mismo cuadro.

Ecuación 12: Efecto absoluto sobre la media global

$$\text{Efecto absoluto sobre la media global} = |\text{Efecto sobre la media global}|$$

$$\text{Efecto absoluto sobre la media global HB} = |-39.49\% \pm 2.83\%| = 39.49\% \pm 2.83\%$$

De esta forma se calcularon todos los efectos absolutos sobre la media global de cada uno de los niveles del Cuadro 36. El ejemplo de cálculo es para el HB, de ese mismo cuadro.

Ecuación 13: Influencia porcentual promedio de los factores sobre la remoción media de color

Influencia promedio de los factores

$$= \frac{\sum \text{Efecto absoluto sobre la media global de cada nivel de cada factor}}{\text{Cantidad de niveles de cada factor}}$$

Influencia promedio de los factores

$$= \frac{(15.41\% \pm 2.83\%) + (29.44\% \pm 2.83\%) + (39.49\% \pm 2.83\%) + (5.36\% \pm 2.83\%)}{4}$$

$$= 22.43\% \pm 2.83\%$$

De esta forma se calcularon todas las influencias promedio de cada uno de los factores sobre la remoción media de color del Cuadro 37. El ejemplo de cálculo es para el factor de pretratamiento.

Ecuación 14: Corrección de las lecturas espectrofotométricas por el blanco

$$\text{Lectura Corregida} = \text{Lectura original} - \text{Media de las lecturas del blanco}$$

Lectura corregida HAMLCD Triplicado 1 Concentración inicial $10 = 0.017 - 0.007 = 0.010$

De esta manera se realizaron todas las correcciones por el blanco a lo largo del trabajo. El ejemplo de cálculo es para la lectura 1 corregida de HAML con colorante directo del Triplicado 1 con una concentración inicial de colorante de 10 mg/L.

Ecuación 15: Concentración de equilibrio (C_e) estimada a partir de la curva de calibración

Para encontrar la concentración en equilibrio se realiza una interpolación lineal donde el valor de “x” es conocida. La interpolación lineal se hace con la curva de calibración, entre los puntos en donde se encuentre la “x” conocida.

Interpolación lineal donde “x” conocida $x = 0.010$, puntos de la curva de calibración (0.000, 0 (mg/L)) y (0.018, 2 (mg/L)), donde en los puntos x es la lectura de la absorbancia y en el punto y es la concentración de colorante (mg/L). Para este caso el resultado de la interpolación lineal es de 1.111 mg/L

De esta manera se calcularon todas las concentraciones en equilibrio (C_e) a lo largo del trabajo. El ejemplo de cálculo es para la muestra de HAML con colorante directo, 1 en el triplicado, con una concentración inicial de 10 mg/L y C_{e1} .

Ecuación 16: Capacidad de adsorción en equilibrio (q_e)

$$q_e = (C_{0,colorante} - C_{e,prom}) * \frac{V}{M_{adsorbente}}$$

Donde:

- q_e = Capacidad de adsorción en equilibrio (mg/g)
- $C_{0,colorante}$ = Concentración inicial de colorante (mg/L)
- $C_{e,prom}$ = Concentración en equilibrio promedio (mg/L)
- V = Volumen de la solución (L)
- $M_{adsorbente}$ = Masa del adsorbente (g)

$$q_e = \left(\left(10 \pm 0.01 \left(\frac{mg}{L} \right) \right) - \left(1.000 \pm 0.01 \left(\frac{mg}{L} \right) \right) \right) * \frac{0.050 \pm 0.0005 (L)}{0.9 \pm 0.01 (g)} = 0.5000 \frac{mg}{g} \pm 0.0075$$

De esta forma se calcularon todas las capacidades de adsorción promedio (q_e promedio) a lo largo del trabajo. El ejemplo de cálculo es para la muestra de HAML con colorante directo, Triplicado 1 y concentración inicial de colorante de 10 mg/L.

Ecuación 17: Relación C_e/q_e

$$\text{Relación } \frac{C_e}{q_e} \left(\frac{g}{L} \right) = \frac{\text{Concentración en equilibrio } (C_e) \left(\frac{mg}{L} \right)}{\text{Capacidad de adsorción en equilibrio } (q_e) \left(\frac{mg}{g} \right)}$$

$$\frac{C_e}{q_e} \text{ promedio} = \frac{1.000 \pm 0.027 \left(\frac{mg}{L} \right)}{0.5000 \pm 0.0075 \left(\frac{mg}{g} \right)} = 2.000 \pm 0.031 \left(\frac{g}{L} \right)$$

De esta forma se calcularon todas las relaciones C_e/q_e a lo largo del trabajo. El ejemplo de cálculo fue para calcular la relación C_e/q_e promedio para HAML con colorante directo para la 1 del triplicado, con una concentración inicial de colorante de 10 mg/L.

Ecuación 18: Capacidad máxima de adsorción (Q_m)

$$Q_m = \frac{1}{m}$$

Donde:

- $Q_m \left(\frac{mg}{g} \right)$ = Capacidad máxima de adsorción
- $m \left(\frac{g}{mg} \right)$ = pendiente de la isoterma de Langmuir linealizada

$$Q_m = \frac{1}{0.0720 \left(\frac{g}{mg} \right)} = 13.8979 \pm 0.3170 \left(\frac{mg}{g} \right)$$

De esta forma se calculó la capacidad máxima de adsorción a lo largo del trabajo. El ejemplo de cálculo es para determinar la capacidad máxima de adsorción promedio de HAMLCD.

Ecuación 19: Constante de Langmuir (KL)

$$K_L = \frac{1}{Q_m * b}$$

Donde:

- $K_L \left(\frac{L}{mg} \right)$ = Constante de Langmuir
- $Q_m \left(\frac{mg}{g} \right)$ = Capacidad máxima de adsorción
- $b \left(\frac{g}{L} \right)$ = Intercepto de la isoterma de Langmuir linealizada con el eje “y”

$$K_L = \frac{1}{\left(13.8979 \pm 0.3170 \left(\frac{mg}{g} \right) \right) * \left(2.1689 \left(\frac{g}{L} \right) \right)} = 0.0332 \pm 0.0011 \left(\frac{L}{mg} \right)$$

De esta forma se calculó la constante de Langmuir a lo largo del trabajo. El ejemplo de cálculo es para la constante de Langmuir de HAMLCD promedio.

Ecuación 20: Forma no lineal de la isoterma de Langmuir

$$q_e = \frac{Q_m * K_L * C_e}{1 + K_L * C_e}$$

Donde:

- $q_e \left(\frac{mg}{g} \right)$ = Capacidad de adsorción en equilibrio
- $C_e \left(\frac{mg}{L} \right)$ = Concentración en equilibrio
- $K_L \left(\frac{L}{mg} \right)$ = Constante de Langmuir
- $Q_m \left(\frac{mg}{g} \right)$ = Capacidad máxima de adsorción

$$q_{e,prom} = \frac{13.8979 \left(\frac{mg}{g}\right) * 0.0332 \left(\frac{L}{mg}\right) * C_{e,prom} \left(\frac{mg}{L}\right)}{1 + 0.0332 \left(\frac{L}{mg}\right) * C_{e,prom} \left(\frac{mg}{L}\right)}$$

De esta forma se calcularon todas las isothermas de Langmuir en su forma no linealizada a lo largo del trabajo. El ejemplo de cálculo es para la isoterma de Langmuir no linealizada promedio.

Ecuación 21: Requerimiento mínimo del proceso

$$Q_{min} = m_s * c_{p,s} * (T_f - T_i) + m_{H_2O} * c_{p,w} * (T_f - T_i) + m_{H_2O} * h_{fg}$$

Donde:

- $Q_{min} (kJ)$ = Requerimiento mínimo de energía del lote para calentar el sólido y el agua desde T_0 hasta T y evaporar el agua
- $m_s (g)$ = Masa de sólidos secos
- $c_{p,s} \left(\frac{J}{g * K}\right)$ = calor específico promedio del sólido ≈ 1.3 (aproximado)
- $T_f (K)$ = Temperatura final
- $T_i (K)$ = Temperatura inicial
- $m_{H_2O} (g)$ = Masa de agua evaporada
- $c_{p,w} \left(\frac{J}{g * K}\right)$ = calor específico del agua líquida ≈ 4.18
- $h_{fg} \left(\frac{J}{g}\right)$ = Calor latente de vaporización del agua a la temperatura de operación $\approx 2,358,000$ J/kg

$$Q_{min} = 660.7 g_{palma} * 1.3 \left(\frac{J}{g_{palma} * K}\right) * (65 K - 16K) + 68.4 g_{H_2O} * 4.18 \left(\frac{J}{g_{H_2O} * K}\right) * (65 K - 16K) \\ + 660.7 g_{palma} * 2,358 \left(\frac{J}{g_{palma}}\right) = 1,614,026.88J = 1,614.03 kJ$$

De esta forma se calculó el requerimiento de energía mínima para evaporar toda el agua de los residuos de palma africana después de su lavado, para el balance de masa y energía.

Ecuación 22: Consumo eléctrico del horno

$$E_{el} = P * f * t$$

Donde:

- $E_{el} (J)$ = Energía eléctrica entregada por la resistencia
- $P \left(\frac{J}{s}\right)$ = Potencia nominal de la resistencia cuando está encendida $\rightarrow P = 1.7 \text{ kJ/s}$
- $t (s)$ = Tiempo de actividad del horno $\rightarrow t = 48\text{h} = 172,800\text{s}$
- f = Factor de encendido (duty cycle) $\rightarrow f = 0.4$

$$E_{el} = 1.4 \left(\frac{kJ}{s}\right) * 0.4 * 172,800 (s) = 96,768.00 \text{ kJ}$$

De esta forma se calculó la energía entregada al sistema por la resistencia al horno secador para el balance de masa y energía.

Ecuación 23: Calor perdido

$$Q_{p\acute{e}rdidas} = E_{el} - Q_{min}$$

Donde:

- $Q_{p\acute{e}rdidas} (kJ)$ = es el calor perdido
- $E_{el} (kJ)$ = Energía eléctrica entregada por la resistencia
- $Q_{min} (kJ)$ = Requerimiento mínimo de energía del lote para calentar el sólido y el agua desde T_0 hasta T y evaporar el agua

$$Q_{p\acute{e}rdidas} = 96,768.00 \text{ kJ} - 1,614.03 \text{ kJ} = 95,153.97 \text{ kJ}$$

De esta forma se calculó el calor perdido del sistema del balance de masa y energía del trabajo de graduación.

E. Análisis de error

Ecuación 24: Incertidumbre de cálculos que involucran sumas y restas

$$S_y = \sqrt{(S_a)^2 + (S_b)^2 + (S_c)^2 + \dots + (S_n)^2}$$

Donde:

- S_n = Incertidumbre individual de cada medición
- S_y = Incertidumbre final

$$S_y = \sqrt{(0.13\%)^2 + (0.13\%)^2 + (0.13\%)^2 + (0.13\%)^2} = 0.26\%$$

De esta forma se calculó la incertidumbre de todos los cálculos que involucran sumas o restas a lo largo del trabajo de graduación. El ejemplo de cálculo es para la incertidumbre del porcentaje de remoción promedio de cada muestra.

Ecuación 25: Incertidumbre de cálculos que involucran multiplicaciones o divisiones

$$S_y = y * \sqrt{\left(\frac{S_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{S_b}{b}\right)^2 + \left(\frac{S_c}{c}\right)^2 \dots \left(\frac{S_n}{n}\right)^2}$$

Donde:

- S_n = Incertidumbre individual de cada medición
- a, b, n = Mediciones individuales
- y = Valor final
- S_y = Incertidumbre final

$$S_y = 100 \frac{mg}{L} * \sqrt{\left(\frac{0.0001g}{0.100g}\right)^2 + \left(\frac{0.01L}{1L}\right)^2} = 1.01 mg/L$$

De esta forma se calculó la incertidumbre de todos los calculos que involucran multiplicaciones o divisiones a lo largo del trabajo de graduación. El ejemplo de cálculo es para la incertidumbre del Cuadro 7.

Ecuación 26: Media o promedio

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

Donde:

- \bar{x} = Media o promedio
- x_i = Cada valor individual dentro del conjunto de datos
- n = Número total de datos o elementos en el conjunto

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{(75.20\% \pm 0.13\%) + (72.95\% \pm 0.13\%) + (73.93\% \pm 0.13\%) + (73.23\% \pm 0.13\%)}{4} \\ &= 73.83\% \pm 0.26\% \end{aligned}$$

De esta forma se calculó el promedio o media de todos los calculos realizados a lo del trabajo de graduación. El ejemplo de cálculo es para el promedio del porcentaje de remoción del HAMLCD1 del Cuadro 28.

Ecuación 27: Desviación estándar

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Donde:

- S = Desviación Estándar

- \bar{x} = Media o promedio
- x_i = Cada valor individual dentro del conjunto de datos
- n = Número total de datos o elementos en el conjunto

Esta fórmula se utilizó para calcular la desviación estándar del Cuadro 31 y a lo largo del trabajo.

Ecuación 28: Intervalo de confianza

$$IC = \bar{x} \pm t_{\frac{\alpha}{2}, gl} * \frac{S}{\sqrt{n}}$$

Donde:

- IC = Intervalo de Confianza
- S = Desviación Estándar
- \bar{x} = Media o promedio
- $t_{\frac{\alpha}{2}, gl}$ = Valor crítico de la distribución t de Student
- n = Número total de datos o elementos en el conjunto

Esta fórmula se utilizó para calcular los intervalos de confianza del Cuadro 31 y a lo largo del trabajo.

Ecuación 29: Cuartiles

$$Q_k = x_{p, \frac{k(n+1)}{4}}$$

Donde:

- Q_k = Cuartil número k

- k = Número de cuartil
- x_p = Valor del dato en la posición p dentro de la lista ordenada de menor a mayor.
- n = Cantidad de datos o elementos

Esta fórmula se utilizó para calcular los cuartiles del Cuadro 31 y a lo largo del trabajo.

Ecuación 30: Grados de libertad

$$Df = n - 1$$

Donde:

- Df = Grados de Libertad
- n = Cantidad de variables

$$Df \text{ de pretratamiento} = 4 - 1 = 3$$

De esta manera se calcularon todos los grados de libertad a lo largo del trabajo. El ejemplo de cálculo es para los grados de libertad del pretratamiento del Cuadro 4.

Ecuación 31: Suma de cuadrados del factor A (Sum sq)

$$Sum \text{ sq } A = \sum_{i=1}^a n_i (\bar{Y}_i - \bar{Y} \dots)^2$$

Donde:

- Sum sq A = Suma de cuadrados del factor A
- a = Número de niveles del factor
- n_i = Número de observaciones en el nivel i

- \bar{Y}_i = Media de las observaciones de nivel i
- \bar{Y} = Media general de todas las observaciones

De esta forma se calcularon todas las sumatorias de cuadrados de cada factor a lo largo del trabajo. Para realizar estos cálculos se hizo uso del programa de Rstudio con el código que se puede revisar en el **Apéndice**.

Ecuación 32: Suma de cuadrados del error (Residuales)

$$Sum\ sq\ E = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - \bar{Y}_i \dots)^2$$

Donde:

- Sum sq E = Suma de cuadrados del error (residuales)
- a = Número de niveles del factor
- n_i = Número de observaciones en el nivel i
- \bar{Y}_i = Media del grupo al que pertenece Y_{ij}
- Y_{ij} = Cada observación individual

De esta forma se calcularon todas las sumatorias de cuadrados del error a lo largo del trabajo. Para realizar estos cálculos se hizo uso del programa de Rstudio con el código que se puede revisar en el **Apéndice**.

Ecuación 33: Cuadrado medio (Mean sq)

$$Mean\ sq = \frac{Sum\ sq}{Df}$$

Donde:

- Mean sq = Cuadrado medio

- Sum sq = Suma de cuadrados
- Df = Grados de libertad

$$\text{Mean sq pretratamiento} = \frac{25.839}{3} = 8.613$$

De esta forma se calcularon todos los cuadrados medio (mean sq) a lo largo del trabajo. Para realizar estos cálculos se hizo uso del programa de Rstudio con el código que se puede revisar en el **Apéndice**. El ejemplo de cálculo es para el Mean sq del pretratamiento del Cuadro 4.

Ecuación 34: Valor F (F value)

$$\text{Valor } F = \frac{\left(\frac{\text{Sum sq } A}{Df \text{ } A}\right)}{\left(\frac{\text{Sum sq } E}{Df \text{ } E}\right)}$$

Donde:

- Sum sq A = Suma de cuadrados del factor
- Df = Grados de libertad del factor
- Sum Sq E = Suma de cuadrados del error (Residuals)
- Df E = Grados de libertad del error (Residuals)

$$\text{Valor } F = \frac{\left(\frac{25.839}{3}\right)}{\left(\frac{1}{360}\right)} = 3101.164$$

De esta forma se calcularon todos los Valores F (F value) a lo largo del trabajo. Para realizar estos cálculos se hizo uso del programa de Rstudio con el código que se puede revisar en el **Apéndice**. El ejemplo de cálculo es para el F value del pretratamiento del Cuadro 4.

Ecuación 35: Valor P (Pr(>F))

$$\text{Valor } P = P\left(F_{Df_{factor}, Df_{error}} \geq F_{obs}\right)$$

Donde:

- P = Probabilidad, se obtiene de la cola superior de la distribución F.
- F= Distribución F de Snedecor
- Df_{factor} = Grados de libertad del factor
- Df_{error} = Grados de libertad del error (Residuals)
- F_{obs} = Valor F calculado

De esta forma se calcularon todos los Valores P (Pr(>F)) a lo largo del trabajo. Para realizar estos cálculos se hizo uso del programa de Rstudio con el código que se puede revisar en el **Apéndice**.

Ecuación 36: Porcentaje de Variabilidad

$$\% \text{ de Variabilidad} = \frac{\text{Sum } sq \text{ A}}{\sum \text{Sum } sq} * 100\%$$

Donde:

- $\sum \text{Sum } sq$ = Sumatoria de suma de cuadrados de todos los factores
- $\text{Sum } sq \text{ A}$ = Suma de cuadrados del factor A

$$\begin{aligned} \% \text{ Variabilidad} &= \frac{25.839}{25.839 + 1.252 + 1 + 0.58 + 0.26 + 0.136 + 0.078 + 0.003} * 100\% \\ &= 88.65\% \end{aligned}$$

De esta forma se calcularon todos los porcentajes de variabilidad a lo largo del trabajo. El ejemplo de cálculo fue para calcular el porcentaje de variabilidad del Cuadro 4.

Ecuación 37: Comparaciones múltiples de Tukey HSD

$$HSD = q_{\alpha,k,Df_E} * \sqrt{\frac{MS_E}{n}}$$

Criterio de decisión

$$Si |\bar{Y}_i - \bar{Y}_j| > HSD \rightarrow \text{Diferencia Significativa}$$

Donde:

- HSD = Diferencia mínima significativa
- q_{α,k,Df_E} = valor crítico de la distribución studentizada de rango (q) para un nivel de significancia α , con k grupos y Df_E grados de libertad del Error (Residuals).
- MS_E = Cuadrado medio del error (Residuals)
- n = Número de observaciones por grupo (si los grupos son desbalanceados, se usa el promedio armónico de los tamaños de muestra).
- \bar{Y}_i = Media muestral del primer grupo a comparar
- \bar{Y}_j = Media muestral del segundo grupo a comparar

De esta forma se calcularon todas las comparaciones múltiples de Tukey a lo largo del trabajo. Para realizar estos cálculos se hizo uso del programa de Rstudio con el código que se puede revisar en el **Apéndice**.

Ecuación 38: Coeficiente de determinación (R^2)

$$R^2 = 1 - \frac{Sum\ sq\ E}{Sum\ sq\ total}$$

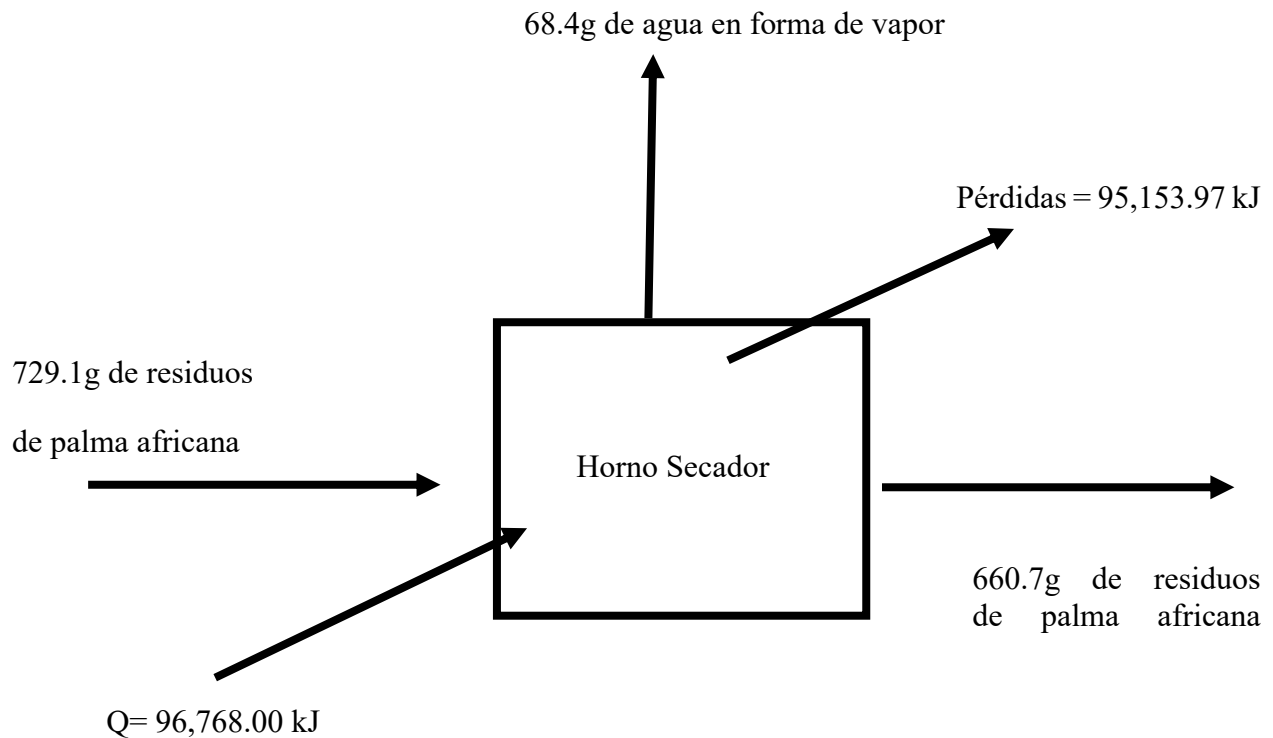
Donde:

- R^2 = Coeficiente de determinación
- $Sum\ sq\ E$ = Suma de cuadrados del error (Residuals)
- $Sum\ sq\ total$ = Suma de cuadrados total

De esta forma se calcularon todos los coeficientes de determinación a lo largo del trabajo de graduación.

F. Balance de masa y energía

Figura 27: Balance de masa y energía para los residuos de palma africana después del lavado



Fuente: Elaboración propia (2025)

El balance de masa y energía muestra cómo se secan los residuos húmedos de palma africana en el horno secador. La muestra húmeda de palma africana se dejó en el horno secador durante 48 horas. El horno se mantuvo a una temperatura constante de 60°C a lo largo del tiempo de secado.

G. Ilustraciones

Figura 28: Imagen de las hidrólisis y activación de los residuos de palma en la campana



Fuente: Elaboración propia (2025) Universidad del Valle de Guatemala, Laboratorio de operaciones unitarias.

Figura 29: Imagen del carbón activado a base de residuos de palma



Fuente: Elaboración propia (2025) Universidad del Valle de Guatemala, Laboratorio de operaciones unitarias.

Figura 30: Imagen de la preparación de muestras



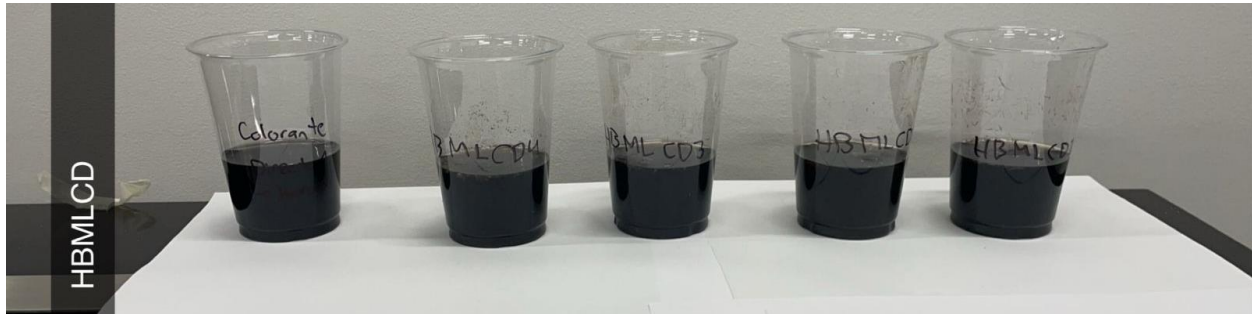
Fuente: Elaboración propia (2025) Universidad del Valle de Guatemala, Laboratorio de operaciones unitarias.

