

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

Diseño de un proceso de extracción no convencional asistido por ultrasonido para obtener una
tinta vegetal a partir de borra de café

Danna Catalina Sarmiento Díaz y Diego Andrés Ortegón Amaya

Trabajo de Grado para optar por el título profesional en Ingeniería Química
Modalidad Trabajo de Investigación

Directora

Lilia Carolina Rojas Pérez

Doctora en Ingeniería

Co-Directora

Isabel Cristina Castellanos Cuellar

Magister en Ciencias Bioquímicas

Asesora profesional

Daniela Alejandra Ostos Novoa

Ingeniera Química

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas
Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2026

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

Dedicatoria

Dedico este libro a mis padres, *Diana Diaz* y *Franklin Sarmiento*, por su apoyo incondicional, por su esfuerzo incansable a lo largo de este proceso y, sobre todo por su amor y comprensión. Gracias por creer en mí, incluso cuando yo misma dudaba. A mi abuela *Flor Alba*, por ser mi motor y mi guía, por escucharme días enteros aún sin comprender del todo lo que le contaba; gracias por todo su amor y todas sus oraciones. A mi hermano *Frank*, por ser mi inspiración y mi orgullo más grande. A mi abuelo *Alfonso*, que, aunque no podrá ver como alcanzo mis sueños: sé que siempre estuvo conmigo y me dio las fuerzas que necesitaba para seguir adelante. A mis amigos *Cata*, *Yuli* y *Elkyn*, porque sus palabras de aliento, incluso en la distancia, muchas veces aliviaron mi corazón. A mis amigos de la universidad *Mafe*, *Mike*, *Diego*, *Rossy*, *Nico* y *Ronal* porque sus ocurrencias y su infinito amor me llenaron de paz y me enseñaron que, si Dios me trajo hasta aquí, nunca fue en vano. Y finalmente, a mí por decidir día a día seguir adelante, sin importar cómo me sintiera. Gracias por no rendirte.

~ *Danna Sarmiento*

Dedico esta tesis a mi madre, *Deisy Amaya*, por ser mi primer refugio, mi fuerza inagotable y el ejemplo vivo de que con amor y sacrificio todo se puede; a mis abuelos, *Natividad García* y *Miguel Amaya*, por sus sabios consejos, sus historias que me formaron y por enseñarme el valor del trabajo, la humildad y la perseverancia; a *Isabella Aranzazu*, por tu paciencia en los días difíciles, por ser mi calma en medio del caos académico, por tu apoyo incondicional y por creer en mí cuando ni siquiera yo lo hacía; y a mis amigos, *Danna*, *Mafe*, *Ronal* y *Rossy* por ser mi desahogo, mis cómplices en las traspachadas, por las risas que quitaron el estrés y por celebrar cada avance como si fuera propio además de que muchas veces fueron mi motivación y la familia que elegí en este camino; y finalmente, a mí por no rendirme, por la disciplina en los días difíciles y por recordar siempre por que empecé este camino. Este logro es de todos, pero también es mío.

~ *Diego Ortegón*.

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

Agradecimientos

En primer lugar, agradecemos a *Dios* por guiarnos a lo largo de este camino y por darnos la fortaleza, sabiduría y paciencia necesarias para afrontar cada uno de los retos que implicó el desarrollo de este trabajo.

Extendemos nuestro más sincero y profundo agradecimiento a nuestra directora de tesis, *Lilia Carolina Rojas*, por su acompañamiento constante, su orientación académica y la confianza depositada en nosotros. Su guía fue fundamental no solo para el adecuado desarrollo y culminación de esta tesis, sino también para fortalecer nuestras capacidades profesionales e investigativas.

Asimismo, agradecemos profundamente a nuestros *profesores de Ingeniería Química*, quienes compartieron su conocimiento con dedicación, exigencia y vocación, contribuyendo a nuestro crecimiento no solo académico y profesional, sino también personal.

De manera especial, queremos agradecer al *CICTA*, al *GIMBA*, y a *Natalia y Ana María Díaz*, por su apoyo técnico, su disposición permanente y su acompañamiento durante todas las etapas de la experimentación. Su experiencia y apoyo constante fueron de gran importancia para el desarrollo de este trabajo experimental.

Finalmente, agradecemos a todas las personas que, directa o indirectamente, contribuyeron al desarrollo de este proyecto. Este trabajo no habría sido posible sin el acompañamiento, la colaboración y el apoyo de cada uno de ustedes.

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

Tabla de contenido

Introducción	12
1. Objetivos.....	14
1.1 Objetivo general.....	14
1.2 Objetivos específicos	14
2. Estado del arte	15
2.1 De semilla a residuo proceso de transformación del café	15
2.2 Contexto del aprovechamiento de la borra de café	15
2.2.1 Producción de la borra de café	15
2.2.2 Reutilización potencial de la borra de café.....	16
2.3 Composición química de la borra de café	16
2.4 Técnicas de extracción de colorantes	17
2.4.1 Métodos convencionales.....	17
2.4.2 Métodos no convencionales.....	18
2.5 Aplicaciones emergentes de colorantes naturales como aplicación en tintas naturales	18
2.5.1 Tipos de colorantes	18
2.5.2 Biotintas que se hayan producido a partir de borra de café o de otras materias primas tipo agrícola con aplicación gráfica o textil.....	19
2.5.3 Teñido de telas con biotintas de origen natural	20
2.6 Estabilidad del colorante en teñido de telas	20

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

2.6.1 Pruebas de estabilidad ejercidas sobre telas teñidas con colorantes de origen natural.	20
3. Metodología.....	22
3.1 Fase 1: Adecuación de la materia prima.....	22
3.1.1 Recolección y almacenamiento de la borra de café.....	22
3.1.2 Caracterización física de la materia prima.	23
3.2 Fase 2: Proceso de extracción del colorante.....	24
3.2.1 Extracción Soxhlet y ultrasonido.....	24
3.2.2 Filtración.....	25
3.2.3 Recuperación del solvente y separación del extracto.	25
3.2.4 Caracterización del extracto.	26
3.2.5 Secado.....	26
3.2.6 Análisis estadístico.	27
3.3 Fase 3: Aplicación del colorante en una fibra textil.....	27
3.3.1 Preparación de la tela.....	27
3.3.2 Diseño experimental para la aplicación del colorante en la popelina.....	28
3.3.3 Pre-mordentado y teñido.	29
3.4 Fase 4: Pruebas de solidez al color.....	30
3.4.1 Prueba de lavado.....	30
3.4.2 Pruebas de frote en húmedo.....	31

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

4.	Resultados y análisis de resultados.....	32
4.1	Caracterización de la materia prima.....	32
4.1.1	Determinación de humedad de la borra de café	32
4.1.2	Análisis granulométrico de la borra de café	32
4.2	Extracción del colorante de la materia prima mediante ultrasonido	34
4.2.1	Rendimientos de extracción mediante ultrasonido	34
4.2.2	Comparación entre extracción ultrasónica y extracción Soxhlet.....	39
4.2.3	Análisis por espectroscopia FTIR-ATR del extracto de colorante obtenido a partir de borra de café	40
4.3	Pruebas de estabilidad cromática sobre la tela teñida	44
4.3.1	Prueba de lavado.....	47
4.3.2	Prueba de frote en húmedo	49
4.3.3	Análisis estadístico de las pruebas de estabilidad sobre las telas teñidas con el colorante natural	51
5.	Conclusiones.....	53
6.	Recomendaciones	54
	Referencias bibliográficas.....	55
	Apéndices.....	60

Lista de tablas

Tabla 1	Diseño experimental del porcentaje de mordiente y colorante utilizados en cada tela..	28
Tabla 2	Resultados del ANOVA empleados en la prueba de comparación múltiple de Tukey. ..	38
Tabla 3	<i>Valores obtenidos en la prueba de Tukey usados para determinar la mejor combinación de factores.</i>	38
Tabla 4	Asignación de bandas espectrales FTIR-ATR observadas en el extracto hidroalcohólico de colorante de borra de café.	43
Tabla 5	Coordenadas iniciales de cada tela teñida CIELab (L^* , a^* , b^*).	45