Figura 31: Muestras en el shaker



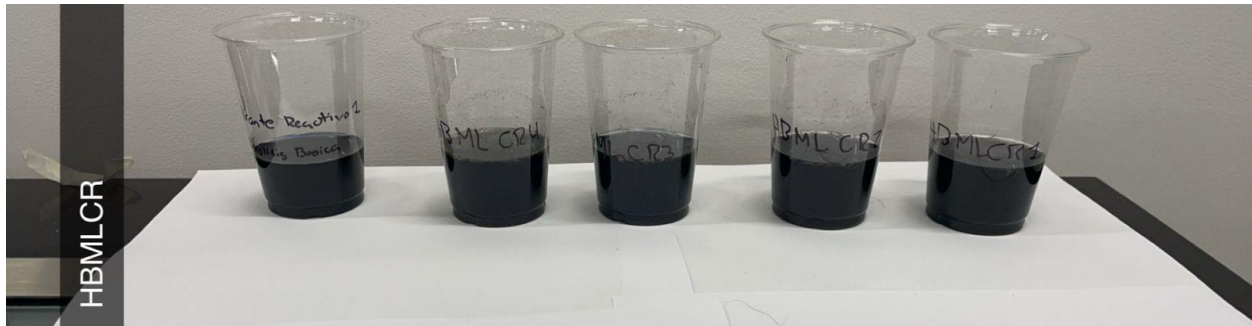
Fuente: Elaboración propia (2025) Universidad del Valle de Guatemala, Laboratorio de operaciones unitarias.

Figura 32: Imagen de la combinación HBMLCD después de la adsorción



Fuente: Elaboración propia (2025) Universidad del Valle de Guatemala, Laboratorio de operaciones unitarias.

Figura 33: Imagen de la combinación HBMLCR después de la adsorción



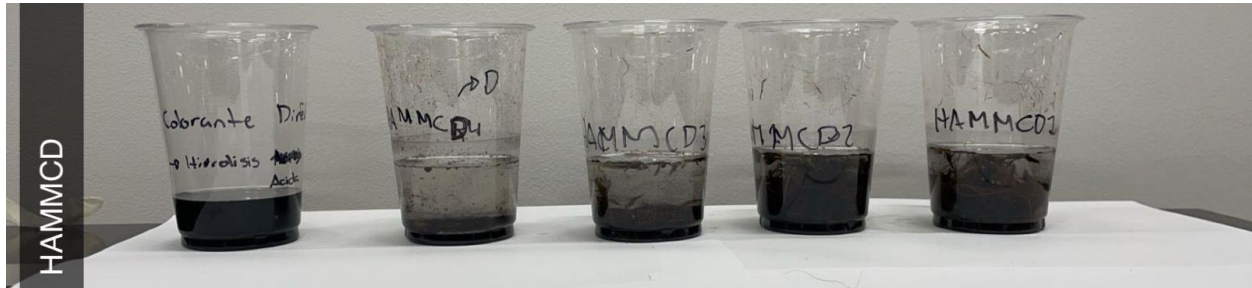
Fuente: Elaboración propia (2025) Universidad del Valle de Guatemala, Laboratorio de operaciones unitarias.

Figura 34: Imagen de la combinación HAMLCD después de la adsorción



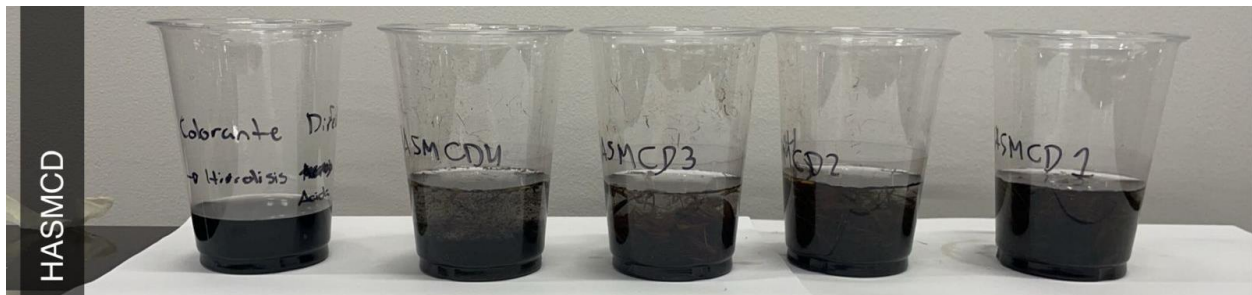
Fuente: Elaboración propia (2025) Universidad del Valle de Guatemala, Laboratorio de operaciones unitarias.

Figura 35: Imagen de la combinación HAMMCD después de la adsorción



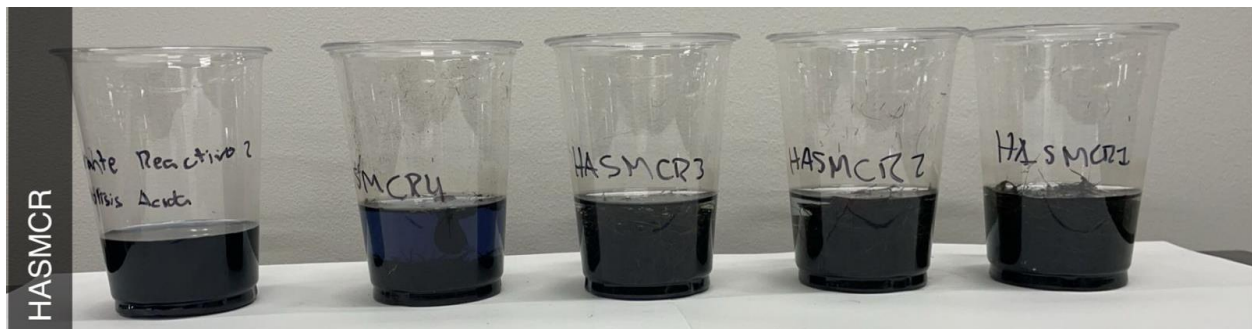
Fuente: Elaboración propia (2025) Universidad del Valle de Guatemala, Laboratorio de operaciones unitarias.

Figura 36: Imagen de la combinación HASMCD después de la adsorción



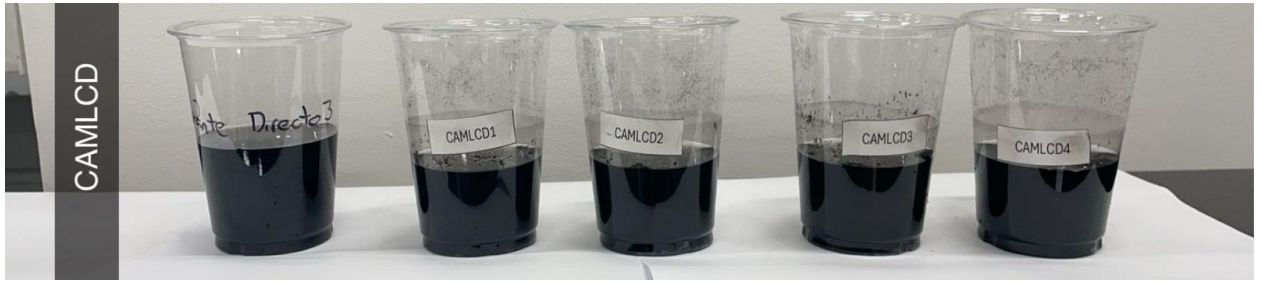
Fuente: Elaboración propia (2025) Universidad del Valle de Guatemala, Laboratorio de operaciones unitarias.

Figura 37: Imagen de la combinación HASMCR después de la adsorción



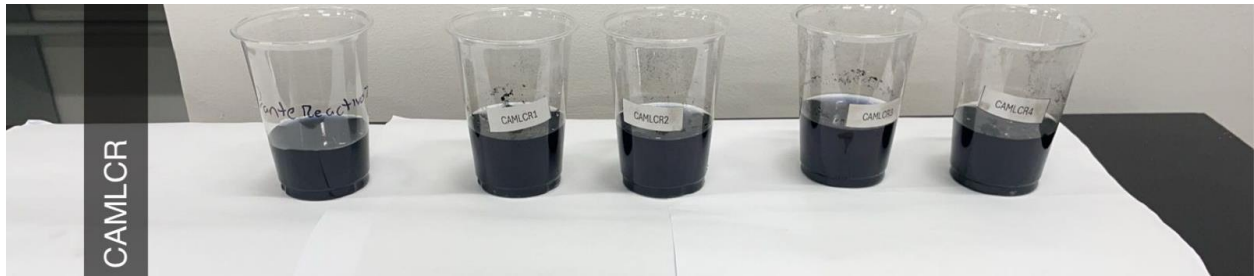
Fuente: Elaboración propia (2025) Universidad del Valle de Guatemala, Laboratorio de operaciones unitarias.

Figura 38: Imagen de la combinación CAMLCD después de la adsorción



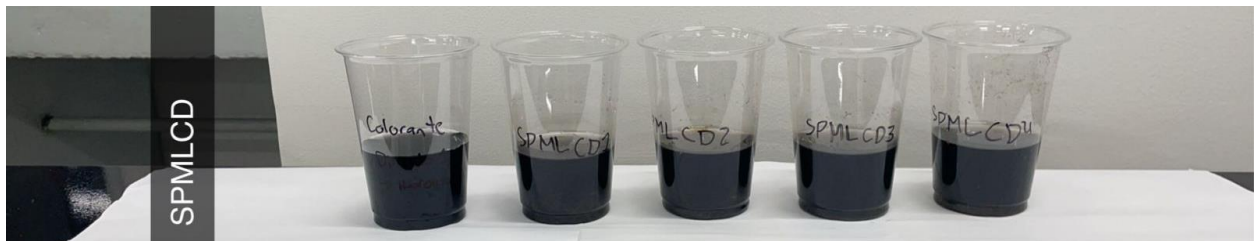
Fuente: Elaboración propia (2025) Universidad del Valle de Guatemala, Laboratorio de operaciones unitarias.

Figura 39: Imagen de la combinación CAMLCR después de la adsorción



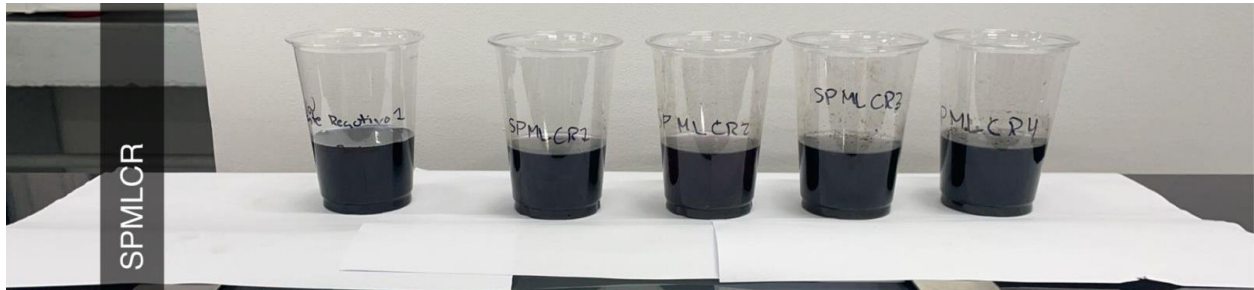
Fuente: Elaboración propia (2025) Universidad del Valle de Guatemala, Laboratorio de operaciones unitarias.

Figura 40: Imagen de la combinación SPMLCD después de la adsorción



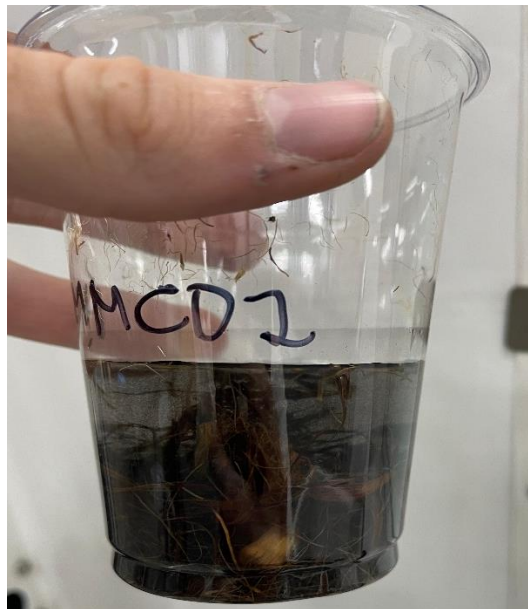
Fuente: Elaboración propia (2025) Universidad del Valle de Guatemala, Laboratorio de operaciones unitarias.

Figura 41: Imagen de la combinación SPMLCR después de la adsorción



Fuente: Elaboración propia (2025) Universidad del Valle de Guatemala, Laboratorio de operaciones unitarias.

Figura 42: Imagen de una de las muestras vista desde más cerca



Fuente: Elaboración propia (2025) Universidad del Valle de Guatemala, Laboratorio de operaciones unitarias.

Figura 43: Imagen de la solución madre de colorante directo 100 mg/L



Fuente: Elaboración propia (2025) Universidad del Valle de Guatemala, Laboratorio de operaciones unitarias.

Figura 44: Imagen de las diluciones del colorante



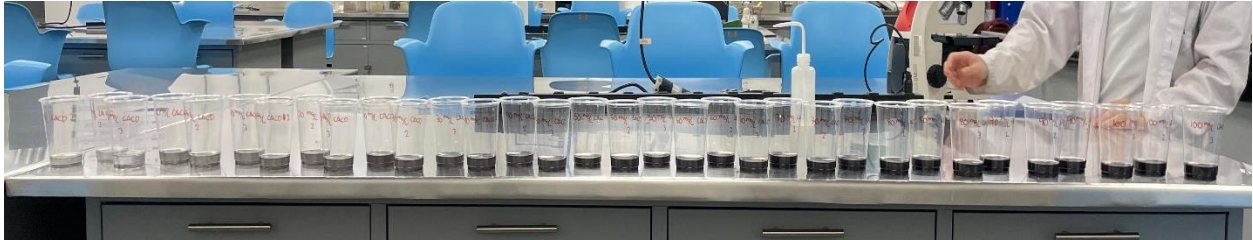
Fuente: Elaboración propia (2025) Universidad del Valle de Guatemala, Laboratorio de operaciones unitarias.

Figura 45: Imagen de las muestras de HAMLCD después de la adsorción para la isoterma de Langmuir



Fuente: Elaboración propia (2025) Universidad del Valle de Guatemala, Laboratorio de operaciones unitarias.

Figura 46: Imagen de las muestras del carbón activado comercial después de la adsorción para la isoterma de Langmuir



Fuente: Elaboración propia (2025) Universidad del Valle de Guatemala, Laboratorio de operaciones unitarias.

XIII. APÉNDICE

Cuadro 70: Resultados del tamizaje para la muestra HBSM – Corrida 1

Masa de los residuos de palma HBSM	20	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	381.9	399.2	17.3	86.50%
NO.30	368.9	370.3	1.4	7.00%
NO.45	330.8	331.6	0.8	4.00%
NO.60	329.7	330.0	0.3	1.50%
N0.85	338.0	338.1	0.1	0.50%
NO.100	322.3	322.3	0.0	0.00%
MAS FINO	463.5	463.6	0.1	0.50%
TOTAL			20	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 71: Resultados del tamizaje para la muestra HBSM – Corrida 2

Masa de los residuos de palma HBSM	20	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	381.9	399.1	17.2	86.00%
NO.30	368.9	370.5	1.6	8.00%
NO.45	330.8	331.5	0.7	3.50%
NO.60	329.7	330.0	0.3	1.50%
N0.85	338.0	338.0	0.0	0.00%
NO.100	322.3	322.4	0.1	0.50%
MAS FINO	463.5	463.6	0.1	0.50%
TOTAL			20	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 72: Resultados del tamizaje para la muestra HBSM – Corrida 3

Masa de los residuos de palma HBSM	20	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	382.0	399.4	17.4	87.00%
NO.30	368.9	370.5	1.6	8.00%
NO.45	330.9	331.5	0.6	3.00%
NO.60	330.0	330.0	0.0	0.00%
N0.85	338.0	338.2	0.2	1.00%
NO.100	322.3	322.4	0.1	0.50%
MAS FINO	463.5	463.6	0.1	0.50%
TOTAL			20	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 73: Porcentaje promedio retenido por tamiz para residuos HBSM

Número de malla	% Muestra 1	% Muestra 2	% Muestra 3	%Promedio HBSM
NO.20	86.50%	86.00%	87.00%	86.50%
NO.30	7.00%	8.00%	8.00%	7.67%
NO.45	4.00%	3.50%	3.00%	3.50%
NO.60	1.50%	1.50%	0.00%	1.00%
N0.85	0.50%	0.00%	1.00%	0.50%
NO.100	0.00%	0.50%	0.50%	0.33%
MAS FINO	0.50%	0.50%	0.50%	0.50%
Total	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 74: Resultados del tamizaje para la muestra HBML – Corrida 1

Masa de los residuos de palma HBML	20	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	382.0	391.3	9.3	46.50%
NO.30	369.0	372.1	3.1	15.50%
NO.45	330.8	334.7	3.9	19.50%
NO.60	329.8	331.1	1.3	6.50%
N0.85	338.1	339.2	1.1	5.50%
NO.100	322.3	322.7	0.4	2.00%
MAS FINO	463.7	464.6	0.9	4.50%
TOTAL			20	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 75: Resultados del tamizaje para la muestra HBML – Corrida 2

Masa de los residuos de palma HBML	15	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	382.0	389.0	7.0	46.67%
NO.30	369.0	371.3	2.3	15.33%
NO.45	330.8	333.9	3.1	20.67%
NO.60	329.8	330.7	0.9	6.00%
N0.85	338.1	338.9	0.8	5.33%
NO.100	322.3	322.6	0.3	2.00%
MAS FINO	463.7	464.3	0.6	4.00%
TOTAL			15	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 76: Resultados del tamizaje para la muestra HBML – Corrida 3

Masa de los residuos de palma HBML	15	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	381.9	388.9	7.0	46.67%
NO.30	368.9	371.1	2.2	14.67%
NO.45	330.8	333.9	3.1	20.67%
NO.60	329.7	330.7	1.0	6.67%
N0.85	338.0	338.8	0.8	5.33%
NO.100	322.3	322.6	0.3	2.00%
MAS FINO	463.7	464.3	0.6	4.00%
TOTAL			15	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 77: Porcentaje promedio retenido por tamiz para residuos HBML

Número de malla	% Muestra 1	% Muestra 2	% Muestra 3	%Promedio HBML
NO.20	46.50%	46.67%	46.67%	46.61%
NO.30	15.50%	15.33%	14.67%	15.17%
NO.45	19.50%	20.67%	20.67%	20.28%
NO.60	6.50%	6.00%	6.67%	6.39%
N0.85	5.50%	5.33%	5.33%	5.39%
NO.100	2.00%	2.00%	2.00%	2.00%
MAS FINO	4.50%	4.00%	4.00%	4.17%
Total	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 78: Resultados del tamizaje para la muestra HBMM – Corrida 1

Masa de los residuos de palma HBMM	20	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	381.9	395.8	13.9	69.50%
NO.30	368.9	371.4	2.5	12.50%
NO.45	330.7	332.6	1.9	9.50%
NO.60	329.8	330.4	0.6	3.00%
N0.85	338.0	338.5	0.5	2.50%
NO.100	322.3	322.5	0.2	1.00%
MAS FINO	463.6	464.0	0.4	2.00%
TOTAL			20	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 79: Resultados del tamizaje para la muestra HBMM – Corrida 2

Masa de los residuos de palma HBMM	15	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	381.9	392.4	10.5	70.00%
NO.30	368.9	370.7	1.8	12.00%
NO.45	330.7	332.1	1.4	9.33%
NO.60	329.8	330.3	0.5	3.33%
N0.85	338.0	338.3	0.3	2.00%
NO.100	322.3	322.5	0.2	1.33%
MAS FINO	463.6	463.9	0.3	2.00%
TOTAL			15	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 80: Resultados del tamizaje para la muestra HBMM – Corrida 3

Masa de los residuos de palma HBMM	15	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	381.9	392.4	10.5	70.00%
NO.30	368.9	370.7	1.8	12.00%
NO.45	330.7	332.1	1.4	9.33%
NO.60	329.8	330.3	0.5	3.33%
N0.85	338.0	338.3	0.3	2.00%
NO.100	322.3	322.5	0.2	1.33%
MAS FINO	463.6	463.9	0.3	2.00%
TOTAL			15	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 81: Porcentaje promedio retenido por tamiz para residuos HBMM

Número de malla	% Muestra 1	% Muestra 2	% Muestra 3	%Promedio HBMM
NO.20	69.50%	70.00%	70.00%	69.83%
NO.30	12.50%	12.00%	12.00%	12.17%
NO.45	9.50%	9.33%	9.33%	9.39%
NO.60	3.00%	3.33%	3.33%	3.22%
N0.85	2.50%	2.00%	2.00%	2.17%
NO.100	1.00%	1.33%	1.33%	1.22%
MAS FINO	2.00%	2.00%	2.00%	2.00%
Total	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 82: Resultados del tamizaje para la muestra HASM – Corrida 1

Masa de los residuos de palma HASM	20	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	382.0	397.4	15.4	77.00%
NO.30	369.0	371.5	2.5	12.50%
NO.45	330.8	332.3	1.5	7.50%
NO.60	329.8	330.0	0.2	1.00%
N0.85	338.1	338.3	0.2	1.00%
NO.100	322.4	322.4	0.0	0.00%
MAS FINO	463.8	464.0	0.2	1.00%
TOTAL			20	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 83: Resultados del tamizaje para la muestra HASM – Corrida 2

Masa de los residuos de palma HASM	20	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	381.9	397.4	15.5	77.50%
NO.30	368.9	371.5	2.6	13.00%
NO.45	330.7	332.2	1.5	7.50%
NO.60	329.8	329.9	0.1	0.50%
N0.85	338.0	338.0	0.0	0.00%
NO.100	322.3	322.4	0.1	0.50%
MAS FINO	463.6	463.8	0.2	1.00%
TOTAL			20	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 84: Resultados del tamizaje para la muestra HASM – Corrida 3

Masa de los residuos de palma HASM	20	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	382.0	397.4	15.4	77.00%
NO.30	369.0	371.5	2.5	12.50%
NO.45	330.8	332.3	1.5	7.50%
NO.60	329.8	330.0	0.2	1.00%
N0.85	338.1	338.3	0.2	1.00%
NO.100	322.4	322.4	0.0	0.00%
MAS FINO	463.8	464.0	0.2	1.00%
TOTAL			20	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 85: Porcentaje promedio retenido por tamiz para residuos HASM

Número de malla	% Muestra 1	% Muestra 2	% Muestra 3	%Promedio HASM
NO.20	77.00%	77.50%	77.00%	77.17%
NO.30	12.50%	13.00%	12.50%	12.67%
NO.45	7.50%	7.50%	7.50%	7.50%
NO.60	1.00%	0.50%	1.00%	0.83%
N0.85	1.00%	0.00%	1.00%	0.67%
NO.100	0.00%	0.50%	0.00%	0.17%
MAS FINO	1.00%	1.00%	1.00%	1.00%
Total	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 86: Resultados del tamizaje para la muestra HAML – Corrida 1

Masa de los residuos de palma HAML	20	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	381.9	391.0	9.1	45.50%
NO.30	369.0	371.8	2.8	14.00%
NO.45	330.9	335.0	4.1	20.50%
NO.60	329.8	331.4	1.6	8.00%
N0.85	338.1	339.1	1.0	5.00%
NO.100	322.4	322.6	0.2	1.00%
MAS FINO	463.5	464.7	1.2	6.00%
TOTAL			20	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 87: Resultados del tamizaje para la muestra HAML – Corrida 2

Masa de los residuos de palma HAML	20	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	382.0	391.1	9.1	45.50%
NO.30	368.9	371.8	2.9	14.50%
NO.45	330.9	334.9	4.0	20.00%
NO.60	329.8	331.5	1.7	8.50%
N0.85	338.2	339.2	1.0	5.00%
NO.100	322.5	322.7	0.2	1.00%
MAS FINO	463.5	464.6	1.1	5.50%
TOTAL			20	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 88: Resultados del tamizaje para la muestra HAML – Corrida 3

Masa de los residuos de palma HAML	20	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	382.0	390.7	8.7	43.50%
NO.30	369.0	371.9	2.9	14.50%
NO.45	330.8	335.1	4.3	21.50%
NO.60	329.8	331.4	1.6	8.00%
N0.85	338.1	339.0	0.9	4.50%
NO.100	322.4	322.7	0.3	1.50%
MAS FINO	463.5	464.8	1.3	6.50%
TOTAL			20	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 89: Porcentaje promedio retenido por tamiz para residuos HAML

Número de malla	% Muestra 1	% Muestra 2	% Muestra 3	%Promedio HAML
NO.20	45.50%	45.50%	43.50%	44.83%
NO.30	14.00%	14.50%	14.50%	14.33%
NO.45	20.50%	20.00%	21.50%	20.67%
NO.60	8.00%	8.50%	8.00%	8.17%
N0.85	5.00%	5.00%	4.50%	4.83%
NO.100	1.00%	1.00%	1.50%	1.17%
MAS FINO	6.00%	5.50%	6.50%	6.00%
Total	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 90: Resultados del tamizaje para la muestra HAMM – Corrida 1

Masa de los residuos de palma HAMM	20	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	382.0	393.1	11.1	55.50%
NO.30	369.0	372.2	3.2	16.00%
NO.45	330.8	333.9	3.1	15.50%
NO.60	329.9	330.8	0.9	4.50%
N0.85	338.1	339.0	0.9	4.50%
NO.100	322.4	322.7	0.3	1.50%
MAS FINO	463.9	464.4	0.5	2.50%
TOTAL			20	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 91: Resultados del tamizaje para la muestra HAMM – Corrida 2