Lista de figuras

Figura 1	Esquema metodológico.	22
Figura 2	Curva de distribución granulométrica de la borra de café.....	33
Figura 3	Promedio de rendimiento de extracción para cada tratamiento experimental.....	34
Figura 4	Efectos principales de la temperatura y relación sólido: solvente sobre el rendimiento de extracción.	36
Figura 5	Comparación del rendimiento promedio de extracción entre ultrasonido y Soxhlet a relación S:S de 1:40.	39
Figura 6	Espectros FTIR-ATR del extracto obtenido de borra de café.	41
Figura 7	Comportamiento del parámetro ΔE durante la prueba de lavado para cada uno de los tratamientos.....	48
Figura 8	Comportamiento del parámetro ΔE durante la prueba de frote en húmedo para cada uno de los tratamientos.	50

Lista de apéndices

Apéndice A. Distribución granulométrica de la borra de café.	60
Apéndice B. Matriz experimental y rendimiento de extracción obtenido mediante ultrasonido.	60
Apéndice C. Análisis de varianza de las variables temperatura y relación sólido: solvente sobre el rendimiento de extracción ultrasónica.	61
Apéndice D. Análisis de varianza de los porcentajes de concentración de mordiente y concentración de colorante sobre la coordenada L^* del CIELab (L^* , a^* , b^*) para las telas teñidas antes de las pruebas.	61
Apéndice E. Análisis de varianza de los porcentajes de concentración de mordiente y concentración de colorante sobre la coordenada a^* del CIELab (L^* , a^* , b^*) para las telas teñidas antes de las pruebas.	62
Apéndice F. Análisis de varianza de los porcentajes de concentración de mordiente y concentración de colorante sobre la coordenada b^* del CIELab (L^* , a^* , b^*) para las telas teñidas antes de las pruebas.	62
Apéndice G. Análisis de varianza de los porcentajes de concentración de mordiente y concentración de colorante sobre la variación cromática (ΔE) de las pruebas de lavado.	63
Apéndice H. Análisis de varianza de los porcentajes de concentración de mordiente y concentración de colorante sobre la variación cromática (ΔE) de las pruebas de frote húmedo..	63

Resumen

Título: Diseño de un proceso de extracción no convencional asistido por ultrasonido para obtener una tinta vegetal a partir de borra de café.¹

Autores: Danna Catalina Sarmiento Díaz, Diego Andrés Ortegón Amaya.²

Palabras clave: ultrasonido, borra de café, estabilidad cromática, teñido.

Descripción: La creciente necesidad de alternativas sostenibles para la coloración de textiles ha fomentado el aprovechamiento de residuos agroindustriales y subproductos de la industria alimentaria como fuentes potenciales de compuestos cromóforos. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo diseñar un proceso para la obtención de una tinta vegetal a partir de la borra de café mediante extracción asistida por ultrasonido, evaluando la influencia de las variables de proceso: temperatura y relación sólido: solvente sobre el rendimiento del proceso y su potencial aplicación en el teñido de telas.

La metodología consistió en realizar una extracción sólido-líquido no convencional aplicando ultrasonido y utilizando etanol como solvente, donde se variaron las condiciones de temperatura y la relación sólido: solvente. Posteriormente, el extracto con mejor rendimiento fue caracterizado mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR-ATR) para identificar los principales grupos funcionales presentes en la tinta vegetal. Asimismo, se evaluó su desempeño como colorante en tejido de popelina, analizando su capacidad de tinción y fijación.

Los resultados evidenciaron que la interacción entre la temperatura y la relación sólido: solvente influye en la eficiencia del proceso de extracción, favoreciendo la recuperación de compuestos con potencial colorante. El análisis FTIR-ATR confirmó la presencia de grupos funcionales asociados a compuestos fenólicos y otras sustancias características del colorante obtenido a partir de la borra de café. Además, la tinta vegetal obtenida mostró capacidad para teñir y adherirse a la tela tipo popelina, lo cual se evidenció mediante el seguimiento del parámetro ΔE en las coordenadas CIELab durante cinco días de pruebas de lavado y frote en seco. En ambas pruebas se observó un patrón similar correspondiente a un incremento inicial de ΔE en los primeros dos días, seguido de una etapa de estabilización con fluctuaciones moderadas. Esto indica que la mayor variación cromática ocurrió al inicio, por la remoción del colorante absorbido superficialmente, mientras que los compuestos fijados mediante interacción con el mordiente permanecieron estables en los ciclos posteriores, confirmando la capacidad de fijación de la tinta sobre la tela a pesar de las variaciones observadas en su estabilidad cromática.