Masa de los residuos de palma HAMM	10	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	382.0	387.4	5.4	54.00%
NO.30	369.0	370.6	1.6	16.00%
NO.45	330.8	332.4	1.6	16.00%
NO.60	329.9	330.3	0.4	4.00%
N0.85	338.1	338.5	0.4	4.00%
NO.100	322.4	322.6	0.2	2.00%
MAS FINO	463.9	464.3	0.4	4.00%
TOTAL			10	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 92: Resultados del tamizaje para la muestra HAMM – Corrida 3

Masa de los residuos de palma HAMM	10	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	381.9	387.4	5.5	55.00%
NO.30	368.9	370.4	1.5	15.00%
NO.45	330.8	332.3	1.5	15.00%
NO.60	329.7	330.2	0.5	5.00%
N0.85	338.0	338.3	0.3	3.00%
NO.100	322.3	322.6	0.3	3.00%
MAS FINO	463.9	464.3	0.4	4.00%
TOTAL			10	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 93: Porcentaje promedio retenido por tamiz para residuos HAMM

Número de malla	% Muestra 1	% Muestra 2	% Muestra 3	%Promedio HAMM
NO.20	55.50%	54.00%	55.00%	54.83%
NO.30	16.00%	16.00%	15.00%	15.67%
NO.45	15.50%	16.00%	15.00%	15.50%
NO.60	4.50%	4.00%	5.00%	4.50%
N0.85	4.50%	4.00%	3.00%	3.83%
NO.100	1.50%	2.00%	3.00%	2.17%
MAS FINO	2.50%	4.00%	4.00%	3.50%
Total	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 94: Resultados del tamizaje para la muestra SPSM – Corrida 1

Masa de los residuos de palma SPSM	20	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	381.9	396.9	15.0	75.00%
NO.30	369.1	371.2	2.1	10.50%
NO.45	330.8	332.5	1.7	8.50%
NO.60	329.8	330.3	0.5	2.50%
N0.85	338.1	338.5	0.4	2.00%
NO.100	322.4	322.5	0.1	0.50%
MAS FINO	463.9	464.1	0.2	1.00%
TOTAL			20	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 95: Resultados del tamizaje para la muestra SPSM – Corrida 2

Masa de los residuos de palma SPSM	20	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	382.0	396.9	14.9	74.50%
NO.30	369.1	371.2	2.1	10.50%
NO.45	330.8	332.5	1.7	8.50%
NO.60	329.8	330.3	0.5	2.50%
N0.85	338.1	338.5	0.4	2.00%
NO.100	322.4	322.5	0.1	0.50%
MAS FINO	463.8	464.1	0.3	1.50%
TOTAL			20	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 96: Resultados del tamizaje para la muestra SPSM – Corrida 3

Masa de los residuos de palma SPSM	20	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	381.9	396.9	15.0	75.00%
NO.30	369.1	371.1	2.0	10.00%
NO.45	330.8	332.4	1.6	8.00%
NO.60	329.8	330.4	0.6	3.00%
N0.85	338.1	338.6	0.5	2.50%
NO.100	322.4	322.5	0.1	0.50%
MAS FINO	463.9	464.1	0.2	1.00%
TOTAL			20	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 97: Porcentaje promedio retenido por tamiz para residuos SPSM

Número de malla	% Muestra 1	% Muestra 2	% Muestra 3	%Promedio SPSM
NO.20	75.00%	74.50%	75.00%	74.83%
NO.30	10.50%	10.50%	10.00%	10.33%
NO.45	8.50%	8.50%	8.00%	8.33%
NO.60	2.50%	2.50%	3.00%	2.67%
N0.85	2.00%	2.00%	2.50%	2.17%
NO.100	0.50%	0.50%	0.50%	0.50%
MAS FINO	1.00%	1.50%	1.00%	1.17%
Total	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 98: Resultados del tamizaje para la muestra SPML – Corrida 1

Masa de los residuos de palma SPML	20	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	381.9	391.5	9.6	48.00%
NO.30	369.1	372.0	2.9	14.50%
NO.45	330.9	333.9	3.0	15.00%
NO.60	329.8	331.1	1.3	6.50%
N0.85	338.1	339.4	1.3	6.50%
NO.100	322.4	323.0	0.6	3.00%
MAS FINO	464.0	465.3	1.3	6.50%
TOTAL			20	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 99: Resultados del tamizaje para la muestra SPML – Corrida 2

Masa de los residuos de palma SPML	20	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	381.9	391.7	9.8	49.00%
NO.30	369.1	372.1	3.0	15.00%
NO.45	330.8	333.7	2.9	14.50%
NO.60	329.8	331.0	1.2	6.00%
N0.85	338.1	339.3	1.2	6.00%
NO.100	322.4	323.1	0.7	3.50%
MAS FINO	463.9	465.1	1.2	6.00%
TOTAL			20	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 100: Resultados del tamizaje para la muestra SPML – Corrida 3

Masa de los residuos de palma SPML	20	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	381.9	391.3	9.4	47.00%
NO.30	369.1	372.1	3.0	15.00%
NO.45	330.9	334.0	3.1	15.50%
NO.60	329.8	331.0	1.2	6.00%
N0.85	338.1	339.5	1.4	7.00%
NO.100	322.4	322.9	0.5	2.50%
MAS FINO	464.0	465.4	1.4	7.00%
TOTAL			20	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 101: Porcentaje promedio retenido por tamiz para residuos SPML

Número de malla	% Muestra 1	% Muestra 2	% Muestra 3	%Promedio SPML
NO.20	48.00%	49.00%	47.00%	48.00%
NO.30	14.50%	15.00%	15.00%	14.83%
NO.45	15.00%	14.50%	15.50%	15.00%
NO.60	6.50%	6.00%	6.00%	6.17%
N0.85	6.50%	6.00%	7.00%	6.50%
NO.100	3.00%	3.50%	2.50%	3.00%
MAS FINO	6.50%	6.00%	7.00%	6.50%
Total	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 102: Resultados del tamizaje para la muestra SPMM – Corrida 1

Masa de los residuos de palma SPMM	20	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	382.0	396.2	14.2	71.00%
NO.30	369.1	371.3	2.2	11.00%
NO.45	330.8	332.7	1.9	9.50%
NO.60	329.9	330.4	0.5	2.50%
N0.85	338.1	338.7	0.6	3.00%
NO.100	322.4	322.6	0.2	1.00%
MAS FINO	463.9	464.3	0.4	2.00%
TOTAL			20	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 103: Resultados del tamizaje para la muestra SPMM – Corrida 2

Masa de los residuos de palma SPMM	20	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	381.9	396.2	14.3	71.50%
NO.30	369.0	371.3	2.3	11.50%
NO.45	330.9	332.7	1.8	9.00%
NO.60	329.8	330.3	0.5	2.50%
N0.85	338.1	338.6	0.5	2.50%
NO.100	322.4	322.5	0.1	0.50%
MAS FINO	463.8	464.3	0.5	2.50%
TOTAL			20	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 104: Resultados del tamizaje para la muestra SPMM – Corrida 3

Masa de los residuos de palma SPMM	20	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	382.0	396.3	14.3	71.50%
NO.30	369.1	371.4	2.3	11.50%
NO.45	330.8	332.7	1.9	9.50%
NO.60	329.9	330.3	0.4	2.00%
N0.85	338.1	338.6	0.5	2.50%
NO.100	322.4	322.5	0.1	0.50%
MAS FINO	463.9	464.4	0.5	2.50%
TOTAL			20	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 105: Porcentaje promedio retenido por tamiz para residuos SPMM

Número de malla	% Muestra 1	% Muestra 2	% Muestra 3	%Promedio SPML
NO.20	71.00%	71.50%	71.50%	71.33%
NO.30	11.00%	11.50%	11.50%	11.33%
NO.45	9.50%	9.00%	9.50%	9.33%
NO.60	2.50%	2.50%	2.00%	2.33%
N0.85	3.00%	2.50%	2.50%	2.67%
NO.100	1.00%	0.50%	0.50%	0.67%
MAS FINO	2.00%	2.50%	2.50%	2.33%
Total	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 106: Resultados del tamizaje para la muestra CASM – Corrida 1

Masa de los residuos de palma CASM	20	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	381.8	393.5	11.7	58.50%
NO.30	368.9	374.7	5.8	29.00%
NO.45	330.8	332.4	1.6	8.00%
NO.60	329.7	330.1	0.4	2.00%
N0.85	338.0	338.2	0.2	1.00%
NO.100	322.2	322.3	0.1	0.50%
MAS FINO	463.5	463.7	0.2	1.00%
TOTAL			20	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 107: Resultados del tamizaje para la muestra CASM – Corrida 2

Masa de los residuos de palma CASM	20	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	381.90	393.50	11.60	58.00%
NO.30	368.80	374.70	5.90	29.50%
NO.45	330.80	332.40	1.60	8.00%
NO.60	329.70	330.20	0.50	2.50%
N0.85	338.10	338.10	0.00	0.00%
NO.100	322.20	322.30	0.10	0.50%
MAS FINO	463.40	463.70	0.30	1.50%
TOTAL			20	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 108: Resultados del tamizaje para la muestra CASM – Corrida 3

Masa de los residuos de palma CASM	20	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	382.0	393.8	11.8	59.00%
NO.30	368.9	374.6	5.7	28.50%
NO.45	330.8	332.3	1.5	7.50%
NO.60	329.7	330.3	0.6	3.00%
N0.85	338.0	338.1	0.1	0.50%
NO.100	322.1	322.2	0.1	0.50%
MAS FINO	463.4	463.6	0.2	1.00%
TOTAL			20	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 109: Porcentaje promedio retenido por tamiz para residuos CASM

Número de malla	% Muestra 1	% Muestra 2	% Muestra 3	%Promedio CASM
NO.20	58.50%	58.00%	59.00%	58.50%
NO.30	29.00%	29.50%	28.50%	29.00%
NO.45	8.00%	8.00%	7.50%	7.83%
NO.60	2.00%	2.50%	3.00%	2.50%
N0.85	1.00%	0.00%	0.50%	0.50%
NO.100	0.50%	0.50%	0.50%	0.50%
MAS FINO	1.00%	1.50%	1.00%	1.17%
Total	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 110: Resultados del tamizaje para la muestra CAML – Corrida 1

Masa de los residuos de palma CAML	20	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	381.9	387.2	5.3	26.50%
NO.30	368.9	370.6	1.7	8.50%
NO.45	330.8	335.2	4.4	22.00%
NO.60	329.7	333.9	4.2	21.00%
N0.85	338.0	340.7	2.7	13.50%
NO.100	322.3	323.3	1.0	5.00%
MAS FINO	463.5	464.2	0.7	3.50%
TOTAL			20	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 111: Resultados del tamizaje para la muestra CAML – Corrida 2

Masa de los residuos de palma CAML	20	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	381.9	387.1	5.2	26.00%
NO.30	368.8	370.7	1.9	9.50%
NO.45	330.8	335.3	4.5	22.50%
NO.60	329.7	333.9	4.2	21.00%
N0.85	338.1	340.8	2.7	13.50%
NO.100	322.2	323.1	0.9	4.50%
MAS FINO	463.4	464.0	0.6	3.00%
TOTAL			20	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 112: Resultados del tamizaje para la muestra CAML – Corrida 3

Masa de los residuos de palma CAML	20	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	381.9	387.0	5.1	25.50%
NO.30	368.9	370.5	1.6	8.00%
NO.45	330.8	335.4	4.6	23.00%
NO.60	329.7	334.0	4.3	21.50%
N0.85	338.0	340.8	2.8	14.00%
NO.100	322.3	323.2	0.9	4.50%
MAS FINO	463.5	464.2	0.7	3.50%
TOTAL			20	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 113: Porcentaje promedio retenido por tamiz para residuos CAML

Número de malla	% Muestra 1	% Muestra 2	% Muestra 3	%Promedio CAML
NO.20	26.50%	26.00%	25.50%	26.00%
NO.30	8.50%	9.50%	8.00%	8.67%
NO.45	22.00%	22.50%	23.00%	22.50%
NO.60	21.00%	21.00%	21.50%	21.17%
N0.85	13.50%	13.50%	14.00%	13.67%
NO.100	5.00%	4.50%	4.50%	4.67%
MAS FINO	3.50%	3.00%	3.50%	3.33%
Total	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 114: Resultados del tamizaje para la muestra CAMM – Corrida 1

Masa de los residuos de palma CAMM	20	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	381.9	389.7	7.8	39.00%
NO.30	369.0	374.3	5.3	26.50%
NO.45	331.0	335.7	4.7	23.50%
NO.60	330.3	331.3	1.0	5.00%
N0.85	338.2	338.5	0.3	1.50%
NO.100	322.3	322.5	0.2	1.00%
MAS FINO	463.7	464.4	0.7	3.50%
TOTAL			20	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 115: Resultados del tamizaje para la muestra CAMM – Corrida 2

Masa de los residuos de palma CAMM	20	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	381.9	389.6	7.7	38.50%
NO.30	368.9	374.2	5.3	26.50%
NO.45	330.8	335.5	4.7	23.50%
NO.60	329.7	331.2	1.5	7.50%
N0.85	338.0	338.2	0.2	1.00%
NO.100	322.3	322.3	0.0	0.00%
MAS FINO	463.5	464.1	0.6	3.00%
TOTAL			20	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 116: Resultados del tamizaje para la muestra CAMM – Corrida 3

Masa de los residuos de palma CAMM	20	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	381.9	389.9	8.0	40.00%
NO.30	369.0	374.4	5.4	27.00%
NO.45	331.0	335.6	4.6	23.00%
NO.60	330.3	331.2	0.9	4.50%
N0.85	338.2	338.4	0.2	1.00%
NO.100	322.3	322.4	0.1	0.50%
MAS FINO	463.7	464.5	0.8	4.00%
TOTAL			20	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 117: Porcentaje promedio retenido por tamiz para residuos CAMM

Número de malla	% Muestra 1	% Muestra 2	% Muestra 3	%Promedio CAMM
NO.20	39.00%	38.50%	40.00%	39.17%
NO.30	26.50%	26.50%	27.00%	26.67%
NO.45	23.50%	23.50%	23.00%	23.33%
NO.60	5.00%	7.50%	4.50%	5.67%
N0.85	1.50%	1.00%	1.00%	1.17%
NO.100	1.00%	0.00%	0.50%	0.50%
MAS FINO	3.50%	3.00%	4.00%	3.50%
Total	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 118: Resultados del tamizaje para la muestra carbón activado comercial (origen vegetal) pulverizado – Corrida 1

Masa de los residuos de palma Carbón Activado Comercial Pulverizado	20	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	382.1	382.2	0.1	0.50%
NO.30	369.1	369.2	0.1	0.50%
NO.45	330.9	331.1	0.2	1.00%
NO.60	330.0	330.4	0.4	2.00%
N0.85	338.3	338.8	0.5	2.50%
NO.100	322.4	322.6	0.2	1.00%
MAS FINO	463.7	482.2	18.5	92.50%
TOTAL			20	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 119: Resultados del tamizaje para la muestra carbón activado comercial (origen vegetal) pulverizado – Corrida 2

Masa de los residuos de palma Carbón Activado Comercial Pulverizado	20	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	382.2	382.2	0.0	0.00%
NO.30	369.1	369.2	0.1	0.50%
NO.45	331.0	331.1	0.1	0.50%
NO.60	330.0	330.4	0.4	2.00%
N0.85	338.2	338.9	0.7	3.50%
NO.100	322.5	322.6	0.1	0.50%
MAS FINO	463.8	482.4	18.6	93.00%
TOTAL			20	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 120: Resultados del tamizaje para la muestra carbón activado comercial (origen vegetal) pulverizado – Corrida 3

Masa de los residuos de palma Carbón Activado Comercial Pulverizado	20	g		
Número de malla	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Diferencia (g)	%
NO.20	382.1	382.1	0.0	0.00%
NO.30	369.2	369.2	0.0	0.00%
NO.45	331.0	331.0	0.0	0.00%
NO.60	330.0	330.3	0.3	1.50%
N0.85	338.2	339.0	0.8	4.00%
NO.100	322.5	322.5	0.0	0.00%
MAS FINO	463.8	482.7	18.9	94.50%
	TOTAL		20	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 121: Porcentaje promedio retenido por tamiz para carbón activado comercial (origen vegetal) pulverizado

Número de malla	% Muestra 1	% Muestra 2	% Muestra 3	%Promedio Carbón Activado Comercial Pulverizado
NO.20	0.50%	0.00%	0.00%	0.17%
NO.30	0.50%	0.50%	0.00%	0.33%
NO.45	1.00%	0.50%	0.00%	0.50%
NO.60	2.00%	2.00%	1.50%	1.83%
N0.85	2.50%	3.50%	4.00%	3.33%
NO.100	1.00%	0.50%	0.00%	0.50%
MAS FINO	92.50%	93.00%	94.50%	93.33%
Total	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 122: Porcentaje de remoción promedio para cada combinación experimental, ordenadas de mayor a menor remoción

Combinación	Pretratamiento	Molienda	Colorante	Remoción media
HAMMCD4	HA	MM	CD	86.33%
HASMCR1	HA	SM	CR	85.28%
HASMCR2	HA	SM	CR	84.07%
HAMLCD3	HA	ML	CD	80.96%
HAMLCD4	HA	ML	CD	79.68%
HAMLCD2	HA	ML	CD	78.27%
HAMMCR1	HA	MM	CR	76.94%
HAMMCR2	HA	MM	CR	75.06%
HAMLCD1	HA	ML	CD	73.83%
HAMMCR3	HA	MM	CR	73.47%
HAMMCD3	HA	MM	CD	73.33%
HAMMCD1	HA	MM	CD	73.20%
HASMCD3	HA	SM	CD	69.86%
HASMCD4	HA	SM	CD	66.33%
CAMLCR4	CA	ML	CR	66.31%
CAMLCR3	CA	ML	CR	64.62%
HASMCR3	HA	SM	CR	63.57%
CAMMCR3	CA	MM	CR	63.00%
HASMCR4	HA	SM	CR	62.54%
HAMMCD2	HA	MM	CD	61.73%
CAMLCR2	CA	ML	CR	60.54%
CASMCD2	CA	SM	CD	60.50%
CAMMCR2	CA	MM	CR	59.65%
CAMMCR1	CA	MM	CR	59.34%
HASMCD1	HA	SM	CD	58.95%
CASMCR1	CA	SM	CR	57.85%
CASMCD1	CA	SM	CD	57.54%
HASMCD2	HA	SM	CD	57.10%
CASMCR2	CA	SM	CR	54.69%
CAMMCR4	CA	MM	CR	52.71%
CASMCD3	CA	SM	CD	51.06%
CASMCD4	CA	SM	CD	50.02%
CAMMCD1	CA	MM	CD	49.30%
CASMCR4	CA	SM	CR	48.87%
CAMLCR1	CA	ML	CR	48.81%
HAMMCR4	HA	MM	CR	48.67%
CAMMCD2	CA	MM	CD	48.42%
CASMCR3	CA	SM	CR	48.41%
CAMMCD3	CA	MM	CD	45.90%
CAMLCD3	CA	ML	CD	43.34%
CAMLCD4	CA	ML	CD	43.14%
SPMLCR2	SP	ML	CR	42.10%
CAMMCD4	CA	MM	CD	41.18%
HAMLCR3	HA	ML	CR	39.59%
HAMLCR1	HA	ML	CR	39.41%
SPSMCR2	SP	SM	CR	38.44%
HAMLCR4	HA	ML	CR	38.17%

Combinación	Pretratamiento	Molienda	Colorante	Remoción media
CAMLCD2	CA	ML	CD	37.77%
SPSMCR1	SP	SM	CR	37.73%
HAMLCR2	HA	ML	CR	35.79%
SPMMCD4	SP	MM	CD	35.63%
SPMMCD1	SP	MM	CD	35.39%
SPMMCD2	SP	MM	CD	34.66%
SPMLCD4	SP	ML	CD	33.44%
SPMLCD1	SP	ML	CD	33.41%
SPMMCD3	SP	MM	CD	33.30%
SPMLCD3	SP	ML	CD	33.09%
CAMLCD1	CA	ML	CD	32.41%
SPSMCD1	SP	SM	CD	32.25%
SPMLCR3	SP	ML	CR	31.70%
SPSMCR3	SP	SM	CR	31.68%
SPMMCR1	SP	MM	CR	30.54%
SPSMCD3	SP	SM	CD	30.37%
SPMLCD2	SP	ML	CD	29.78%
SPSMCR4	SP	SM	CR	28.79%
SPSMCD2	SP	SM	CD	28.29%
SPMLCR1	SP	ML	CR	27.80%
SPMMCR4	SP	MM	CR	27.60%
SPSMCD4	SP	SM	CD	26.09%
SPMMCR3	SP	MM	CR	22.67%
SPMLCR4	SP	ML	CR	22.42%
SPMMCR2	SP	MM	CR	19.97%
HBMLCD1	HB	ML	CD	-0.63%
HBMLCD2	HB	ML	CD	-0.64%
HBSMCR1	HB	SM	CR	-1.27%
HBMLCR1	HB	ML	CR	-1.38%
HBMLCD4	HB	ML	CD	-1.69%
HBMLCD3	HB	ML	CD	-1.91%
HBMLCR2	HB	ML	CR	-1.95%
HBMMCR2	HB	MM	CR	-2.02%
HBMLCR3	HB	ML	CR	-2.16%
HBMMCR3	HB	MM	CR	-2.41%
HBSMCD4	HB	SM	CD	-2.49%
HBSMCR2	HB	SM	CR	-2.69%
HBSMCR4	HB	SM	CR	-2.80%
HBMMCR4	HB	MM	CR	-3.08%
HBMMCR1	HB	MM	CR	-3.08%
HBMLCR4	HB	ML	CR	-3.08%
HBSMCR3	HB	SM	CR	-3.79%
HBMMCD3	HB	MM	CD	-4.12%
HBMMCD4	HB	MM	CD	-4.20%
HBSMCD2	HB	SM	CD	-4.47%
HBSMCD1	HB	SM	CD	-4.58%
HBMMCD1	HB	MM	CD	-5.20%
HBMMCD2	HB	MM	CD	-5.71%
HBSMCD3	HB	SM	CD	-6.60%

Fuente:Elaboración propia (2025) a partir de datos experimentales procesados en RStudio

Cuadro 123: Resultados de la prueba de comparaciones múltiples de Tukey para las combinaciones experimentales

Comparación de combinaciones	Diferencia	Límite inferior	Límite superior	Valor p	Diferencia significativa
HA:ML:CD-CA:ML:CD	39.02%	32.19%	45.85%	0.0000	Si (p<0.05)
HB:ML:CD-CA:ML:CD	-40.38%	-47.21%	-33.55%	0.0000	Si (p<0.05)
SP:ML:CD-CA:ML:CD	-6.73%	-13.56%	0.10%	0.0590	No
CA:MM:CD-CA:ML:CD	7.03%	0.20%	13.86%	0.0350	Si (p<0.05)
HA:MM:CD-CA:ML:CD	34.48%	27.65%	41.31%	0.0000	Si (p<0.05)
HB:MM:CD-CA:ML:CD	-43.98%	-50.81%	-37.15%	0.0000	Si (p<0.05)
SP:MM:CD-CA:ML:CD	-4.42%	-11.25%	2.41%	0.7661	No
CA:SM:CD-CA:ML:CD	15.62%	8.79%	22.45%	0.0000	Si (p<0.05)
HA:SM:CD-CA:ML:CD	23.89%	17.06%	30.73%	0.0000	Si (p<0.05)
HB:SM:CD-CA:ML:CD	-43.70%	-50.53%	-36.87%	0.0000	Si (p<0.05)
SP:SM:CD-CA:ML:CD	-9.91%	-16.75%	-3.08%	0.0000	Si (p<0.05)
CA:ML:CR-CA:ML:CD	20.90%	14.07%	27.73%	0.0000	Si (p<0.05)
HA:ML:CR-CA:ML:CD	-0.93%	-7.76%	5.90%	1.0000	No
HB:ML:CR-CA:ML:CD	-41.31%	-48.14%	-34.48%	0.0000	Si (p<0.05)
SP:ML:CR-CA:ML:CD	-8.16%	-14.99%	-1.33%	0.0036	Si (p<0.05)
CA:MM:CR-CA:ML:CD	19.51%	12.68%	26.34%	0.0000	Si (p<0.05)
HA:MM:CR-CA:ML:CD	29.37%	22.54%	36.20%	0.0000	Si (p<0.05)
HB:MM:CR-CA:ML:CD	-41.81%	-48.64%	-34.98%	0.0000	Si (p<0.05)
SP:MM:CR-CA:ML:CD	-13.97%	-20.80%	-7.14%	0.0000	Si (p<0.05)
CA:SM:CR-CA:ML:CD	13.29%	6.46%	20.12%	0.0000	Si (p<0.05)
HA:SM:CR-CA:ML:CD	34.70%	27.87%	41.53%	0.0000	Si (p<0.05)
HB:SM:CR-CA:ML:CD	-41.80%	-48.63%	-34.97%	0.0000	Si (p<0.05)
SP:SM:CR-CA:ML:CD	-5.00%	-11.84%	1.83%	0.5294	No
HB:ML:CD-HA:ML:CD	-79.40%	-86.23%	-72.57%	0.0000	Si (p<0.05)
SP:ML:CD-HA:ML:CD	-45.75%	-52.58%	-38.92%	0.0000	Si (p<0.05)
CA:MM:CD-HA:ML:CD	-31.99%	-38.82%	-25.16%	0.0000	Si (p<0.05)
HA:MM:CD-HA:ML:CD	-4.54%	-11.37%	2.29%	0.7228	No
HB:MM:CD-HA:ML:CD	-82.99%	-89.83%	-76.16%	0.0000	Si (p<0.05)
SP:MM:CD-HA:ML:CD	-43.44%	-50.27%	-36.61%	0.0000	Si (p<0.05)
CA:SM:CD-HA:ML:CD	-23.40%	-30.23%	-16.57%	0.0000	Si (p<0.05)
HA:SM:CD-HA:ML:CD	-15.12%	-21.95%	-8.29%	0.0000	Si (p<0.05)
HB:SM:CD-HA:ML:CD	-82.72%	-89.55%	-75.89%	0.0000	Si (p<0.05)
SP:SM:CD-HA:ML:CD	-48.93%	-55.76%	-42.10%	0.0000	Si (p<0.05)
CA:ML:CR-HA:ML:CD	-18.11%	-24.95%	-11.28%	0.0000	Si (p<0.05)
HA:ML:CR-HA:ML:CD	-39.94%	-46.78%	-33.11%	0.0000	Si (p<0.05)
HB:ML:CR-HA:ML:CD	-80.33%	-87.16%	-73.50%	0.0000	Si (p<0.05)
SP:ML:CR-HA:ML:CD	-47.18%	-54.01%	-40.35%	0.0000	Si (p<0.05)
CA:MM:CR-HA:ML:CD	-19.51%	-26.34%	-12.68%	0.0000	Si (p<0.05)
HA:MM:CR-HA:ML:CD	-9.65%	-16.48%	-2.82%	0.0001	Si (p<0.05)
HB:MM:CR-HA:ML:CD	-80.83%	-87.66%	-74.00%	0.0000	Si (p<0.05)
SP:MM:CR-HA:ML:CD	-52.99%	-59.82%	-46.16%	0.0000	Si (p<0.05)
CA:SM:CR-HA:ML:CD	-25.73%	-32.56%	-18.90%	0.0000	Si (p<0.05)
HA:SM:CR-HA:ML:CD	-4.32%	-11.15%	2.51%	0.8015	No

Comparación de combinaciones	Diferencia	Límite inferior	Límite superior	Valor p	Diferencia significativa
HB:SM:CR-HA:ML:CD	-80.82%	-87.65%	-73.99%	0.0000	Sí (p<0.05)
SP:SM:CR-HA:ML:CD	-44.02%	-50.85%	-37.19%	0.0000	Sí (p<0.05)
SP:ML:CD-HB:ML:CD	33.65%	26.82%	40.48%	0.0000	Sí (p<0.05)
CA:MM:CD-HB:ML:CD	47.42%	40.59%	54.25%	0.0000	Sí (p<0.05)
HA:MM:CD-HB:ML:CD	74.86%	68.03%	81.69%	0.0000	Sí (p<0.05)
HB:MM:CD-HB:ML:CD	-3.59%	-10.42%	3.24%	0.9621	No
SP:MM:CD-HB:ML:CD	35.96%	29.13%	42.79%	0.0000	Sí (p<0.05)
CA:SM:CD-HB:ML:CD	56.00%	49.17%	62.83%	0.0000	Sí (p<0.05)
HA:SM:CD-HB:ML:CD	64.28%	57.45%	71.11%	0.0000	Sí (p<0.05)
HB:SM:CD-HB:ML:CD	-3.32%	-10.15%	3.51%	0.9846	No
SP:SM:CD-HB:ML:CD	30.47%	23.64%	37.30%	0.0000	Sí (p<0.05)
CA:ML:CR-HB:ML:CD	61.29%	54.46%	68.12%	0.0000	Sí (p<0.05)
HA:ML:CR-HB:ML:CD	39.46%	32.63%	46.29%	0.0000	Sí (p<0.05)
HB:ML:CR-HB:ML:CD	-0.93%	-7.76%	5.91%	1.0000	No
SP:ML:CR-HB:ML:CD	32.22%	25.39%	39.05%	0.0000	Sí (p<0.05)
CA:MM:CR-HB:ML:CD	59.89%	53.06%	66.72%	0.0000	Sí (p<0.05)
HA:MM:CR-HB:ML:CD	69.75%	62.92%	76.58%	0.0000	Sí (p<0.05)
HB:MM:CR-HB:ML:CD	-1.43%	-8.26%	5.40%	1.0000	No
SP:MM:CR-HB:ML:CD	26.41%	19.58%	33.24%	0.0000	Sí (p<0.05)
CA:SM:CR-HB:ML:CD	53.67%	46.84%	60.50%	0.0000	Sí (p<0.05)
HA:SM:CR-HB:ML:CD	75.08%	68.25%	81.91%	0.0000	Sí (p<0.05)
HB:SM:CR-HB:ML:CD	-1.42%	-8.25%	5.41%	1.0000	No
SP:SM:CR-HB:ML:CD	35.38%	28.55%	42.21%	0.0000	Sí (p<0.05)
CA:MM:CD-SP:ML:CD	13.77%	6.94%	20.60%	0.0000	Sí (p<0.05)
HA:MM:CD-SP:ML:CD	41.21%	34.38%	48.04%	0.0000	Sí (p<0.05)
HB:MM:CD-SP:ML:CD	-37.24%	-44.07%	-30.41%	0.0000	Sí (p<0.05)
SP:MM:CD-SP:ML:CD	2.31%	-4.52%	9.14%	0.9999	No
CA:SM:CD-SP:ML:CD	22.35%	15.52%	29.18%	0.0000	Sí (p<0.05)
HA:SM:CD-SP:ML:CD	30.63%	23.80%	37.46%	0.0000	Sí (p<0.05)
HB:SM:CD-SP:ML:CD	-36.97%	-43.80%	-30.14%	0.0000	Sí (p<0.05)
SP:SM:CD-SP:ML:CD	-3.18%	-10.01%	3.65%	0.9909	No
CA:ML:CR-SP:ML:CD	27.64%	20.81%	34.47%	0.0000	Sí (p<0.05)
HA:ML:CR-SP:ML:CD	5.81%	-1.02%	12.64%	0.2315	No
HB:ML:CR-SP:ML:CD	-34.58%	-41.41%	-27.74%	0.0000	Sí (p<0.05)
SP:ML:CR-SP:ML:CD	-1.43%	-8.26%	5.40%	1.0000	No
CA:MM:CR-SP:ML:CD	26.24%	19.41%	33.07%	0.0000	Sí (p<0.05)
HA:MM:CR-SP:ML:CD	36.10%	29.27%	42.93%	0.0000	Sí (p<0.05)
HB:MM:CR-SP:ML:CD	-35.08%	-41.91%	-28.25%	0.0000	Sí (p<0.05)
SP:MM:CR-SP:ML:CD	-7.24%	-14.07%	-0.41%	0.0239	Sí (p<0.05)
CA:SM:CR-SP:ML:CD	20.02%	13.19%	26.85%	0.0000	Sí (p<0.05)
HA:SM:CR-SP:ML:CD	41.43%	34.60%	48.26%	0.0000	Sí (p<0.05)
HB:SM:CR-SP:ML:CD	-35.07%	-41.90%	-28.24%	0.0000	Sí (p<0.05)
SP:SM:CR-SP:ML:CD	1.73%	-5.10%	8.56%	1.0000	No
HA:MM:CD-CA:MM:CD	27.45%	20.62%	34.28%	0.0000	Sí (p<0.05)
HB:MM:CD-CA:MM:CD	-51.01%	-57.84%	-44.18%	0.0000	Sí (p<0.05)
SP:MM:CD-CA:MM:CD	-11.45%	-18.29%	-4.62%	0.0000	Sí (p<0.05)
CA:SM:CD-CA:MM:CD	8.58%	1.75%	15.41%	0.0014	Sí (p<0.05)

Comparación de combinaciones	Diferencia	Límite inferior	Límite superior	Valor p	Diferencia significativa
HA:SM:CD-CA:MM:CD	16.86%	10.03%	23.69%	0.0000	Sí (p<0.05)
HB:SM:CD-CA:MM:CD	-50.73%	-57.57%	-43.90%	0.0000	Sí (p<0.05)
SP:SM:CD-CA:MM:CD	-16.95%	-23.78%	-10.12%	0.0000	Sí (p<0.05)
CA:ML:CR-CA:MM:CD	13.87%	7.04%	20.70%	0.0000	Sí (p<0.05)
HA:ML:CR-CA:MM:CD	-7.96%	-14.79%	-1.13%	0.0056	Sí (p<0.05)
HB:ML:CR-CA:MM:CD	-48.34%	-55.17%	-41.51%	0.0000	Sí (p<0.05)
SP:ML:CR-CA:MM:CD	-15.20%	-22.03%	-8.36%	0.0000	Sí (p<0.05)
CA:MM:CR-CA:MM:CD	12.48%	5.65%	19.31%	0.0000	Sí (p<0.05)
HA:MM:CR-CA:MM:CD	22.34%	15.51%	29.17%	0.0000	Sí (p<0.05)
HB:MM:CR-CA:MM:CD	-48.85%	-55.68%	-42.02%	0.0000	Sí (p<0.05)
SP:MM:CR-CA:MM:CD	-21.00%	-27.83%	-14.17%	0.0000	Sí (p<0.05)
CA:SM:CR-CA:MM:CD	6.26%	-0.57%	13.09%	0.1252	No
HA:SM:CR-CA:MM:CD	27.67%	20.84%	34.50%	0.0000	Sí (p<0.05)
HB:SM:CR-CA:MM:CD	-48.84%	-55.67%	-42.01%	0.0000	Sí (p<0.05)
SP:SM:CR-CA:MM:CD	-12.04%	-18.87%	-5.21%	0.0000	Sí (p<0.05)
HB:MM:CD-HA:MM:CD	-78.46%	-85.29%	-71.63%	0.0000	Sí (p<0.05)
SP:MM:CD-HA:MM:CD	-38.90%	-45.73%	-32.07%	0.0000	Sí (p<0.05)
CA:SM:CD-HA:MM:CD	-18.86%	-25.70%	-12.03%	0.0000	Sí (p<0.05)
HA:SM:CD-HA:MM:CD	-10.59%	-17.42%	-3.76%	0.0000	Sí (p<0.05)
HB:SM:CD-HA:MM:CD	-78.18%	-85.01%	-71.35%	0.0000	Sí (p<0.05)
SP:SM:CD-HA:MM:CD	-44.40%	-51.23%	-37.57%	0.0000	Sí (p<0.05)
CA:ML:CR-HA:MM:CD	-13.58%	-20.41%	-6.75%	0.0000	Sí (p<0.05)
HA:ML:CR-HA:MM:CD	-35.41%	-42.24%	-28.58%	0.0000	Sí (p<0.05)
HB:ML:CR-HA:MM:CD	-75.79%	-82.62%	-68.96%	0.0000	Sí (p<0.05)
SP:ML:CR-HA:MM:CD	-42.64%	-49.47%	-35.81%	0.0000	Sí (p<0.05)
CA:MM:CR-HA:MM:CD	-14.97%	-21.80%	-8.14%	0.0000	Sí (p<0.05)
HA:MM:CR-HA:MM:CD	-5.11%	-11.94%	1.72%	0.4844	No
HB:MM:CR-HA:MM:CD	-76.29%	-83.12%	-69.46%	0.0000	Sí (p<0.05)
SP:MM:CR-HA:MM:CD	-48.45%	-55.28%	-41.62%	0.0000	Sí (p<0.05)
CA:SM:CR-HA:MM:CD	-21.19%	-28.02%	-14.36%	0.0000	Sí (p<0.05)
HA:SM:CR-HA:MM:CD	0.22%	-6.61%	7.05%	1.0000	No
HB:SM:CR-HA:MM:CD	-76.29%	-83.12%	-69.45%	0.0000	Sí (p<0.05)
SP:SM:CR-HA:MM:CD	-39.49%	-46.32%	-32.66%	0.0000	Sí (p<0.05)
SP:MM:CD-HB:MM:CD	39.55%	32.72%	46.38%	0.0000	Sí (p<0.05)
CA:SM:CD-HB:MM:CD	59.59%	52.76%	66.42%	0.0000	Sí (p<0.05)
HA:SM:CD-HB:MM:CD	67.87%	61.04%	74.70%	0.0000	Sí (p<0.05)
HB:SM:CD-HB:MM:CD	0.27%	-6.56%	7.10%	1.0000	No
SP:SM:CD-HB:MM:CD	34.06%	27.23%	40.89%	0.0000	Sí (p<0.05)
CA:ML:CR-HB:MM:CD	64.88%	58.05%	71.71%	0.0000	Sí (p<0.05)
HA:ML:CR-HB:MM:CD	43.05%	36.22%	49.88%	0.0000	Sí (p<0.05)
HB:ML:CR-HB:MM:CD	2.67%	-4.16%	9.50%	0.9992	No
SP:ML:CR-HB:MM:CD	35.81%	28.98%	42.64%	0.0000	Sí (p<0.05)
CA:MM:CR-HB:MM:CD	63.49%	56.66%	70.32%	0.0000	Sí (p<0.05)
HA:MM:CR-HB:MM:CD	73.35%	66.51%	80.18%	0.0000	Sí (p<0.05)
HB:MM:CR-HB:MM:CD	2.16%	-4.67%	8.99%	1.0000	No
SP:MM:CR-HB:MM:CD	30.00%	23.17%	36.84%	0.0000	Sí (p<0.05)
CA:SM:CR-HB:MM:CD	57.27%	50.44%	64.10%	0.0000	Sí (p<0.05)

Comparación de combinaciones	Diferencia	Límite inferior	Límite superior	Valor p	Diferencia significativa
HA:SM:CR-HB:MM:CD	78.67%	71.84%	85.51%	0.0000	Si (p<0.05)
HB:SM:CR-HB:MM:CD	2.17%	-4.66%	9.00%	1.0000	No
SP:SM:CR-HB:MM:CD	38.97%	32.14%	45.80%	0.0000	Si (p<0.05)
CA:SM:CD-SP:MM:CD	20.04%	13.21%	26.87%	0.0000	Si (p<0.05)
HA:SM:CD-SP:MM:CD	28.32%	21.49%	35.15%	0.0000	Si (p<0.05)
HB:SM:CD-SP:MM:CD	-39.28%	-46.11%	-32.45%	0.0000	Si (p<0.05)
SP:SM:CD-SP:MM:CD	-5.49%	-12.32%	1.34%	0.3342	No
CA:ML:CR-SP:MM:CD	25.33%	18.50%	32.16%	0.0000	Si (p<0.05)
HA:ML:CR-SP:MM:CD	3.50%	-3.33%	10.33%	0.9718	No
HB:ML:CR-SP:MM:CD	-36.89%	-43.72%	-30.06%	0.0000	Si (p<0.05)
SP:ML:CR-SP:MM:CD	-3.74%	-10.57%	3.09%	0.9425	No
CA:MM:CR-SP:MM:CD	23.93%	17.10%	30.76%	0.0000	Si (p<0.05)
HA:MM:CR-SP:MM:CD	33.79%	26.96%	40.62%	0.0000	Si (p<0.05)
HB:MM:CR-SP:MM:CD	-37.39%	-44.22%	-30.56%	0.0000	Si (p<0.05)
SP:MM:CR-SP:MM:CD	-9.55%	-16.38%	-2.72%	0.0001	Si (p<0.05)
CA:SM:CR-SP:MM:CD	17.71%	10.88%	24.54%	0.0000	Si (p<0.05)
HA:SM:CR-SP:MM:CD	39.12%	32.29%	45.95%	0.0000	Si (p<0.05)
HB:SM:CR-SP:MM:CD	-37.38%	-44.21%	-30.55%	0.0000	Si (p<0.05)
SP:SM:CR-SP:MM:CD	-0.58%	-7.41%	6.25%	1.0000	No
HA:SM:CD-CA:SM:CD	8.28%	1.45%	15.11%	0.0028	Si (p<0.05)
HB:SM:CD-CA:SM:CD	-59.32%	-66.15%	-52.49%	0.0000	Si (p<0.05)
SP:SM:CD-CA:SM:CD	-25.53%	-32.36%	-18.70%	0.0000	Si (p<0.05)
CA:ML:CR-CA:SM:CD	5.29%	-1.54%	12.12%	0.4122	No
HA:ML:CR-CA:SM:CD	-16.54%	-23.37%	-9.71%	0.0000	Si (p<0.05)
HB:ML:CR-CA:SM:CD	-56.93%	-63.76%	-50.09%	0.0000	Si (p<0.05)
SP:ML:CR-CA:SM:CD	-23.78%	-30.61%	-16.95%	0.0000	Si (p<0.05)
CA:MM:CR-CA:SM:CD	3.89%	-2.94%	10.72%	0.9156	No
HA:MM:CR-CA:SM:CD	13.75%	6.92%	20.58%	0.0000	Si (p<0.05)
HB:MM:CR-CA:SM:CD	-57.43%	-64.26%	-50.60%	0.0000	Si (p<0.05)
SP:MM:CR-CA:SM:CD	-29.59%	-36.42%	-22.76%	0.0000	Si (p<0.05)
CA:SM:CR-CA:SM:CD	-2.33%	-9.16%	4.50%	0.9999	No
HA:SM:CR-CA:SM:CD	19.08%	12.25%	25.91%	0.0000	Si (p<0.05)
HB:SM:CR-CA:SM:CD	-57.42%	-64.25%	-50.59%	0.0000	Si (p<0.05)
SP:SM:CR-CA:SM:CD	-20.62%	-27.45%	-13.79%	0.0000	Si (p<0.05)
HB:SM:CD-HA:SM:CD	-67.60%	-74.43%	-60.77%	0.0000	Si (p<0.05)
SP:SM:CD-HA:SM:CD	-33.81%	-40.64%	-26.98%	0.0000	Si (p<0.05)
CA:ML:CR-HA:SM:CD	-2.99%	-9.82%	3.84%	0.9960	No
HA:ML:CR-HA:SM:CD	-24.82%	-31.65%	-17.99%	0.0000	Si (p<0.05)
HB:ML:CR-HA:SM:CD	-65.20%	-72.03%	-58.37%	0.0000	Si (p<0.05)
SP:ML:CR-HA:SM:CD	-32.06%	-38.89%	-25.23%	0.0000	Si (p<0.05)
CA:MM:CR-HA:SM:CD	-4.38%	-11.22%	2.45%	0.7794	No
HA:MM:CR-HA:SM:CD	5.47%	-1.36%	12.31%	0.3408	No
HB:MM:CR-HA:SM:CD	-65.71%	-72.54%	-58.88%	0.0000	Si (p<0.05)
SP:MM:CR-HA:SM:CD	-37.87%	-44.70%	-31.04%	0.0000	Si (p<0.05)
CA:SM:CR-HA:SM:CD	-10.60%	-17.44%	-3.77%	0.0000	Si (p<0.05)
HA:SM:CR-HA:SM:CD	10.80%	3.97%	17.63%	0.0000	Si (p<0.05)
HB:SM:CR-HA:SM:CD	-65.70%	-72.53%	-58.87%	0.0000	Si (p<0.05)

Comparación de combinaciones	Diferencia	Límite inferior	Límite superior	Valor p	Diferencia significativa
SP:SM:CR-HA:SM:CD	-28.90%	-35.73%	-22.07%	0.0000	Sí (p<0.05)
SP:SM:CD-HB:SM:CD	33.79%	26.96%	40.62%	0.0000	Sí (p<0.05)
CA:ML:CR-HB:SM:CD	64.61%	57.78%	71.44%	0.0000	Sí (p<0.05)
HA:ML:CR-HB:SM:CD	42.78%	35.95%	49.61%	0.0000	Sí (p<0.05)
HB:ML:CR-HB:SM:CD	2.39%	-4.44%	9.22%	0.9999	No
SP:ML:CR-HB:SM:CD	35.54%	28.71%	42.37%	0.0000	Sí (p<0.05)
CA:MM:CR-HB:SM:CD	63.21%	56.38%	70.04%	0.0000	Sí (p<0.05)
HA:MM:CR-HB:SM:CD	73.07%	66.24%	79.90%	0.0000	Sí (p<0.05)
HB:MM:CR-HB:SM:CD	1.89%	-4.94%	8.72%	1.0000	No
SP:MM:CR-HB:SM:CD	29.73%	22.90%	36.56%	0.0000	Sí (p<0.05)
CA:SM:CR-HB:SM:CD	56.99%	50.16%	63.82%	0.0000	Sí (p<0.05)
HA:SM:CR-HB:SM:CD	78.40%	71.57%	85.23%	0.0000	Sí (p<0.05)
HB:SM:CR-HB:SM:CD	1.90%	-4.93%	8.73%	1.0000	No
SP:SM:CR-HB:SM:CD	38.70%	31.87%	45.53%	0.0000	Sí (p<0.05)
CA:ML:CR-SP:SM:CD	30.82%	23.99%	37.65%	0.0000	Sí (p<0.05)
HA:ML:CR-SP:SM:CD	8.99%	2.16%	15.82%	0.0005	Sí (p<0.05)
HB:ML:CR-SP:SM:CD	-31.39%	-38.22%	-24.56%	0.0000	Sí (p<0.05)
SP:ML:CR-SP:SM:CD	1.75%	-5.08%	8.58%	1.0000	No
CA:MM:CR-SP:SM:CD	29.43%	22.59%	36.26%	0.0000	Sí (p<0.05)
HA:MM:CR-SP:SM:CD	39.28%	32.45%	46.11%	0.0000	Sí (p<0.05)
HB:MM:CR-SP:SM:CD	-31.90%	-38.73%	-25.07%	0.0000	Sí (p<0.05)
SP:MM:CR-SP:SM:CD	-4.06%	-10.89%	2.77%	0.8789	No
CA:SM:CR-SP:SM:CD	23.21%	16.37%	30.04%	0.0000	Sí (p<0.05)
HA:SM:CR-SP:SM:CD	44.61%	37.78%	51.44%	0.0000	Sí (p<0.05)
HB:SM:CR-SP:SM:CD	-31.89%	-38.72%	-25.06%	0.0000	Sí (p<0.05)
SP:SM:CR-SP:SM:CD	4.91%	-1.92%	11.74%	0.5697	No
HA:ML:CR-CA:ML:CR	-21.83%	-28.66%	-15.00%	0.0000	Sí (p<0.05)
HB:ML:CR-CA:ML:CR	-62.21%	-69.04%	-55.38%	0.0000	Sí (p<0.05)
SP:ML:CR-CA:ML:CR	-29.07%	-35.90%	-22.24%	0.0000	Sí (p<0.05)
CA:MM:CR-CA:ML:CR	-1.39%	-8.22%	5.44%	1.0000	No
HA:MM:CR-CA:ML:CR	8.47%	1.63%	15.30%	0.0018	Sí (p<0.05)
HB:MM:CR-CA:ML:CR	-62.72%	-69.55%	-55.89%	0.0000	Sí (p<0.05)
SP:MM:CR-CA:ML:CR	-34.88%	-41.71%	-28.04%	0.0000	Sí (p<0.05)
CA:SM:CR-CA:ML:CR	-7.61%	-14.44%	-0.78%	0.0115	Sí (p<0.05)
HA:SM:CR-CA:ML:CR	13.79%	6.96%	20.63%	0.0000	Sí (p<0.05)
HB:SM:CR-CA:ML:CR	-62.71%	-69.54%	-55.88%	0.0000	Sí (p<0.05)
SP:SM:CR-CA:ML:CR	-25.91%	-32.74%	-19.08%	0.0000	Sí (p<0.05)
HB:ML:CR-HA:ML:CR	-40.38%	-47.21%	-33.55%	0.0000	Sí (p<0.05)
SP:ML:CR-HA:ML:CR	-7.24%	-14.07%	-0.41%	0.0240	Sí (p<0.05)
CA:MM:CR-HA:ML:CR	20.44%	13.61%	27.27%	0.0000	Sí (p<0.05)
HA:MM:CR-HA:ML:CR	30.30%	23.46%	37.13%	0.0000	Sí (p<0.05)
HB:MM:CR-HA:ML:CR	-40.89%	-47.72%	-34.06%	0.0000	Sí (p<0.05)
SP:MM:CR-HA:ML:CR	-13.05%	-19.88%	-6.21%	0.0000	Sí (p<0.05)
CA:SM:CR-HA:ML:CR	14.22%	7.39%	21.05%	0.0000	Sí (p<0.05)
HA:SM:CR-HA:ML:CR	35.62%	28.79%	42.46%	0.0000	Sí (p<0.05)
HB:SM:CR-HA:ML:CR	-40.88%	-47.71%	-34.05%	0.0000	Sí (p<0.05)
SP:SM:CR-HA:ML:CR	-4.08%	-10.91%	2.75%	0.8731	No