¹ Trabajo de grado.

² Facultad de Ingenierías físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Lilia Carolina Rojas Pérez. Ing. Química, Doctora en Ingeniería.

Abstract

Título: Design of an Ultrasound-Assisted Non-Conventional Extraction Process for Obtaining Vegetable Dye from Coffee Grounds.³

Authors: Danna Catalina Sarmiento Díaz, Diego Andrés Ortegón Amaya.⁴

Keywords: ultrasound, coffee grounds, color stability, dyeing.

Description: The growing need for sustainable alternatives for textile coloring has fostered the use of agro-industrial waste and food industry byproducts as potential sources of chromophoric compounds. In this context, this study aimed to design a process for obtaining vegetable dye from coffee grounds using ultrasound-assisted extraction, evaluating the influence of process variables—temperature and solid-to-solvent ratio—on process yield and its potential application in fabric treatment.

The methodology consisted of performing a non-conventional solid-liquid extraction using ultrasound and ethanol as the solvent, varying the temperature and solid-to-solvent ratio. Subsequently, the highest-performing extract was characterized using Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR-ATR) to identify the main functional groups present in the vegetable dye. Its performance as a dye on poplin fabric was also evaluated by analyzing its staining and fixation capacity.

The results showed that the interaction between temperature and the solid-to-solvent ratio influences the efficiency of the extraction process, favoring the recovery of compounds with dyeing potential. The FTIR-ATR analysis confirmed the presence of functional groups associated with phenolic compounds and other substances characteristic of the dye obtained from coffee grounds. Furthermore, the vegetable dye obtained demonstrated the ability to dye and adhere to poplin fabric, as evidenced by monitoring the ΔE parameter in CIELab coordinates during five days of washing and dry rubbing tests. In both tests, a similar pattern was observed, corresponding to an initial increase in ΔE during the first two days, followed by a stabilization stage with moderate fluctuations. This indicates that the greatest color variation occurred at the beginning, due to the removal of surface-absorbed dye, while the fixative compounds, through interaction with the mordant, remained stable in subsequent cycles, confirming the ink's ability to adhere to the fabric despite the observed variations in its color stability.

³ Thesis.

⁴ Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Chemical Engineering. Advisor: Lilia Carolina Rojas Pérez. Chemical Engineer, PhD in Engineering.

Introducción

Actualmente, la necesidad de reducir el impacto ambiental ha impulsado el aprovechamiento de residuos provenientes de la agricultura y la industria alimentaria para la coloración de textiles mediante alternativas más responsables, destacadas por sus características no tóxicas, su menor impacto ambiental y el uso eficiente de los recursos. En este sentido, el desarrollo de colorantes naturales es hoy una estrategia prometedora dentro de enfoques ambientalmente responsables (Mongkhorrattanasit et al., 2021).

En este contexto, diversos residuos han sido empleados como materia prima para la obtención de tintes naturales, entre los que se incluyen la cáscara de granada, la cáscara de cebolla, las semillas de achiote y las hojas de té verde (Novoa Lucía & Ruíz Lyda, 2021). Entre estos, la borra de café adquiere relevancia, considerando que el café es la segunda bebida más consumida a nivel mundial después del agua, con aproximadamente 2.250 millones de tazas consumidas diariamente, lo que genera cerca de 6 millones de toneladas de este residuo al año (Mercado Prado, 2022).

En consecuencia, su disposición inadecuada en vertederos contribuye a la contaminación ambiental, debido a la alta demanda de oxígeno en la descomposición y a la posible liberación de compuestos como cafeína, taninos y polifenoles. No obstante, esta misma composición química convierte a la borra de café en una materia prima de interés para la obtención de colorantes naturales aplicables en textiles (Mongkhorrattanasit et al., 2021). Esto resulta especialmente relevante si se considera que la industria textil requiere alternativas de colorantes biodegradables, menos o no tóxicos, que permitan reducir el impacto ambiental asociado a los tintes sintéticos convencionales.

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

Aunque la borra de café representa un residuo con alto potencial para la obtención de colorantes naturales, su aplicación en la industria textil aún presenta diversas limitaciones. En particular, los procesos de extracción no siempre garantizan un rendimiento adecuado ni una recuperación eficiente de los compuestos responsables de la coloración; además, se presentan dificultades en la reproducibilidad del color. Estas limitaciones se deben en gran medida, a la influencia de variables operativas como la temperatura y la relación sólido: solvente, las cuales afectan directamente a la eficiencia del proceso de extracción (Pizzicato et al., 2023a).

En este sentido, se presenta la necesidad de evaluar el efecto de dichas variables bajo condiciones de laboratorio, con el fin de determinar su influencia tanto en el rendimiento del proceso como en la coloración de la popelina bajo el análisis colorimétrico. De esta manera, se busca establecer el uso de la borra de café como una alternativa viable para el aprovechamiento y la adecuada disposición final de este residuo, promoviendo así la obtención de un colorante no tóxico y biodegradable, apto para su aplicación en el teñido de telas. En consecuencia, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo influyen la temperatura y la relación sólido: solvente en el rendimiento de la extracción por ultrasonido de colorantes de borra de café y en su desempeño en el teñido de telas?

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Diseñar un proceso para la obtención de colorantes naturales a partir de borra de café utilizando ultrasonido como técnica no convencional de extracción, orientando su aplicación como tinta vegetal para teñido en tela.

1.2 Objetivos específicos

- Analizar el impacto de la temperatura y la relación sólido: solvente como variables de extracción en el rendimiento del proceso de ultrasonido para obtener colorantes naturales de la borra de café.
- Analizar la estabilidad cromática del extracto obtenido mediante el desempeño en tela a través de pruebas de lavado y frote evidenciando su capacidad de fijación y permanencia de color.

2. Estado del arte

2.1 De semilla a residuo proceso de transformación del café

La semilla de café, contenida en el fruto de *Coffea arabica* inicia su transformación química desde el momento en que se cosecha y se somete al proceso de beneficio húmedo. En su estado original, el grano verde está compuesto por polisacáridos, lípidos, proteínas, ácidos clorogénicos y cafeína, los cuales aportan valor nutricional y funcional (Zapata Vargas, 2015). Durante el tueste, estos compuestos sufren reacciones de pirólisis y reacciones de Maillard, generando nuevos compuestos aromáticos y modificando su estructura química. Una vez molido y preparado como bebida, el café deja un sedimento más conocido coloquialmente en Colombia como cuncho o de ahora en adelante como se establecerá en este documento como borra, la cual es una mezcla húmeda de partículas finas las cuales presentan un contenido del 8-15% de lignina, 13-24% de celulosa y 30-40% de hemicelulosa, además de compuestos fenólicos residuales, melanoidinas y fracciones lipídicas remanentes provenientes del proceso de tuestión. Esta borra, aunque se considera residuo aún conserva una composición química que la hacen apta para aplicaciones como la producción de compost o biodiésel e incluso la obtención de colorantes naturales (Cevallos & Guerrero, 2017).

2.2 Contexto del aprovechamiento de la borra de café

2.2.1 Producción de la borra de café

Colombia es uno de los principales países productores de café con una estimación de producción anual de más de 14 millones de sacos cada uno de 60 kilogramos (Laura Flórez, 2025). Aunque la borra no se cuantifica directamente en las estadísticas oficiales, estudios internacionales

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

estiman que por cada kilogramo de café preparado se generan entre 0,5-0,7 kilogramos de borra (Campos-Vega et al., 2015). Esto implica que, si se considera que gran parte del café producido es destinado al consumo interno y externo en forma de bebida, Colombia produce más de 100 mil toneladas anuales de esta biomasa generando grandes oportunidades para su valorización en diferentes aplicaciones industriales.

2.2.2 Reutilización potencial de la borra de café

La borra de café puede usarse como combustible (Rodríguez Valencia & Zambrano, 2010), producción de biogás (Rodríguez Valencia & Zambrano, 2010), producción de biodiésel (Limón et al., 2020), producción de bioetanol (Carreño, 2022) y como colorante natural donde se han registrado que a partir de la borra se puede obtener un tinte por medio de procesos de lixiviación con etanol y cloroformo, además de procesos de purificación con evaporación y su posterior caracterización fisicoquímica por análisis de espectrofotometría UV-Vis. En la investigación realizada por Cevallos & Guerrero (2017) se obtuvo un rendimiento de 10% el cual fue definido como la masa de colorante recuperada respecto a la masa seca inicial de borra empleada en el proceso, además se demostró que este producto tiene actividad antioxidante, estabilidad térmica y una potencial capacidad de adsorción.