Comparación de combinaciones	Diferencia	Límite inferior	Límite superior	Valor p	Diferencia significativa
SP:ML:CR-HB:ML:CR	33.15%	26.31%	39.98%	0.0000	Sí (p<0.05)
CA:MM:CR-HB:ML:CR	60.82%	53.99%	67.65%	0.0000	Sí (p<0.05)
HA:MM:CR-HB:ML:CR	70.68%	63.85%	77.51%	0.0000	Sí (p<0.05)
HB:MM:CR-HB:ML:CR	-0.50%	-7.34%	6.33%	1.0000	No
SP:MM:CR-HB:ML:CR	27.34%	20.51%	34.17%	0.0000	Sí (p<0.05)
CA:SM:CR-HB:ML:CR	54.60%	47.77%	61.43%	0.0000	Sí (p<0.05)
HA:SM:CR-HB:ML:CR	76.01%	69.18%	82.84%	0.0000	Sí (p<0.05)
HB:SM:CR-HB:ML:CR	-0.50%	-7.33%	6.34%	1.0000	No
SP:SM:CR-HB:ML:CR	36.30%	29.47%	43.13%	0.0000	Sí (p<0.05)
CA:MM:CR-SP:ML:CR	27.67%	20.84%	34.50%	0.0000	Sí (p<0.05)
HA:MM:CR-SP:ML:CR	37.53%	30.70%	44.36%	0.0000	Sí (p<0.05)
HB:MM:CR-SP:ML:CR	-33.65%	-40.48%	-26.82%	0.0000	Sí (p<0.05)
SP:MM:CR-SP:ML:CR	-5.81%	-12.64%	1.02%	0.2314	No
CA:SM:CR-SP:ML:CR	21.45%	14.62%	28.28%	0.0000	Sí (p<0.05)
HA:SM:CR-SP:ML:CR	42.86%	36.03%	49.69%	0.0000	Sí (p<0.05)
HB:SM:CR-SP:ML:CR	-33.64%	-40.47%	-26.81%	0.0000	Sí (p<0.05)
SP:SM:CR-SP:ML:CR	3.16%	-3.67%	9.99%	0.9917	No
HA:MM:CR-CA:MM:CR	9.86%	3.03%	16.69%	0.0001	Sí (p<0.05)
HB:MM:CR-CA:MM:CR	-61.32%	-68.15%	-54.49%	0.0000	Sí (p<0.05)
HA:SM:CR-HB:ML:CR	76.01%	69.18%	82.84%	0.0000	Sí (p<0.05)
HB:SM:CR-HB:ML:CR	-0.50%	-7.33%	6.34%	1.0000	No
SP:SM:CR-HB:ML:CR	36.30%	29.47%	43.13%	0.0000	Sí (p<0.05)

Fuente: Elaboración propia (2025) a partir de datos experimentales procesados en RStudio

Cuadro 124: Lecturas de absorbancia sin corrección de blanco para la construcción de la isoterma de Langmuir con carbón activado comercial y colorante directo. Sin filtrar

No.	Triplicado	Concentración de colorante (mg/L)	Cantidad de colorante (mg)	Volumen de solución (L)	Concentración adsorbente (mg/L)	Cantidad de adsorbente (mg) en solución	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
1	1	10	0.5	0.05	18	0.9	0.329	0.318	0.325
	2	10	0.5	0.05	18	0.9	0.374	0.358	0.350
	3	10	0.5	0.05	18	0.9	0.332	0.330	0.311
2	1	20	1	0.05	18	0.9	0.315	0.296	0.318
	2	20	1	0.05	18	0.9	0.327	0.316	0.323
	3	20	1	0.05	18	0.9	0.390	0.370	0.374
3	1	30	1.5	0.05	18	0.9	0.405	0.383	0.405
	2	30	1.5	0.05	18	0.9	0.423	0.424	0.429
	3	30	1.5	0.05	18	0.9	0.501	0.497	0.486
4	1	40	2	0.05	18	0.9	0.471	0.474	0.456
	2	40	2	0.05	18	0.9	0.451	0.469	0.469
	3	40	2	0.05	18	0.9	0.485	0.488	0.474
5	1	50	2.5	0.05	18	0.9	0.432	0.439	0.441
	2	50	2.5	0.05	18	0.9	0.539	0.558	0.531
	3	50	2.5	0.05	18	0.9	0.515	0.524	0.516
6	1	60	3	0.05	18	0.9	0.520	0.523	0.527
	2	60	3	0.05	18	0.9	0.544	0.543	0.532
	3	60	3	0.05	18	0.9	0.583	0.585	0.584
7	1	70	3.5	0.05	18	0.9	0.581	0.578	0.581
	2	70	3.5	0.05	18	0.9	0.574	0.564	0.557
	3	70	3.5	0.05	18	0.9	0.646	0.654	0.649
8	1	80	4	0.05	18	0.9	0.657	0.658	0.657
	2	80	4	0.05	18	0.9	0.608	0.598	0.596
	3	80	4	0.05	18	0.9	0.595	0.597	0.593
9	1	90	4.5	0.05	18	0.9	0.649	0.652	0.654
	2	90	4.5	0.05	18	0.9	0.602	0.592	0.591
	3	90	4.5	0.05	18	0.9	0.615	0.616	0.616
10	1	100	5	0.05	18	0.9	0.641	0.646	0.640
	2	100	5	0.05	18	0.9	0.635	0.632	0.627
	3	100	5	0.05	18	0.9	0.643	0.644	0.620
0	1	0	0	0.05	18	0.9	0.193	0.195	0.195
	2	0	0	0.05	18	0.9	0.214	0.206	0.211
	3	0	0	0.05	18	0.9	0.149	0.150	0.143

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 125: Lecturas espectrofotométricas corregidas por blanco promedio para la construcción de la isoterma de Langmuir con carbón activado comercial y colorante directo. Sin filtrar

No.	Triplicado	Concentración de colorante (mg/L)	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3
1	1	10	0.145	0.134	0.141
	2	10	0.190	0.174	0.166
	3	10	0.148	0.146	0.127
2	1	20	0.131	0.112	0.134
	2	20	0.143	0.132	0.139
	3	20	0.206	0.186	0.190
3	1	30	0.221	0.199	0.221
	2	30	0.239	0.240	0.245
	3	30	0.317	0.313	0.302
4	1	40	0.287	0.290	0.272
	2	40	0.267	0.285	0.285
	3	40	0.301	0.304	0.290
5	1	50	0.248	0.255	0.257
	2	50	0.355	0.374	0.347
	3	50	0.331	0.340	0.332
6	1	60	0.336	0.339	0.343
	2	60	0.360	0.359	0.348
	3	60	0.399	0.401	0.400
7	1	70	0.397	0.394	0.397
	2	70	0.390	0.380	0.373
	3	70	0.462	0.470	0.465
8	1	80	0.473	0.474	0.473
	2	80	0.424	0.414	0.412
	3	80	0.411	0.413	0.409
9	1	90	0.465	0.468	0.470
	2	90	0.418	0.408	0.407
	3	90	0.431	0.432	0.432
10	1	100	0.457	0.462	0.456
	2	100	0.451	0.448	0.443
	3	100	0.459	0.460	0.436

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 126: Concentración de equilibrio (Ce) estimada a partir de la curva de calibración para el carbón activado comercial y colorante directo. Sin filtrar

No.	Triplicado	Concentración de colorante (mg/L)	Ce1 (mg/L)	Ce2 (mg/L)	Ce3 (mg/L)	Ce promedio (mg/L)
1	1	10	15.729	14.583	15.313	15.208
	2	10	20.421	18.750	17.917	19.029
	3	10	16.042	15.833	13.854	15.243
2	1	20	14.271	12.292	14.583	13.715
	2	20	15.521	14.375	15.104	15.000
	3	20	22.105	20.000	20.421	20.842
3	1	30	23.684	21.368	23.684	22.912
	2	30	25.579	25.684	26.211	25.825
	3	30	34.865	33.368	32.211	33.481
4	1	40	30.811	31.216	29.053	30.360
	2	40	28.526	30.541	30.541	29.869
	3	40	32.703	33.108	31.216	32.342
5	1	50	26.526	27.263	27.474	27.088
	2	50	40.000	42.436	38.919	40.452
	3	50	36.757	37.973	36.892	37.207
6	1	60	37.432	37.838	38.378	37.883
	2	60	40.641	40.541	39.054	40.079
	3	60	45.641	45.897	45.769	45.769
7	1	70	45.385	45.000	45.385	45.256
	2	70	44.487	43.205	42.308	43.333
	3	70	55.273	56.727	55.818	55.939
8	1	80	57.273	57.455	57.273	57.333
	2	80	48.846	47.564	47.308	47.906
	3	80	47.179	47.436	46.923	47.179
9	1	90	55.818	56.364	56.727	56.303
	2	90	48.077	46.795	46.667	47.179
	3	90	49.744	49.872	49.872	49.829
10	1	100	54.364	55.273	54.182	54.606
	2	100	53.273	52.727	51.818	52.606
	3	100	54.727	54.909	50.545	53.394

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 127: Capacidad de adsorción en equilibrio (q_e) obtenida para carbón activado comercial y colorante directo. Sin filtrar

No.	Triplicado	Concentración de colorante (mg/L)	q_e promedio (mg/g)
1	1	10	-0.2894
	2	10	-0.5016
	3	10	-0.2913
2	1	20	0.3492
	2	20	0.2778
	3	20	-0.0468
3	1	30	0.3938
	2	30	0.2320
	3	30	-0.1934
4	1	40	0.5356
	2	40	0.5628
	3	40	0.4254
5	1	50	1.2729
	2	50	0.5305
	3	50	0.7107
6	1	60	1.2287
	2	60	1.1067
	3	60	0.7906
7	1	70	1.3746
	2	70	1.4815
	3	70	0.7811
8	1	80	1.2593
	2	80	1.7830
	3	80	1.8234
9	1	90	1.8721
	2	90	2.3789
	3	90	2.2317
10	1	100	2.5219
	2	100	2.6330
	3	100	2.5892

Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 128: Relación Ce/qe para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo. Sin filtrar

No.	Triplicado	Concentración de colorante (mg/L)	Ce/qe promedio (g/L)
1	1	10	-52.5600
	2	10	-37.9352
	3	10	-52.3311
2	1	20	39.2818
	2	20	54.0000
	3	20	-445.5000
3	1	30	58.1881
	2	30	111.3277
	3	30	-173.1158
4	1	40	56.6879
	2	40	53.0699
	3	40	76.0235
5	1	50	21.2802
	2	50	76.2567
	3	50	52.3521
6	1	60	30.8310
	2	60	36.2129
	3	60	57.8919
7	1	70	32.9223
	2	70	29.2500
	3	70	71.6121
8	1	80	45.5294
	2	80	26.8682
	3	80	25.8750
9	1	90	30.0755
	2	90	19.8323
	3	90	22.3277
10	1	100	21.6529
	2	100	19.9795
	3	100	20.6216

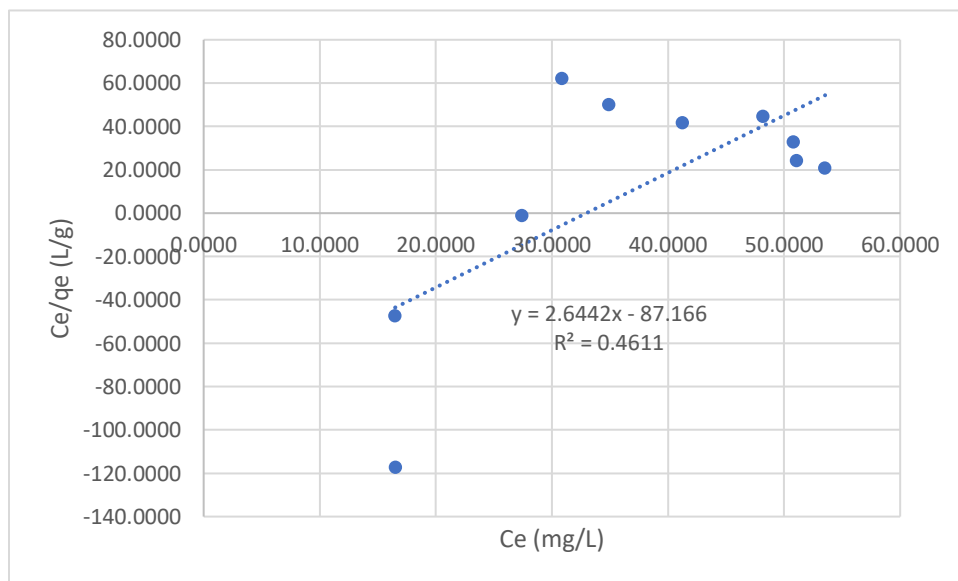
Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 129: Valores promedio de Ce y Ce/qe para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo. Sin filtrar

C0	Ce promedio (mg/L)	Ce/qe promedio (g/L)
10	16.4935	-47.6088
20	16.5191	-117.4061
30	27.4060	-1.2000
40	30.8571	61.9271
50	34.9155	49.9630
60	41.2436	41.6452
70	48.1764	44.5948
80	50.8063	32.7575
90	51.1039	24.0785
100	53.5354	20.7513

Fuente: Elaboración propia (2025)

Figura 47: Construcción de la representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo, a partir de los valores promedio obtenidos experimentalmente. Sin filtrar



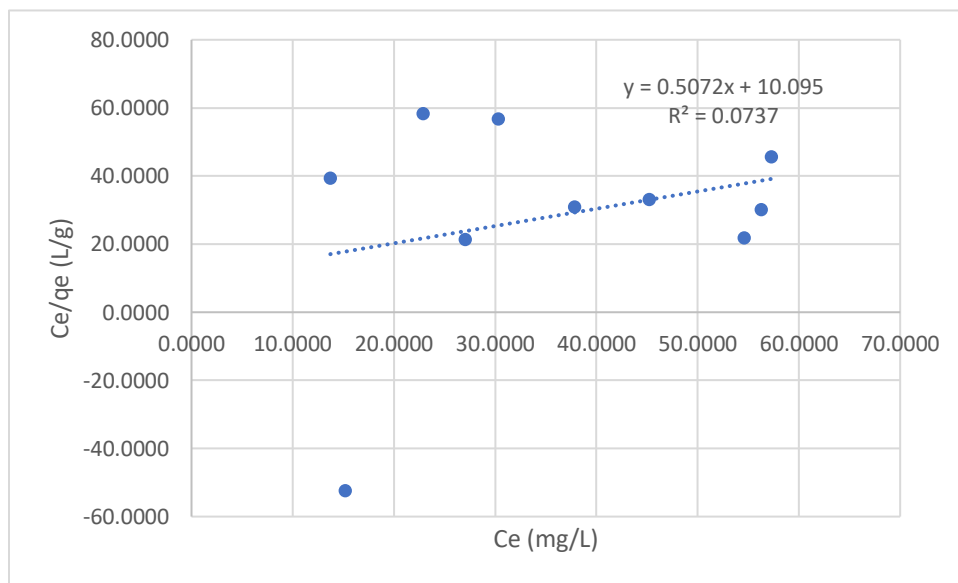
Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 130: Valores de la Muestra 1 de Ce y Ce/qe para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo. Sin filtrar

C0	Ce Muestra 1 (mg/L)	Ce/qe Muestra 1 (g/L)
10	15.2083	-52.5600
20	13.7153	39.2818
30	22.9123	58.1881
40	30.3599	56.6879
50	27.0877	21.2802
60	37.8829	30.8310
70	45.2564	32.9223
80	57.3333	45.5294
90	56.3030	30.0755
100	54.6061	21.6529

Fuente: Elaboración propia (2025)

Figura 48: Construcción de la representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo, a partir de los valores de la Muestra 1 obtenidos experimentalmente. Sin filtrar



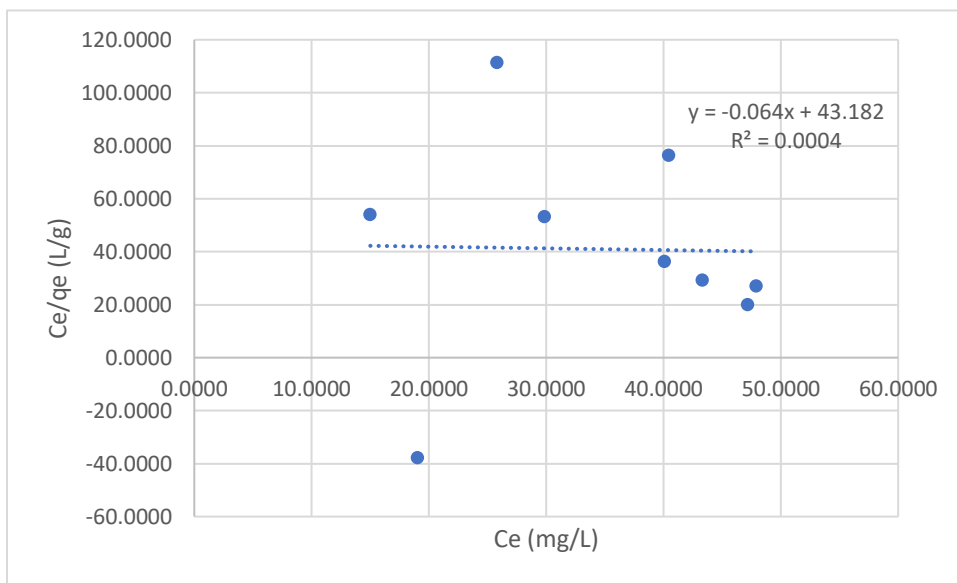
Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 131: Valores de la Muestra 2 de Ce y Ce/qe para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo. Sin filtrar

C0	Ce Muestra 2 (mg/L)	Ce/qe Muestra 2 (g/L)
10	19.0292	-37.9352
20	15.0000	54.0000
30	25.8246	111.3277
40	29.8691	53.0699
50	40.4516	76.2567
60	40.0785	36.2129
70	43.3333	29.2500
80	47.9060	26.8682
90	47.1795	19.8323
100	52.6061	19.9795

Fuente: Elaboración propia (2025)

Figura 49: Construcción de la representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo, a partir de los valores de la Muestra 2 obtenidos experimentalmente. Sin filtrar



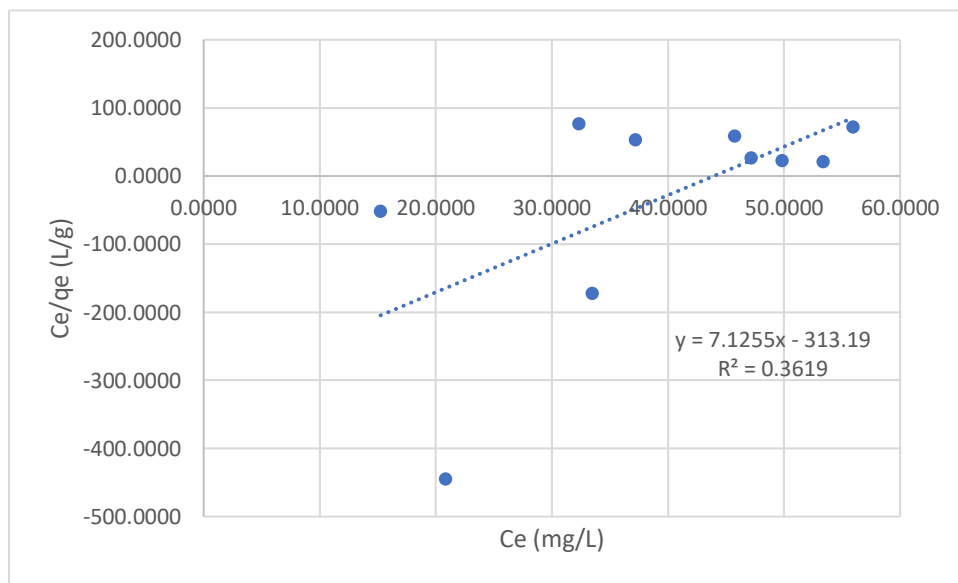
Fuente: Elaboración propia (2025)

Cuadro 132: Valores de la Muestra 3 de Ce y Ce/qe para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo. Sin filtrar

C0	Ce Muestra 3 (mg/L)	Ce/qe Muestra 3 (g/L)
10	15.2431	-52.3311
20	20.8421	-445.5000
30	33.4813	-173.1158
40	32.3423	76.0235
50	37.2072	52.3521
60	45.7692	57.8919
70	55.9394	71.6121
80	47.1795	25.8750
90	49.8291	22.3277
100	53.3939	20.6216

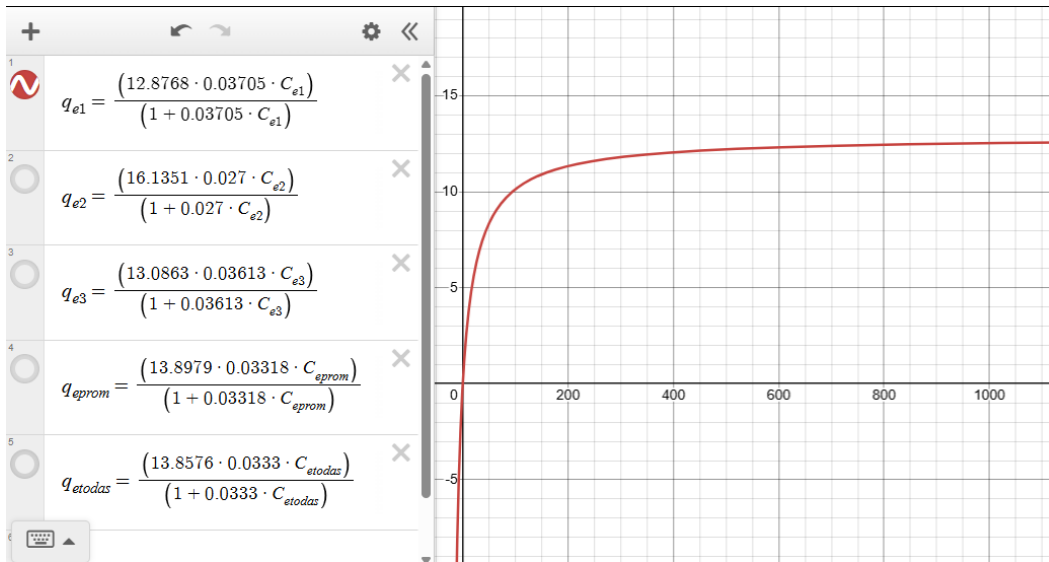
Fuente: Elaboración propia (2025)

Figura 50: Construcción de la representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo, a partir de los valores de la Muestra 3 obtenidos experimentalmente. Sin filtrar



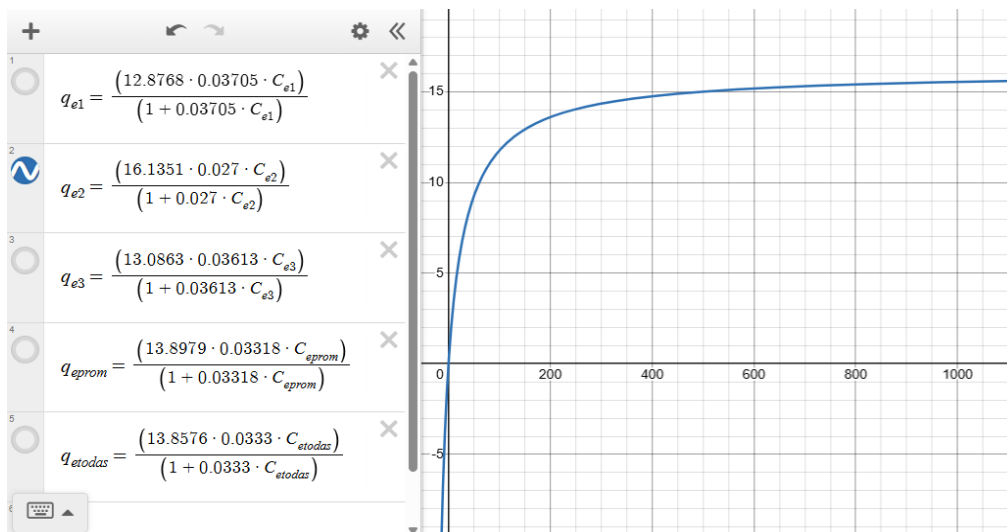
Fuente: Elaboración propia (2025)

Figura 51: Representación no lineal del modelo de Langmuir utilizando los parámetros Muestra 1 del tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo.



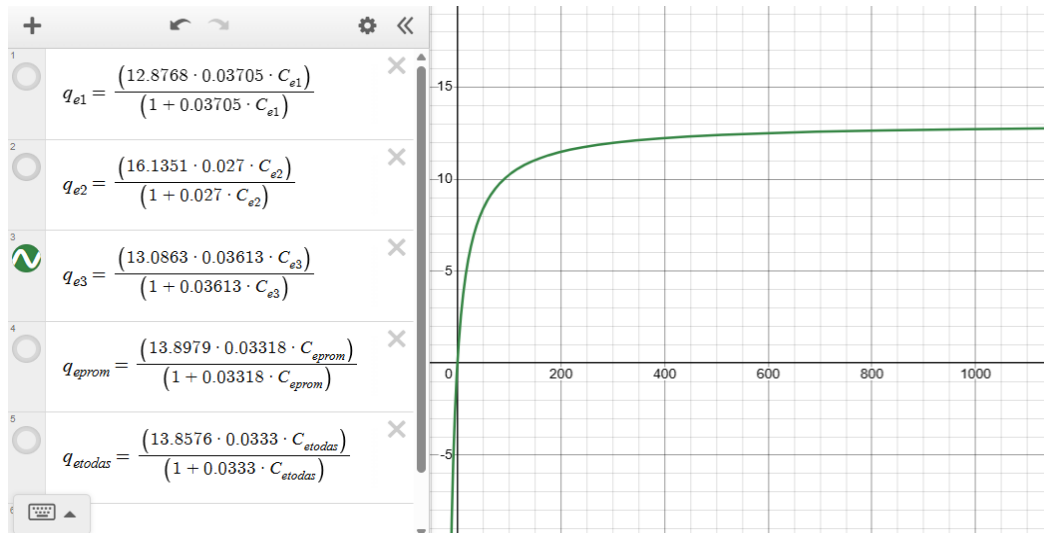
Fuente: Elaboración propia (2025) con apoyo de la plataforma Desmos

Figura 52: Representación no lineal del modelo de Langmuir utilizando los parámetros Muestra 2 del tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo.



Fuente: Elaboración propia (2025) con apoyo de la plataforma Desmos

Figura 53: Representación no lineal del modelo de Langmuir utilizando los parámetros Muestra 3 del tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo.



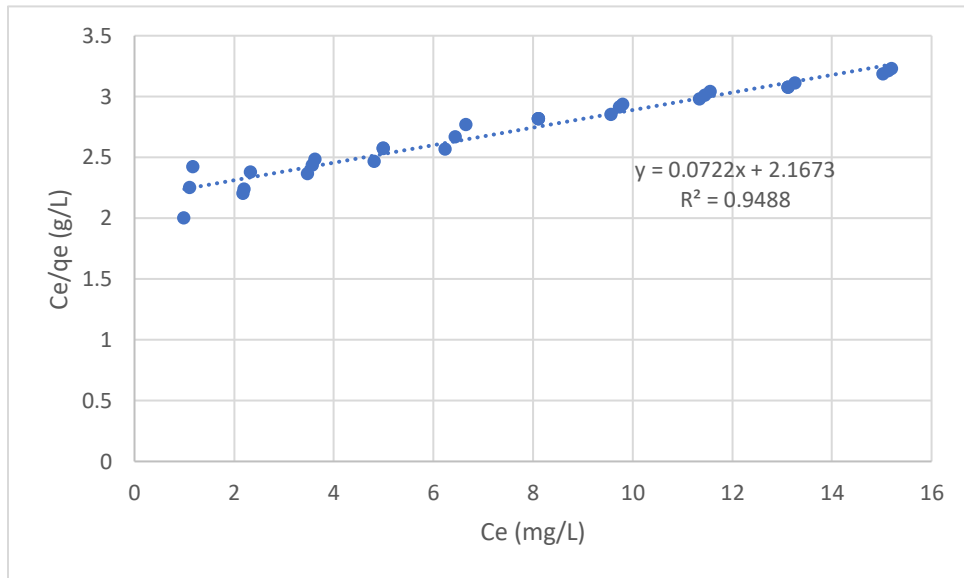
Fuente: Elaboración propia (2025) con apoyo de la plataforma Desmos

Cuadro 133: Valores de todas las mediciones de Ce y Ce/qe para el tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo

C0	Ce todas las muestras (mg/L)	Ce/qe todas las muestras (g/L)
10	1	2
10	1.1111	2.2500
10	1.1852	2.4202
20	2.1818	2.2041
20	2.2121	2.2385
20	2.3333	2.3774
30	3.4848	2.3657
30	3.5758	2.4358
30	3.6364	2.4828
40	4.8182	2.4651
40	5.0000	2.5714
40	5.0070	2.5755
50	6.2393	2.5664
50	6.4530	2.6673
50	6.6667	2.7692
60	8.1197	2.8171
60	8.1197	2.8171
60	8.1197	2.8171
70	9.5726	2.8515
70	9.7436	2.9106
70	9.8130	2.9348
80	11.3542	2.9772
80	11.4583	3.0091
80	11.5625	3.0411
90	13.1250	3.0732
90	13.1250	3.0732
90	13.2639	3.1113
100	15.0347	3.1851
100	15.1389	3.2111
100	15.2083	3.2285

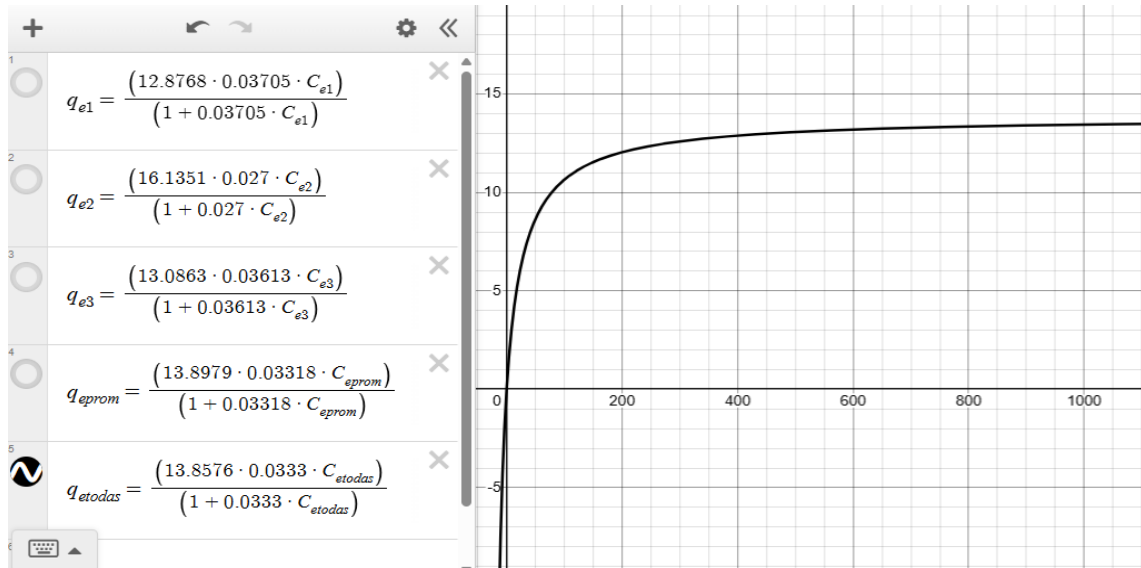
Fuente: Elaboración propia (2025)

Figura 54: Construcción de la representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo, a partir de los valores de todas las muestras obtenidos experimentalmente



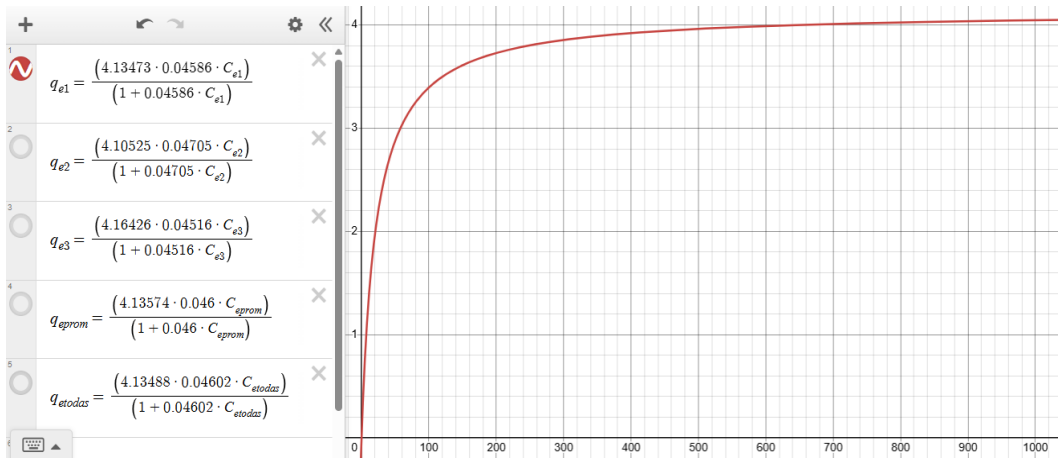
Fuente: Elaboración propia (2025)

Figura 55: Representación no lineal del modelo de Langmuir utilizando los parámetros de todas las muestras del tratamiento con residuos de palma africana (HAML) y colorante directo



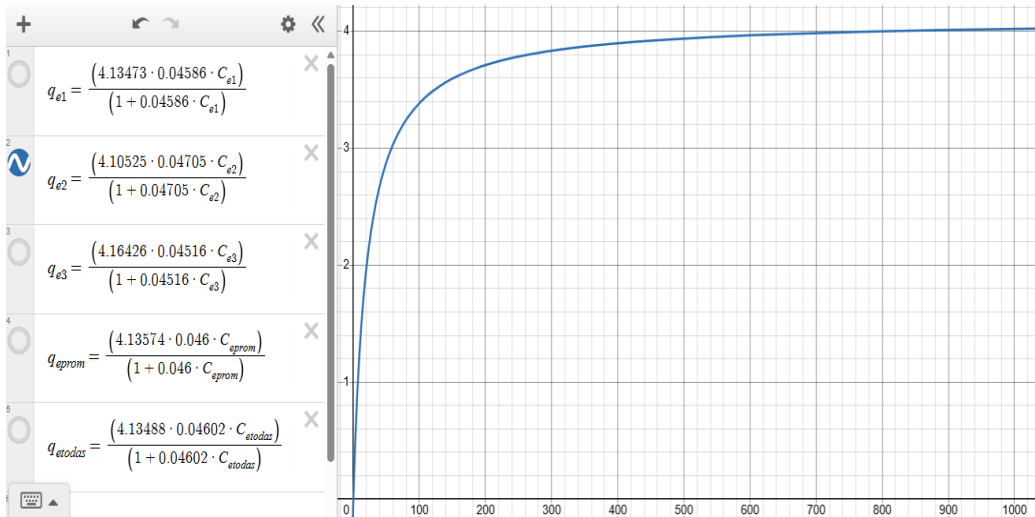
Fuente: Elaboración propia (2025) con apoyo de la plataforma Desmos

Figura 56: Representación no lineal del modelo de Langmuir utilizando los parámetros Muestra 1 del tratamiento carbón activado comercial y colorante directo



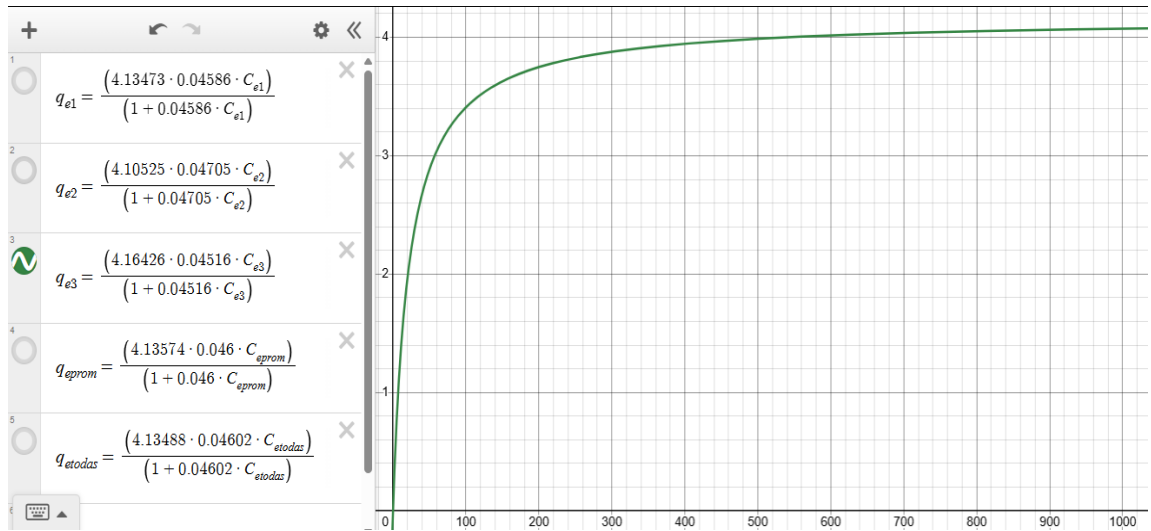
Fuente: Elaboración propia (2025) con apoyo de la plataforma Desmos

Figura 57: Representación no lineal del modelo de Langmuir utilizando los parámetros Muestra 2 del tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo



Fuente: Elaboración propia (2025) con apoyo de la plataforma Desmos

Figura 58: Representación no lineal del modelo de Langmuir utilizando los parámetros Muestra 3 del tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo



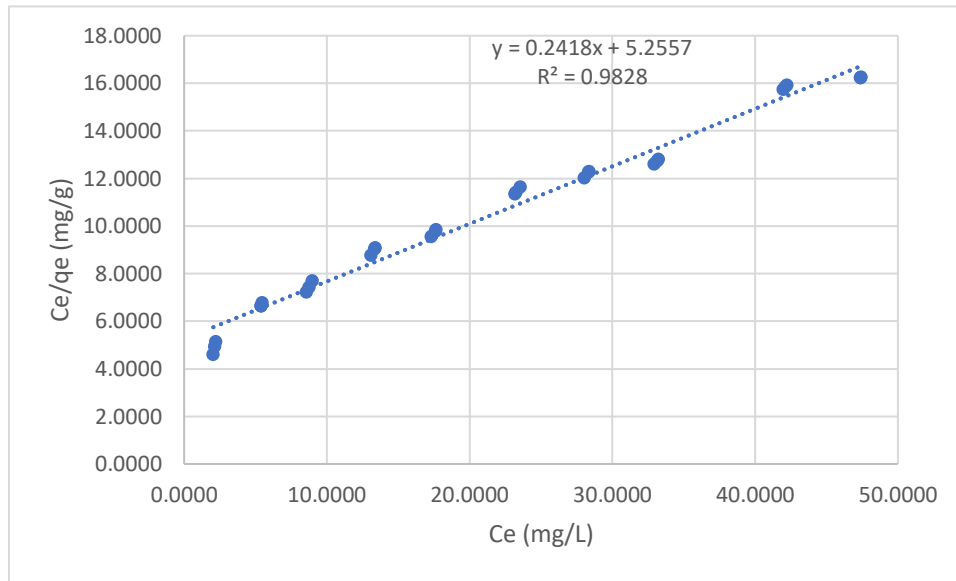
Fuente: Elaboración propia (2025) con apoyo de la plataforma Desmos

Cuadro 134: Valores de todas las mediciones de Ce y Ce/qe para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo

C0	Ce todas las muestras (mg/L)	Ce/qe todas las muestras (g/L)
10	2.0370	4.6047
10	2.1481	4.9245
10	2.2222	5.1429
20	5.3846	6.6316
20	5.3846	6.6316
20	5.4701	6.7765
30	8.5897	7.2216
30	8.7607	7.4245
30	8.9744	7.6829
40	13.0903	8.7561
40	13.3681	9.0352
40	13.4028	9.0705
50	17.3264	9.5452
50	17.6042	9.7814
50	17.6736	9.8410
60	23.1930	11.3422
60	23.2632	11.3983
60	23.5439	11.6246
70	28.0351	12.0251
70	28.3509	12.2527
70	28.3860	12.2782
80	32.9279	12.5914
80	33.1532	12.7385
80	33.2432	12.7977
90	41.9658	15.7260
90	42.1368	15.8464
90	42.2222	15.9070
100	47.3958	16.2178
100	47.3958	16.2178
100	47.4306	16.2404

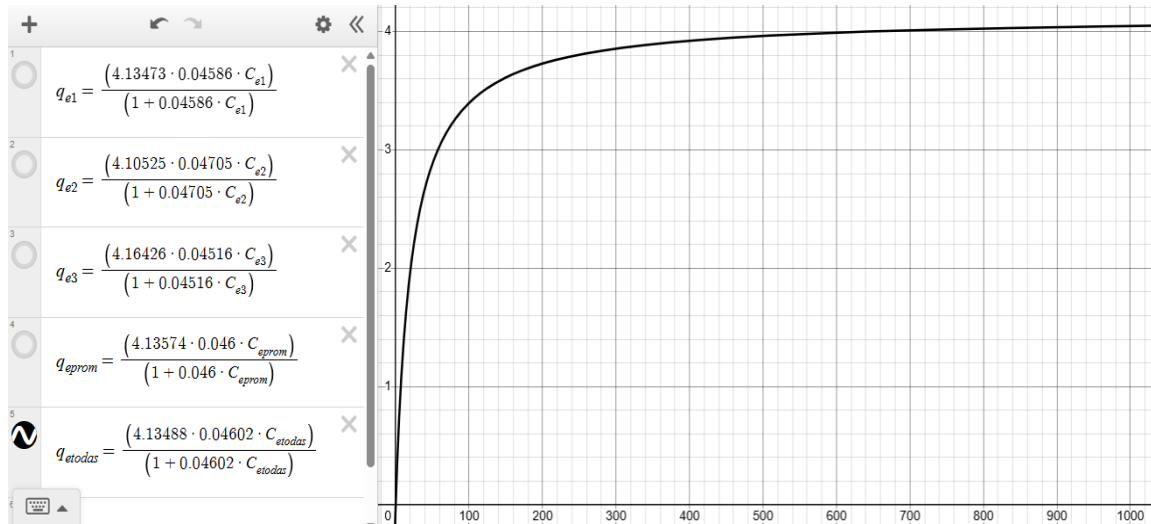
Fuente: Elaboración propia (2025)

Figura 59: Construcción de la representación lineal del modelo de Langmuir para el tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo, a partir de los valores de todas las muestras obtenidos experimentalmente



Fuente: Elaboración propia (2025)

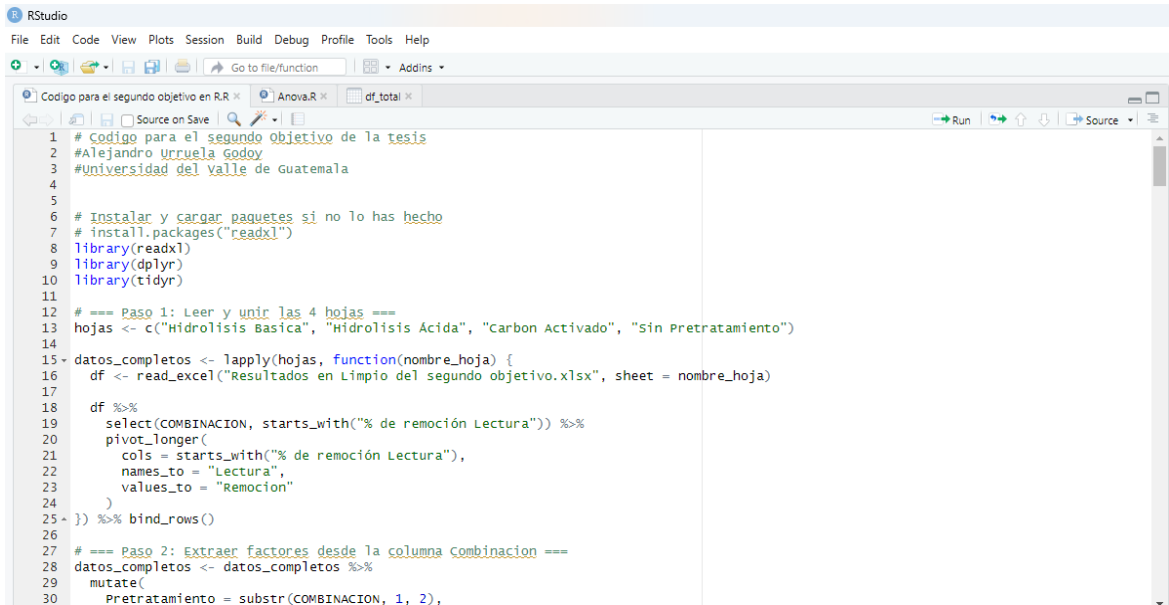
Figura 60: Representación no lineal del modelo de Langmuir utilizando los parámetros de todas las muestras del tratamiento con carbón activado comercial y colorante directo



Fuente: Elaboración propia (2025) con apoyo de la plataforma Desmos

CÓDIGO DE R

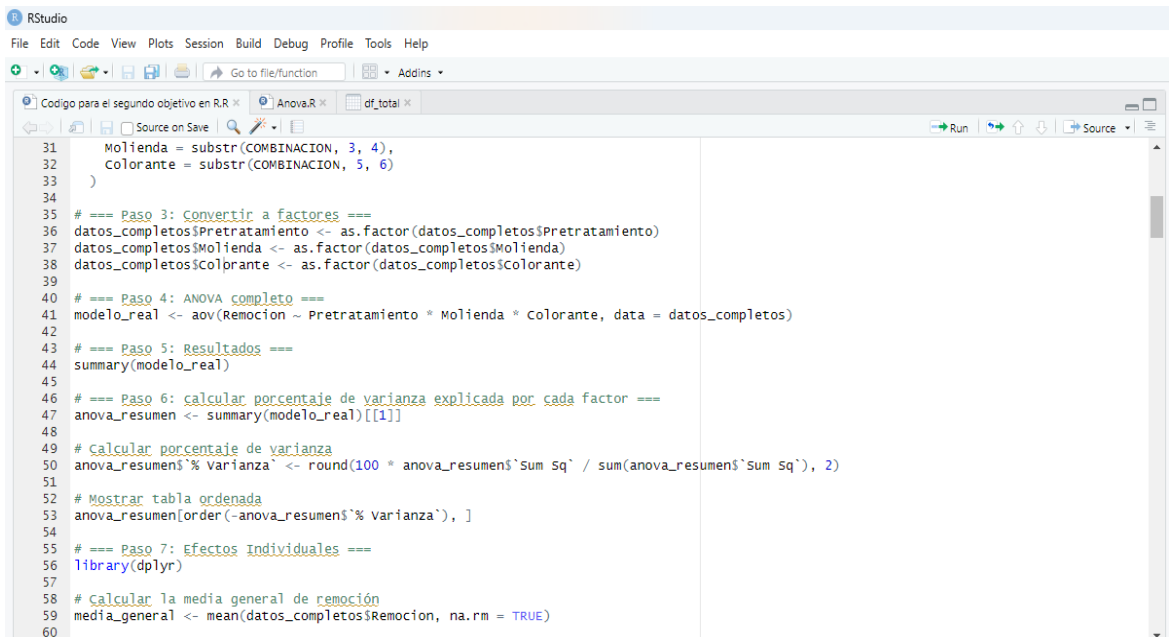
Figura 61: Código en R utilizado para el análisis estadístico



```
1 # Código para el segundo objetivo de la tesis
2 #Alejandro Urruela Godoy
3 #Universidad del valle de Guatemala
4
5
6 # Instalar y cargar paquetes si no lo has hecho
7 # install.packages("readxl")
8 library(readxl)
9 library(dplyr)
10 library(tidyr)
11
12 # === Paso 1: Leer y unir las 4 hojas ===
13 hojas <- c("Hidrolisis Basica", "Hidrolisis Acida", "Carbon Activado", "Sin Pretratamiento")
14
15 - datos_completos <- lapply(hojas, function(nombre_hoja) {
16   df <- read_excel("Resultados en Limpio del segundo objetivo.xlsx", sheet = nombre_hoja)
17
18   df %>%
19     select(COMBINACION, starts_with("% de remoción Lectura")) %>%
20     pivot_longer(
21       cols = starts_with("% de remoción Lectura"),
22       names_to = "Lectura",
23       values_to = "Remocion"
24     )
25 - }) %>% bind_rows()
26
27 # === Paso 2: Extraer factores desde la columna combinacion ===
28 datos_completos <- datos_completos %>%
29   mutate(
30     Pretratamiento = substr(COMBINACION, 1, 2),
```

Fuente: Elaboración propia (2025) en R Studio

Figura 62: Continuación del código en R utilizado para el análisis estadístico



```
31   Molienda = substr(COMBINACION, 3, 4),
32   Colorante = substr(COMBINACION, 5, 6)
33 )
34
35 # === Paso 3: Convertir a factores ===
36 datos_completos$Pretratamiento <- as.factor(datos_completos$Pretratamiento)
37 datos_completos$Molienda <- as.factor(datos_completos$Molienda)
38 datos_completos$Colorante <- as.factor(datos_completos$Colorante)
39
40 # === Paso 4: ANOVA completo ===
41 modelo_real <- aov(Remocion ~ Pretratamiento * Molienda * Colorante, data = datos_completos)
42
43 # === Paso 5: Resultados ===
44 summary(modelo_real)
45
46 # === Paso 6: calcular porcentaje de varianza explicada por cada factor ===
47 anova_resumen <- summary(modelo_real)[[1]]
48
49 # Calcular porcentaje de varianza
50 anova_resumens$% varianza <- round(100 * anova_resumens$`Sum Sq` / sum(anova_resumens$`Sum Sq`), 2)
51
52 # Mostrar tabla ordenada
53 anova_resumen[order(-anova_resumens$% varianza), ]
54
55 # === Paso 7: Efectos Individuales ===
56 library(dplyr)
57
58 # Calcular la media general de remoción
59 media_general <- mean(datos_completos$Remocion, na.rm = TRUE)
60
```

Fuente: Elaboración propia (2025) en R Studio

Figura 63: Continuación del código en R utilizado para el análisis estadístico

```
RStudio
File Edit Code View Plots Session Build Debug Profile Tools Help
Go to file/function Addins
Codigo para el segundo objetivo en R.R x Anova.R x df_total x
Run Source
61 # Función para calcular efecto de cada nivel
62 calcular_efecto <- function(factor_nombre) {
63   datos_completos %>%
64     group_by(across(all_of(factor_nombre))) %>%
65     summarise(
66       Media_Remocion = mean(Remocion, na.rm = TRUE),
67       Efecto = round(Media_Remocion - media_general, 4)
68     ) %>%
69     rename(Nivel = 1)
70 }
71
72 # Calcular efectos para cada factor
73 efecto_pretratamiento <- calcular_efecto("Pretratamiento")
74 efecto_molienda <- calcular_efecto("Molienda")
75 efecto_colorante <- calcular_efecto("Colorante")
76
77 # Mostrar tablas
78 cat("\n=== Efecto por nivel de Pretratamiento ===\n")
79 print(efecto_pretratamiento)
80
81 cat("\n=== Efecto por nivel de Molienda ===\n")
82 print(efecto_molienda)
83
84 cat("\n=== Efecto por nivel de Colorante ===\n")
85 print(efecto_colorante)
86
87
88
89 # Paso 8 - Gráficas de efectos principales
90
```

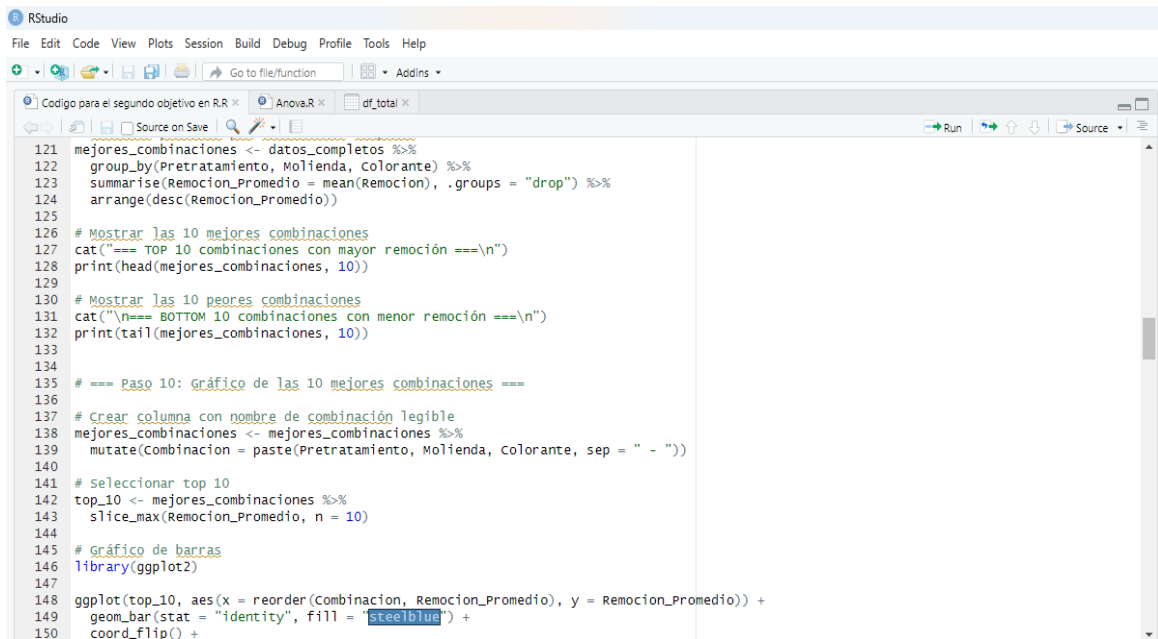
Fuente: Elaboración propia (2025) en R Studio

Figura 64: Continuación del código en R utilizado para el análisis estadístico

```
RStudio
File Edit Code View Plots Session Build Debug Profile Tools Help
Go to file/function Addins
Codigo para el segundo objetivo en R.R x Anova.R x df_total x
Run Source
91 library(ggplot2)
92
93 # Gráfica: Efecto del Pretratamiento
94 ggplot(datos_completos, aes(x = Pretratamiento, y = Remocion)) +
95   stat_summary(fun = mean, geom = "bar", fill = "steelblue") +
96   stat_summary(fun.data = mean_se, geom = "errorbar", width = 0.2) +
97   labs(title = "Efecto del Pretratamiento en la Remoción",
98        y = "% de Remoción Promedio") +
99   theme_minimal()
100
101 # Gráfica: Efecto del Tipo de Molienda
102 ggplot(datos_completos, aes(x = Molienda, y = Remocion)) +
103   stat_summary(fun = mean, geom = "bar", fill = "darkgreen") +
104   stat_summary(fun.data = mean_se, geom = "errorbar", width = 0.2) +
105   labs(title = "Efecto del Tipo de Molienda en la Remoción",
106        y = "% de Remoción Promedio") +
107   theme_minimal()
108
109 # Gráfica: Efecto del Tipo de Colorante
110 ggplot(datos_completos, aes(x = Colorante, y = Remocion)) +
111   stat_summary(fun = mean, geom = "bar", fill = "tomato") +
112   stat_summary(fun.data = mean_se, geom = "errorbar", width = 0.2) +
113   labs(title = "Efecto del Tipo de Colorante en la Remoción",
114        y = "% de Remoción Promedio") +
115   theme_minimal()
116
117
118 # === Paso 9: calcular promedio de remoción por combinación específica ===
119
120 # calcular promedio por combinación completa
```

Fuente: Elaboración propia (2025) en R Studio

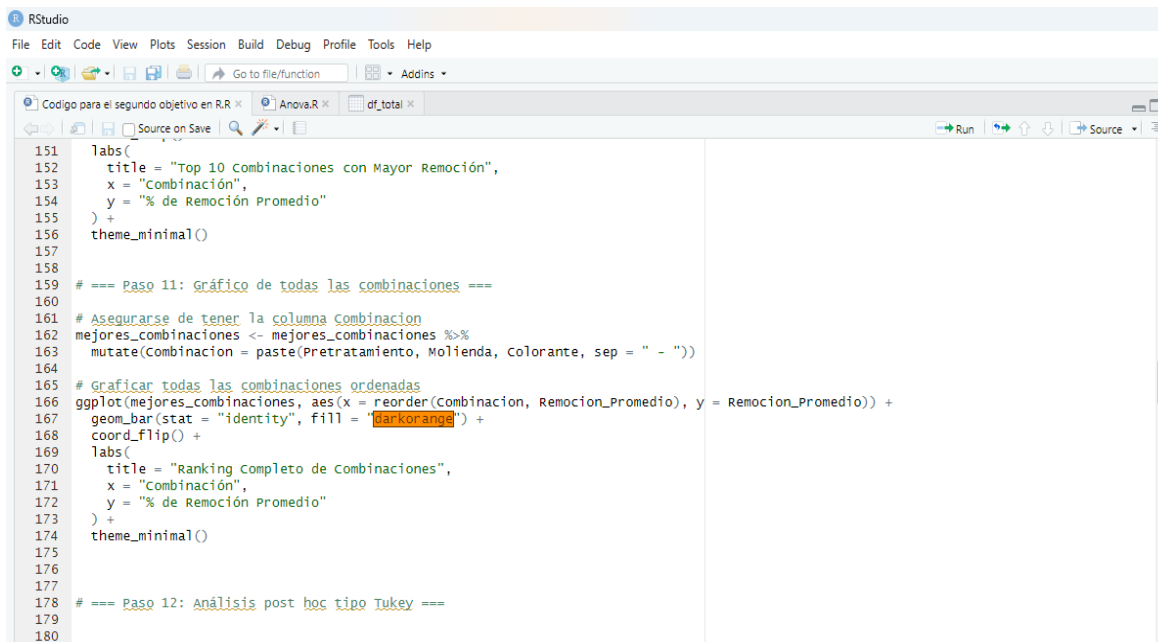
Figura 65: Continuación del código en R utilizado para el análisis estadístico



```
121 mejores_combinaciones <- datos_completos %>%
122   group_by(Pretratamiento, Molienda, colorante) %>%
123   summarise(Remocion_Promedio = mean(Remocion), .groups = "drop") %>%
124   arrange(desc(Remocion_Promedio))
125
126 # Mostrar las 10 mejores combinaciones
127 cat("=== TOP 10 combinaciones con mayor remoción ===\n")
128 print(head(mejores_combinaciones, 10))
129
130 # Mostrar las 10 peores combinaciones
131 cat("\n=== BOTTOM 10 combinaciones con menor remoción ===\n")
132 print(tail(mejores_combinaciones, 10))
133
134
135 # === Paso 10: Gráfico de las 10 mejores combinaciones ===
136
137 # Crear columna con nombre de combinación legible
138 mejores_combinaciones <- mejores_combinaciones %>%
139   mutate(Combinación = paste(Pretratamiento, Molienda, colorante, sep = " - "))
140
141 # Seleccionar top 10
142 top_10 <- mejores_combinaciones %>%
143   slice_max(Remocion_Promedio, n = 10)
144
145 # Gráfico de barras
146 library(ggplot2)
147
148 ggplot(top_10, aes(x = reorder(Combinación, Remocion_Promedio), y = Remocion_Promedio)) +
149   geom_bar(stat = "identity", fill = "steelblue") +
150   coord_flip() +
```

Fuente: Elaboración propia (2025) en R Studio

Figura 66: Continuación del código en R utilizado para el análisis estadístico



```
151   labs(
152     title = "Top 10 Combinaciones con Mayor Remoción",
153     x = "Combinación",
154     y = "% de Remoción Promedio"
155   ) +
156   theme_minimal()
157
158
159 # === Paso 11: gráfico de todas las combinaciones ===
160
161 # Asegurarse de tener la columna Combinación
162 mejores_combinaciones <- mejores_combinaciones %>%
163   mutate(Combinación = paste(Pretratamiento, Molienda, colorante, sep = " - "))
164
165 # Graficar todas las combinaciones ordenadas
166 ggplot(mejores_combinaciones, aes(x = reorder(Combinación, Remocion_Promedio), y = Remocion_Promedio)) +
167   geom_bar(stat = "identity", fill = "darkorange") +
168   coord_flip() +
169   labs(
170     title = "Ranking Completo de Combinaciones",
171     x = "Combinación",
172     y = "% de Remoción Promedio"
173   ) +
174   theme_minimal()
175
176
177
178 # === Paso 12: Análisis post hoc tipo Tukey ===
179
180
```

Fuente: Elaboración propia (2025) en R Studio

Figura 67: Continuación del código en R utilizado para el análisis estadístico

```
RStudio
File Edit Code View Plots Session Build Debug Profile Tools Help
Go to file/function Addins
Codigo para el segundo objetivo en R.R Anova.R df_total
Run Source
181 # Aplicar prueba de Tukey al modelo de ANOVA
182 tukey_resultados <- TukeyHSD(modelo_real)
183
184 # Mostrar resultados
185 print(tukey_resultados)
186
187
188 # === Paso 13: Tabla resumen completa de Tukey ===
189
190 # Convertir el objeto de Tukey en data frame
191 tukey_df <- as.data.frame(tukey_resultados$Pretratamiento)
192 tukey_df$comparacion <- rownames(tukey_resultados$Pretratamiento)
193 tukey_df$factor <- "Pretratamiento"
194
195 # Agregar los demás factores e interacciones
196 factores <- c("Molienda", "Colorante",
197              "Pretratamiento:Molienda",
198              "Pretratamiento:Colorante",
199              "Molienda:Colorante",
200              "Pretratamiento:Molienda:Colorante")
201
202 for (f in factores) {
203   df_temp <- as.data.frame(tukey_resultados[[f]])
204   df_temp$comparacion <- rownames(tukey_resultados[[f]])
205   df_temp$factor <- f
206   tukey_df <- rbind(tukey_df, df_temp)
207 }
208
209 # Reordenar y renombrar columnas
210 tukey_df <- tukey_df[, c("factor", "comparacion", "diff", "lwr", "upr", "p adj")]
```

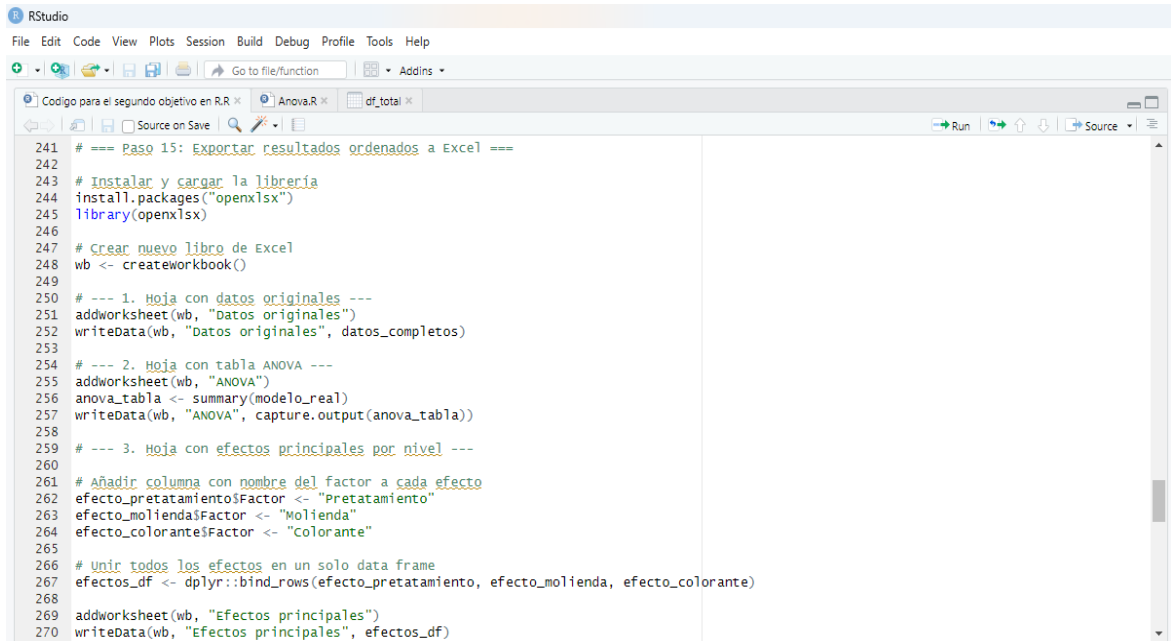
Fuente: Elaboración propia (2025) en R Studio

Figura 68: Continuación del código en R utilizado para el análisis estadístico

```
RStudio
File Edit Code View Plots Session Build Debug Profile Tools Help
Go to file/function Addins
Codigo para el segundo objetivo en R.R Anova.R df_total
Run Source
211 colnames(tukey_df) <- c("Factor", "Comparación", "Diferencia", "Limite_inferior", "Limite_superior", "Valor_p_ajustado")
212
213 # Ordenar por valor p
214 tukey_df <- tukey_df[order(tukey_df$valor_p_ajustado), ]
215
216 # Mostrar las 10 comparaciones más significativas
217 head(tukey_df, 10)
218
219
220
221 # === Paso 14: Gráficas del análisis post hoc tipo Tukey ===
222
223 # Graficar los resultados del análisis de Tukey
224 par(mfrow = c(2, 3)) # Para ver varias en una sola ventana
225
226 plot(tukey_resultados$Pretratamiento, las = 1, col = "blue", main = "Tukey: Pretratamiento")
227 plot(tukey_resultados$Molienda, las = 1, col = "green", main = "Tukey: Molienda")
228 plot(tukey_resultados$Colorante, las = 1, col = "red", main = "Tukey: Colorante")
229 plot(tukey_resultados$Pretratamiento:Molienda, las = 1, col = "purple", main = "Tukey: Pretratamiento:Molienda")
230 plot(tukey_resultados$Pretratamiento:Colorante, las = 1, col = "orange", main = "Tukey: Pretratamiento:Colorante")
231 plot(tukey_resultados$Molienda:Colorante, las = 1, col = "brown", main = "Tukey: Molienda:Colorante")
232
233
234 # === Paso 14.5 : Ranking completo de combinaciones ===
235
236 ranking_completo <- datos_completos %>%
237   group_by(COMBINACION, Pretratamiento, Molienda, Colorante) %>%
238   summarise(Media_Remocion = mean(Remocion), .groups = "drop") %>%
239   arrange(desc(Media_Remocion))
240
```

Fuente: Elaboración propia (2025) en R Studio

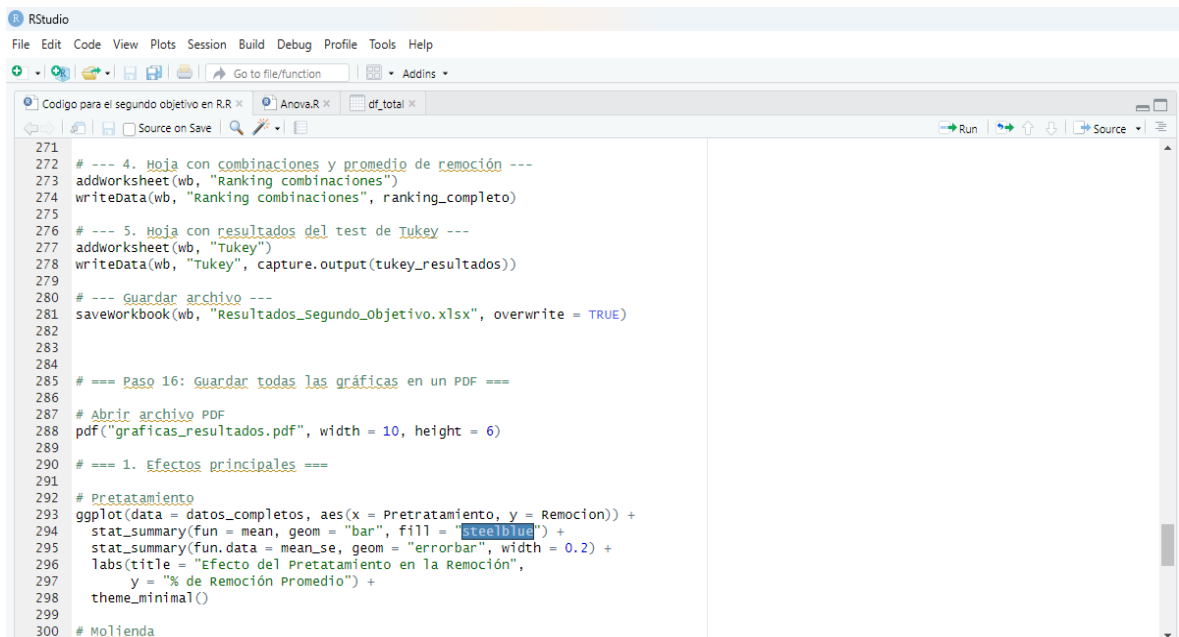
Figura 69: Continuación del código en R utilizado para el análisis estadístico



```
241 # === Paso 15: Exportar resultados ordenados a Excel ===
242
243 # Instalar y cargar la librería
244 install.packages("openxlsx")
245 library(openxlsx)
246
247 # Crear nuevo libro de Excel
248 wb <- createworkbook()
249
250 # --- 1. Hoja con datos originales ---
251 addworksheet(wb, "datos originales")
252 writedata(wb, "datos originales", datos_completos)
253
254 # --- 2. Hoja con tabla ANOVA ---
255 addworksheet(wb, "ANOVA")
256 anova_tabla <- summary(modelo_real)
257 writedata(wb, "ANOVA", capture.output(anova_tabla))
258
259 # --- 3. Hoja con efectos principales por nivel ---
260
261 # Añadir columna con nombre del factor a cada efecto
262 efecto_pretatamiento$Factor <- "Pretatamiento"
263 efecto_molienda$Factor <- "Molienda"
264 efecto_colorante$Factor <- "colorante"
265
266 # Unir todos los efectos en un solo data frame
267 efectos_df <- dplyr::bind_rows(efecto_pretatamiento, efecto_molienda, efecto_colorante)
268
269 addworksheet(wb, "Efectos principales")
270 writedata(wb, "Efectos principales", efectos_df)
```

Fuente: Elaboración propia (2025) en R Studio

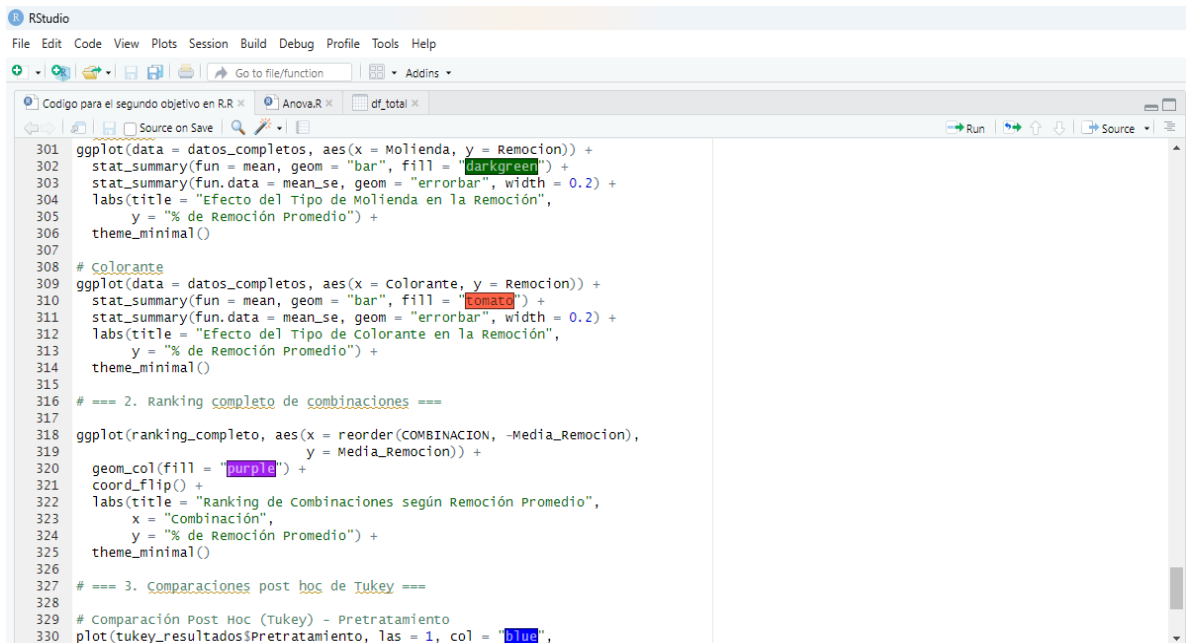
Figura 70: Continuación del código en R utilizado para el análisis estadístico



```
271
272 # --- 4. Hoja con combinaciones y promedio de remoción ---
273 addworksheet(wb, "Ranking combinaciones")
274 writedata(wb, "Ranking combinaciones", ranking_completo)
275
276 # --- 5. Hoja con resultados del test de Tukey ---
277 addworksheet(wb, "Tukey")
278 writedata(wb, "Tukey", capture.output(tukey_resultados))
279
280 # --- Guardar archivo ---
281 saveworkbook(wb, "Resultados_Segundo_Objeto.xlsx", overwrite = TRUE)
282
283
284
285 # === Paso 16: Guardar todas las gráficas en un PDF ===
286
287 # Abrir archivo PDF
288 pdf("graficas_resultados.pdf", width = 10, height = 6)
289
290 # === 1. Efectos principales ===
291
292 # Pretatamiento
293 ggplot(data = datos_completos, aes(x = Pretatamiento, y = Remoción)) +
294   stat_summary(fun = mean, geom = "bar", fill = "steelblue") +
295   stat_summary(fun.data = mean_se, geom = "errorbar", width = 0.2) +
296   labs(title = "Efecto del Pretatamiento en la Remoción",
297        y = "% de Remoción Promedio") +
298   theme_minimal()
299
300 # Molienda
```

Fuente: Elaboración propia (2025) en R Studio

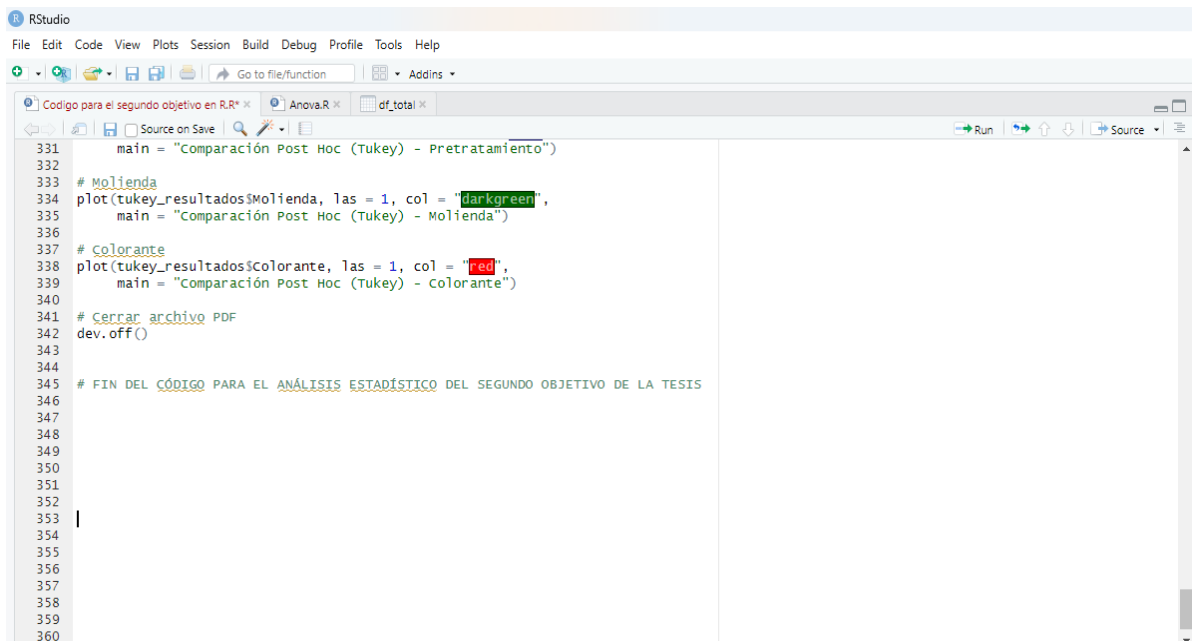
Figura 71: Continuación del código en R utilizado para el análisis estadístico



```
301 ggplot(data = datos_completos, aes(x = Molienda, y = Remoción)) +
302   stat_summary(fun = mean, geom = "bar", fill = "darkgreen") +
303   stat_summary(fun.data = mean_se, geom = "errorbar", width = 0.2) +
304   labs(title = "Efecto del Tipo de Molienda en la Remoción",
305        y = "% de Remoción Promedio") +
306   theme_minimal()
307
308 # Colorante
309 ggplot(data = datos_completos, aes(x = Colorante, y = Remoción)) +
310   stat_summary(fun = mean, geom = "bar", fill = "tomato") +
311   stat_summary(fun.data = mean_se, geom = "errorbar", width = 0.2) +
312   labs(title = "Efecto del Tipo de Colorante en la Remoción",
313        y = "% de Remoción Promedio") +
314   theme_minimal()
315
316 # === 2. Ranking completo de combinaciones ===
317
318 ggplot(ranking_completo, aes(x = reorder(COMBINACION, -Media_Remoción),
319                               y = Media_Remoción)) +
320   geom_col(fill = "purple") +
321   coord_flip() +
322   labs(title = "Ranking de Combinaciones según Remoción Promedio",
323        x = "Combinación",
324        y = "% de Remoción Promedio") +
325   theme_minimal()
326
327 # === 3. Comparaciones post hoc de Tukey ===
328
329 # Comparación Post Hoc (Tukey) - Pretratamiento
330 plot(tukey_resultados$Pretratamiento, las = 1, col = "blue",
```

Fuente: Elaboración propia (2025) en R Studio

Figura 72: Continuación del código en R utilizado para el análisis estadístico



```
331   main = "Comparación Post Hoc (Tukey) - Pretratamiento")
332
333 # Molienda
334 plot(tukey_resultados$Molienda, las = 1, col = "darkgreen",
335      main = "Comparación Post Hoc (Tukey) - Molienda")
336
337 # Colorante
338 plot(tukey_resultados$Colorante, las = 1, col = "red",
339      main = "Comparación Post Hoc (Tukey) - Colorante")
340
341 # Cerrar archivo PDF
342 dev.off()
343
344
345 # FIN DEL CÓDIGO PARA EL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL SEGUNDO OBJETIVO DE LA TESIS
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
```

Fuente: Elaboración propia (2025) en R Studio

COTIZACIONES

NaOH

Figura 73: Cotización del hidróxido de sodio (NaOH) Merck

Guatemala / Español Compra rápida | Mis favoritos | Contáctenos

MERCK Inicio sesión | Registrarse | 0 Carrito

[Inicio](#) > [Reagents, Chemicals and Labware](#) > [Inorganic Reagents](#) > [Classical Inorganic Analysis](#) > [Caustic alkalis and bases EMSURE®, EEMPLURA®](#) > [Sodio hidróxido](#)

106498 Supelco
Sodio hidróxido

en lentejas, p.a. EMSURE® View Products on Sigmaaldrich.com

Sodio hidróxido: Ficha de datos de seguridad (MSDS o SDS), certificado de análisis y de calidad (CoA y CoQ), expedientes, folletos y otros documentos disponibles.

- [Ficha datos de seguridad \(MSDS\)](#)
- [Certificado de análisis \(CoA\)](#)
- [Folletos](#)
- [Certificados](#)

Sinónimos: Soda caustic

N° CAS: [1310-73-2](#) Número CE : [215-185-5](#) Masa molar: [40 g/mol](#) Fórmula química: [NaOH](#) Fórmula Hill: [HNaO](#)

106498
[Ver precios y disponibilidad](#)

[Download Product Safety Card](#)
[Request More Information](#)

Productos recomendados

Figura 74: Continuación de la cotización del hidróxido de sodio (NaOH) Merck

Productos recomendados

Descripción Documentación de respaldo Productos y aplicaciones relacionados

Descripción

Tabla espec. clave

CAS #	Número CE	Fórmula Hill	Fórmula química	Masa molar
1310-73-2	215-185-5	HNaO	NaOH	40 g/mol

Precios y disponibilidad

Número de referencia	Disponibilidad	Embalaje	Cant./Env.	Precio	Cantidad	
1064980500	Ingrese cantidad	Frasco, plástico	500 g	GTQ 428.00 Inicie sesión para ver sus precios	<input type="text"/> Revisar disponibilidad	Añadir a favoritos

Descripción
Información del producto
Información fisicoquímica
Información de seguridad según el GHS
Información de seguridad
Información de almacenamiento y transporte
Información de transporte
Especificaciones
Tabla espec. clave
Precios y disponibilidad
Global Trade Item Number

H2SO4

Figura 75: Cotización del ácido sulfúrico (H2SO4) Merck

MERCK Todo Inicio sesión Registrarse 0 Carrito

[Inicio](#) > [Reagents, Chemicals and Labware](#) > [Inorganic Reagents](#) > [Classical Inorganic Analysis](#) > [Acids EMSURE®, EMPARTA®, EMLPURA®](#) > [Ácido sulfúrico 95-97%](#)

100731 Supelco
Ácido sulfúrico 95-97%

p.a. EMSURE® ISO

View Products on Sigmaaldrich.com

100731
Ver precios y disponibilidad

Download Product Safety Card
Request More Information

Ácido sulfúrico 95-97%: Ficha de datos de seguridad (MSDS o SDS), certificado de análisis y de calidad (CoA y CoQ), expedientes, folletos y otros documentos disponibles.

- [Ficha datos de seguridad \(MSDS\)](#)
- [Folletos](#)
- [Notas de aplicación](#)
- [Certificado de análisis \(CoA\)](#)
- [Información técnica](#)

N° CAS: [7664-93-9](#) Número CE : [231-639-5](#) Masa molar: [98.07 g/mol](#) Fórmula química: [H₂SO₄](#) Fórmula Hill: [H₂O₇S](#) Grado: [ISO](#)

Productos recomendados

Figura 76: Continuación de la cotización del ácido sulfúrico (H2SO4) Merck

Productos recomendados

Descripción **Documentación de respaldo** **Productos y aplicaciones relacionados**

Descripción

Descripción
Información del producto
Información fisicoquímica
Información de seguridad según el GHS
Información de seguridad
Información de almacenamiento y transporte
Información de transporte
Tabla espec. clave
Precios y disponibilidad
Global Trade Item Number

Tabla espec. clave

CAS #	Número CE	Fórmula Hill	Fórmula química	Masa molar	Valor de grado
7664-93-9	231-639-5	H ₂ O ₇ S	H ₂ SO ₄	98.07 g/mol	ISO

Precios y disponibilidad

Número de referencia	Disponibilidad	Embalaje	Cant./Env.	Precio	Cantidad	
1007310510	Ingrese cantidad	Fco. vidr./plást.	0.5 l	GTQ 451.00 Inicie sesión para ver sus precios	<input type="text"/> Revisar disponibilidad	Añadir a favoritos

H3PO4

Figura 77: Cotización del ácido fosfórico (H3PO4) Merck

100573 Supelco
Ácido orto-fosfórico 85%

p.a. EMSURE® ACS,ISO,Reag. Ph Eur

Ácido orto-fosfórico 85%: Ficha de datos de seguridad (MSDS o SDS), certificado de análisis y de calidad (CoA y CoQ), expedientes, folletos y otros documentos disponibles.

- Ficha datos de seguridad (MSDS)
- Folletos
- Notas de aplicación
- Certificado de análisis (CoA)
- Información técnica

Sinónimos: o-Phosphoric acid, Orthophosphoric acid

N° CAS: [7664-38-2](#) Grado: [ACS,ISO,Reag. Ph Eur](#)

View Products on Sigmaaldrich.com

100573
Ver precios y disponibilidad

Download Product Safety Card

Figura 78: Continuación de la cotización del ácido fosfórico (H3PO4) Merck

Descripción | Documentación de respaldo | Productos y aplicaciones relacionados

Descripción

Descripción
Información del producto
Información fisicoquímica
Información de seguridad según el GHS
Información de seguridad
Información de almacenamiento y transporte
Información de transporte
Especificaciones
Tabla espec. clave
Precios y disponibilidad
Global Trade Item Number

Tabla espec. clave

CAS #	Valor de grado
7664-38-2	ACS,ISO,Reag. Ph Eur

Precios y disponibilidad

Número de referencia	Disponibilidad	Embalaje	Cant./Env.	Precio	Cantidad	
1005730510	Ingrese cantidad	Fco. vidr./plást.	0.5 l	GTQ 766.00 Inicie sesión para ver sus precios	<input type="text"/> Revisar disponibilidad	Añadir a favoritos

Inóculo

Figura 79: Cotización del inóculo Xtreme Gardening



Versity Bacillus Blend

\$33.81

★★★★★ (Aún no hay reseñas) [Escribir una reseña](#)

SKU:

5500

Peso:

0.13 LBS

Envío:

Se calcula durante el proceso de pago

Size: Opcional

Ninguno

2 oz

1 lb

4 lb

Cantidad:

▼ 1 ▲

Urea

Figura 80: Cotización de la urea, Merck

108487 Supelco
Urea

p.a. ACS,Reag. Ph Eur

Urea: Ficha de datos de seguridad (MSDS o SDS), certificado de análisis y de calidad (CoA y CoQ), expedientes, folletos y otros documentos disponibles.

- [Ficha datos de seguridad \(MSDS\)](#)
- [Certificado de análisis \(CoA\)](#)
- [Información técnica](#)

Sinónimos: Carbamide, Carbonyl diamide, Diaminomethanone, Carbonyldiamine

N° CAS: [57-13-6](#) Número CE : [200-315-5](#) Masa molar: [60.05 g/mol](#) Fórmula química: [CO\(NH₂\)₂](#) Fórmula Hill: [CH₄N₂O](#)
Grado: [ACS,Reag. Ph Eur](#)

[View Products on Sigmaaldrich.com](#)

108487
[Ver precios y disponibilidad](#)

Figura 81: Continuación de la cotización de la urea, Merck

Descripción | Documentación de respaldo | Productos y aplicaciones relacionados

Descripción

Replacement Information
Descripción
Información del producto
Información fisicoquímica
Información toxicológica
Información de seguridad según el GHS
Información de almacenamiento y transporte
Especificaciones
Tabla espec. clave
Precios y disponibilidad
Global Trade Item Number

CAS #	Número CE	Fórmula Hill	Fórmula química	Masa molar	Valor de grado
57-13-6	200-315-5	CH ₄ N ₂ O	CO(NH ₂) ₂	60.05 g/mol	ACS,Reag. Ph Eur

Replacement Information

Replacement Information	In North America 108487.0500 replaces and is identical to UX0065-1
-------------------------	--

Precios y disponibilidad

Número de referencia	Disponibilidad	Embalaje	Cant./Env.	Precio	Cantidad	
1084870500	Ingrese cantidad	Frasco, plástico	500 g	GTQ 864.00 Inicie sesión para ver sus precios	<input type="text"/> Revisar disponibilidad	Añadir a favoritos

KH₂PO₄

Figura 82: Cotización de potasio dihidrogenofosfato (KH₂PO₄), Merck

104873 Supelco
Potasio dihidrogenofosfato

p.a. EMSURE® ISO

Potasio dihidrogenofosfato: Ficha de datos de seguridad (MSDS o SDS), certificado de análisis y de calidad (CoA y CoQ), expedientes, folletos y otros documentos disponibles.

- [Ficha datos de seguridad \(MSDS\)](#)
- [Folletos](#)
- [Notas de aplicación](#)
- [Certificado de análisis \(CoA\)](#)
- [Información técnica](#)

Sinónimos: mono-Potassium orthophosphate, Potassium biphosphate, Potassium phosphate monobasic

N° CAS: [7778-77-0](#) Número CE : [231-913-4](#) Masa molar: [136.09 g/mol](#) Fórmula química: [KH₂PO₄](#) Fórmula Hill: [H₂KO₄P](#)
Grado: [ISO](#)

[View Products on Sigmaaldrich.com](#)

104873
[Ver precios y disponibilidad](#)

[Request More Information](#)

Figura 83: Continuación de la cotización de potasio dihidrogenofosfato (KH₂PO₄), Merck

Descripción | Documentación de respaldo | Productos y aplicaciones relacionados

Descripción

Descripción
Información del producto
Información fisicoquímica
Información toxicológica
Información de seguridad según el GHS
Información de almacenamiento y transporte
Información de transporte
Especificaciones
Tabla espec. clave
Precios y disponibilidad
Global Trade Item Number

Tabla espec. clave

CAS #	Número CE	Fórmula Hill	Fórmula química	Masa molar	Valor de grado
7778-77-0	231-913-4	H ₂ KO ₄ P	KH ₂ PO ₄	136.09 g/mol	ISO

Precios y disponibilidad

Número de referencia	Disponibilidad	Embalaje	Cant./Env.	Precio	Cantidad	
1048730250	Ingrese cantidad	Frasco, plástico	250 g	GTQ 396.00 Inicie sesión para ver sus precios	<input type="text"/> Revisar disponibilidad	Añadir a favoritos

FeCl₃

Figura 84: Cotización del cloruro férrico (FeCl₃), Merck

MERCK [Inicio sesión](#) [Registrarse](#) [Carrito 0](#)

[Productos](#) [Servicios](#) [Documentos](#) [Responsabilidad](#) [Asistencia técnica](#) [Sobre nosotros](#) [Sobre nuestras marcas](#)

Inicio > Reagents, Chemicals and Labware > Hierro(III) cloruro

803945 Sigma-Aldrich
Hierro(III) cloruro

Iron(III) chloride anhydrous for synthesis. CAS 7705-08-0, EC Number 231-729-4, chemical formula FeCl₃.

Hierro(III) cloruro: Ficha de datos de seguridad (MSDS o SDS), certificado de análisis y de calidad (CoA y CoQ), expedientes, folletos y otros documentos disponibles.

- [Ficha datos de seguridad \(MSDS\)](#)
- [Certificado de análisis \(CoA\)](#)

[View Products on Sigmaaldrich.com](#)

803945
[Ver precios y disponibilidad](#)

[Download Product Safety Card](#)

Sinónimos: Ferric chloride, Iron trichloride

N° CAS: [7705-08-0](#) Número CE : [231-729-4](#) Masa molar: [162.21 g/mol](#) Fórmula química: [FeCl₃](#) Fórmula Hill: [Cl₃Fe](#)

Figura 85: Continuación de la cotización del cloruro férrico (FeCl₃), Merck

Descripción | Documentación de respaldo | Productos y aplicaciones relacionados

Descripción

Tabla espec. clave

CAS #	Número CE	Fórmula Hill	Fórmula química	Masa molar
7705-08-0	231-729-4	Cl ₃ Fe	FeCl ₃	162.21 g/mol

Precios y disponibilidad


Número de referencia	Disponibilidad	Embalaje	Cant./Env.	Precio	Cantidad	
8039450500	Ingrese cantidad		500 g	GTQ 707.00 Inicie sesión para ver sus precios	<input type="text"/> Revisar disponibilidad	Añadir a favoritos

Descripción
Información del producto
Aplicaciones
Información fisicoquímica
Información toxicológica
Información de seguridad según el GHS
Información de seguridad
Información de almacenamiento y transporte
Información de transporte
Especificaciones
Tabla espec. clave
Precios y disponibilidad
Global Trade Item Number

Agua desmineralizada

Figura 86: Cotización del agua desmineralizada, Salvavidas (18.9L)

Single product editado



**Agua Pura
Garrafon
Desmineralizada
Liquido * Hasta 3
Por Orden ***

Q22.00

Es el agua con las características ideales para su uso en procesos industriales y equipos médicos.
15000 hay existencias

Ficha técnica carbón activado

Figura 87: Ficha técnica carbón activado vegetal pulverizado (comercial)

CARBON ACTIVADO PULVERIZADO CLARIMEX 046	
Sinónimos	Carbon vegetal; carbo vegetabilis; vegetable black
Identificación	
CAS	7440-44-0
Fórmula molecular	C
EINECS	231-15-3
Características	Estructura Molecular
Apariencia: Polvo Color: Negro Olor: Inodoro % Humedad al empacar 8 máx. Número de Yodo (mg I2/g): 500 mín. Densidad aparente (g/cm3): 0.25 - 0.45 % Pasa malla 100: 99 mín. % Pasa malla 200: 95 mín. % Pasa malla 325 90 mín	
Usos	



El carbón activado 046 es un producto especialmente diseñado para aplicación en potabilización de agua. Tiene una alta capacidad de adsorción de MIB y Geosmin, causantes de mal olor y sabor en el agua potable. El carbón 046, por las características de sus poros, también puede ser utilizado en algunas aplicaciones de decoloración en fase líquida y como precursor de la floración de la piña, cuando es impregnado con etileno.

Figura 88: Continuación de la ficha técnica

Primeros Auxilios Básicos



Contacto dérmico: Lave con agua y jabón consulte a su médico en caso de enrojecimiento, comezón o sensación de quemado. Inhalación: Ubíquese en un área con aire fresco consulte a su médico en caso de tos o problemas respiratorios. Ingestión: Beba uno o dos vasos de agua, acuda al médico en caso de problemas gastrointestinales. (Nunca de a tomar nada cuando la persona esta inconsciente).

Riesgos de Incendio o Explosión



Medios de extinción: Extinga el fuego usando niebla de agua, agua finamente atomizada, dióxido de carbono o espuma. Evite levantar nubes de polvo. Peligros específicos derivados de la sustancia o la mezcla: No inflamable. El carbón activado es difícil de encender y tiende a quemarse lentamente sin producir humo o llamas. A partir de la combustión se forman gases tóxicos. Productos peligrosos por combustión: Los productos de combustión y el humo pueden incluir óxidos de carbono (por ejemplo, el monóxido de carbono). Los Materiales que arden sin flama en espacios cerrados por periodos largos pueden producir cantidades de monóxido de carbono que llegan al límite inferior de explosividad (monóxido de carbono LEL = 12,5% en el aire). Bajo ciertas condiciones, cualquier polvo en el aire puede ser un riesgo de explosión. Utilizado carbón activado puede producir productos adicionales de combustión. Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios: Se requiere de equipo de protección respiratoria y protección para los ojos. Para incendios grandes o en áreas cerradas se requiere de equipos de respiración autónoma. Si es posible hacerlo de manera segura remueva el carbón activado hacia un área sin riesgo, preferentemente al aire libre.

Figura 89: Continuación de la ficha técnica

Almacenamiento y Manipulación



Temperatura de almacenamiento: Ambiente. Presión de almacenamiento: Atmosférica. Manejo: Siga las buenas prácticas de manejo y almacenamiento para minimizar derrames, generación de polvo en el aire y acumulación de polvo en superficies expuestas. Proporcione ventilación adecuada. Utilice respiradores, guantes y gafas para prevenir o minimizar la exposición al polvo. Lave las áreas de la piel expuestas con jabón y agua después del manejo. Almacenamiento: El producto puede ser almacenado de manera segura en cualquier área de almacenamiento lejos de fuentes directas de calor. Cuando el carbón activado es almacenado en espacios cerrados se puede presentar una deficiencia de oxígeno. Ventile el área o utilice equipo de respiración autónoma. El almacenamiento debe estar lejos de oxidantes como ozono, oxígeno líquido, cloro, permanganato, etc.

Estabilidad y Reactividad



Estabilidad: Este producto se considera estable bajo condiciones específicas de uso, almacenamiento y embarque. Incompatibilidad: En contacto con oxidantes fuertes tales como ozono, oxígeno líquido, cloro permanganato, etc., puede resultar una combustión rápida. Evite el contacto con ácidos fuertes. Productos peligrosos de la descomposición: Monóxido de carbono y Dióxido de carbono. Riesgos de polimerización: No ocurre.

Información Toxicológica



Este material en su estado original no es tóxico. El carbón activado usado puede presentar las características del material absorbido.

XIV. GLOSARIO

Absorción: Incorporación de una sustancia en el volumen de otra, a diferencia de la adsorción que ocurre solo en la superficie.

Adsorción: Proceso en el cual moléculas de un soluto se adhieren a la superficie de un sólido.

ANOVA (Análisis de Varianza): Método estadístico para evaluar si existen diferencias significativas entre grupos de datos experimentales.

Biochar: Carbón obtenido a partir de la pirólisis de biomasa, utilizado como enmienda de suelos o adsorbente.

Carbón activado: Material poroso de alta superficie específica usado como adsorbente para eliminar contaminantes del agua.

Concentración en equilibrio (C_e): Concentración del soluto en la fase líquida después de alcanzarse el equilibrio de adsorción.

Colorantes directos: Sustancias colorantes solubles que se fijan directamente a fibras textiles, de difícil remoción en aguas residuales.

Colorantes reactivos: Colorantes que reaccionan químicamente con las fibras, generando enlaces covalentes y alta estabilidad.

Cuesco: Endocarpio leñoso del fruto de palma africana, utilizado como subproducto energético o materia prima.

Fibra de mesocarpio: Residuo lignocelulósico obtenido del fruto de palma africana tras la extracción de aceite.

Hidrólisis ácida (HA): Tratamiento químico con ácidos fuertes para modificar la superficie de un residuo lignocelulósico.

Hidrólisis básica (HB): Tratamiento químico con soluciones alcalinas para remover compuestos solubles y aumentar la reactividad del residuo.

Isoterma de Langmuir: Modelo matemático que describe la adsorción en monocapa sobre una superficie homogénea.

pH: Medida de la acidez o basicidad de una solución, definida como el logaritmo negativo de la concentración de iones hidrógeno.

Capacidad de adsorción en equilibrio (q_e): Cantidad de soluto adsorbido por unidad de masa de adsorbente cuando se alcanza el equilibrio.

Prueba de Tukey: Método estadístico de comparaciones múltiples que identifica diferencias significativas entre medias de tratamientos.

Definición de variables

- HB = Pretratamiento de una hidrólisis básica a los residuos de palma africana
- HA = Pretratamiento de una hidrólisis ácida a los residuos de palma africana
- CA = Pretratamiento de realizar carbón activado a base de los residuos de palma africana
- SP = Residuos de palma africana que no recibieron ningún pretratamiento
- ML = Molienda con licuadora (procesadora de alimentos)
- MM = Molienda manual con mazo
- SM = Sin molienda
- CD = Colorante Directo
- CR = Colorante Reactivo
- HAML = Residuos de palma africana con hidrólisis ácida (HA) como pretratamiento y molienda con licuadora (ML)
- HAMM = Residuos de palma africana con hidrólisis ácida (HA) como pretratamiento y molienda manual con mazo (MM)

- HASM = Residuos de palma africana con hidrólisis ácida (HA) como pretratamiento y sin molienda (SM)
- HBML = Residuos de palma africana con hidrólisis básica (HB) como pretratamiento y molienda con licuadora (ML)
- HBMM = Residuos de palma africana con hidrólisis básica (HB) como pretratamiento y molienda manual con mazo (MM)
- HBSM = Residuos de palma africana con hidrólisis básica (HB) como pretratamiento y sin molienda (SM)
- CAML = Residuos de palma africana como carbón activado (CA) como pretratamiento y molienda con licuadora (ML)
- CAMM = Residuos de palma africana como carbón activado (CA) como pretratamiento y molienda manual con mazo (MM)
- CASM = Residuos de palma africana como carbón activado (CA) como pretratamiento y sin molienda (SM)
- SPML = Residuos de palma africana sin pretratamiento (SP) y molienda con licuadora (ML)
- SPMM = Residuos de palma africana sin pretratamiento (SP) como pretratamiento y molienda manual con mazo (MM)
- SPSM = Residuos de palma africana sin pretratamiento (SP) como pretratamiento y sin molienda (SM)
- HBMLCD = Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis básica (HB) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Directo (CD)
- HBMLCR = Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis básica (HB) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Reactivo (CR)
- HBMMCD = Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis básica (HB) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Directo (CD)
- HBMMCR = Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis básica (HB) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Reactivo (CR)
- HBSMCD = Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis básica (HB) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Directo (CD)

- HBSMCR = Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis básica (HB) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Reactivo (CR)
- HAMLCD = Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis ácida (HA) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Directo (CD)
- HAMLCR = Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis ácida (HA) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Reactivo (CR)
- HAMMCD = Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis ácida (HA) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Directo (CD)
- HAMMCR = Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis ácida (HA) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Reactivo (CR)
- HASMCD = Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis ácida (HA) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Directo (CD)
- HASMCR = Combinación de Pretratamiento: Hidrólisis ácida (HA) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Reactivo (CR)
- CAMLCD = Combinación de Pretratamiento: Carbón activado a base de residuos de palma africana (CA) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Directo (CD)
- CAMLCR = Combinación de Pretratamiento: Carbón activado a base de residuos de palma africana (CA) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Reactivo (CR)
- CAMMCD = Combinación de Pretratamiento: Carbón activado a base de residuos de palma africana (CA) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Directo (CD)
- CAMMCR = Combinación de Pretratamiento: Carbón activado a base de residuos de palma africana (CA) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Reactivo (CR)
- CASMCD = Combinación de Pretratamiento: Carbón activado a base de residuos de palma africana (CA) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Directo (CD)
- CASMCR = Combinación de Pretratamiento: Carbón activado a base de residuos de palma africana (CA) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Reactivo (CR)
- SPMLCD = Combinación de Pretratamiento: Sin pretratamiento (SP) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Directo (CD)
- SPMLCR = Combinación de Pretratamiento: Sin pretratamiento (SP) + Molienda: Con licuadora (ML) + Colorante: Reactivo (CR)

- SPMACD = Combinación de Pretratamiento: Sin pretratamiento (SP) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Directo (CD)
- SPMACR = Combinación de Pretratamiento: Sin pretratamiento (SP) + Molienda: Manual con mazo (MM) + Colorante: Reactivo (CR)
- SPSMACD = Combinación de Pretratamiento: Sin pretratamiento (SP) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Directo (CD)
- SPSMACR = Combinación de Pretratamiento: Sin pretratamiento (SP) + Molienda: Sin molienda (SM) + Colorante: Reactivo (CR)
- A_0 = Lectura inicial del espectrofotómetro
- A = Lecturas después de la absorbancia del espectrofotómetro
- C_u = Coeficiente de uniformidad
- C_c = Coeficiente de curvatura
- Q_1 = Cuartil 1
- Q_2 = Cuartil 2 o mediana
- Q_3 = Cuartil 3
- Q_4 = Cuartil 4
- IC = Intervalo de confianza
- No. o n = Número
- Df = Grados de Libertad
- Sum sq = Suma de cuadrados
- Mean sq = Cuadrado medio
- F value = Valor F
- $Pr(>F)$ o p = Valor p
- Signif. Codes = Código de significancia
- C_e = Concentración en equilibrio
- q_e = Cantidad adsorbida en equilibrio
- R^2 = Coeficiente de determinación
- m = pendiente de la recta
- b = Intercepto de la recta en el eje “y”
- Q_m = Capacidad máxima de adsorción

- KL = Constante de Langmuir
- $prom$ = Promedio o media