2.3 Composición química de la borra de café

La borra de café contiene diversos compuestos capaces de contribuir a su coloración característica y a su potencial uso como fuente de pigmentos naturales. Entre ellos destacan las melanoidinas, polímeros de alto peso molecular formados durante las reacciones de Maillard que ocurren en la etapa de tuestión, compuestos que son responsables de las tonalidades marrones oscuras características del café. Estos componentes funcionales no solo aportan color, sino que

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

también poseen propiedades funcionales como la captación de radicales libres, ampliando su aplicabilidad en sectores como el alimentario o la cosmética (Puertas et al., 2013).

Al comparar con otras materias primas utilizadas en la obtención de colorantes naturales, como la remolacha que es rica en betalaínas, el achiote fuente de bixina o la cúrcuma que posee curcuminoides, la borra del café presenta una composición cromófora más compleja y heterogénea donde se encuentra la presencia melanoidinas y compuestos fenólicos derivados de etapas previas. Mientras que estas fuentes vegetales contienen pigmentos predominantes que ya han sido identificados lo que facilita su estandarización en los procesos de extracción y su posterior reproducción del color obtenido, por lo que estos procesos permiten definir un mayor control de calidad, optimización de las condiciones de extracción y menor variabilidad entre lotes. Sin embargo, la borra ofrece ventajas asociadas a su alta disponibilidad como residuo agroindustrial, bajo costo de adquisición y su contribución a un proceso circular, donde su aprovechamiento no requiere de etapas agrícolas adicionales o un mayor consumo de recursos para la producción de la materia prima (Narváez & Villota, 2018).

2.4 Técnicas de extracción de colorantes

La extracción de colorantes naturales a partir de matrices vegetales como la borra de café es una estrategia para recuperar compuestos bioactivos presentes en la materia prima. Las técnicas de extracción se clasifican en dos grupos las convencionales y no convencionales. Esto se da a partir del tipo de energía aplicada, el uso de solventes y la eficiencia del proceso.

2.4.1 Métodos convencionales

Los métodos convencionales incluyen la maceración, infusión, decocción, lixiviación y extracción Soxhlet, estas técnicas se basan en el contacto prolongado entre el material sólido y el

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

solvente, generalmente bajo condiciones de temperatura controlada. Entre estos métodos se destaca el Soxhlet que permite una recirculación continua del solvente caliente lo que mejora el rendimiento, pero implica un mayor consumo energético y el uso de solventes orgánicos como acetona o cloroformo, que presentan riesgos para la salud y el ambiente (Ramírez Navas, 2021). Aunque estos métodos continúan siendo ampliamente utilizados a escala de laboratorio e industrial, presentan limitaciones relacionadas con elevados tiempos de operación además de las mencionadas con anterioridad; características que reducen su compatibilidad con varios principios de la química verde particularmente aquellos asociados con la eficiencia energética, la minimización en el uso de sustancias peligrosas y la reducción en la generación de residuos.

2.4.2 Métodos no convencionales

Los métodos no convencionales (ultrasonido, fluidos supercríticos, agua subcrítica, membranas) buscan mejorar la eficiencia de extracción, reducir el impacto ambiental y permitir mayor selectividad con solventes más seguros como agua o etanol. La extracción asistida por ultrasonido usa ondas que generan cavitación: microburbujas que colapsan y rompen las paredes celulares, liberando colorantes, polifenoles y lípidos, con bajo consumo energético (Chemat et al., 2017b). Sus variables típicas son temperatura de 30-60 °C, tiempo de 10-60 minutos, relación solido: solvente de 1:10 a 1:30 g/ml y frecuencia de 20-40 kHz, factores clave para la cavitación, la transferencia de masa y estabilidad de los compuestos extraídos (Uddin et al., 2022).

2.5 Aplicaciones emergentes de colorantes naturales como aplicación en tintas naturales

2.5.1 Tipos de colorantes

Los colorantes de acuerdo con su estructura química o sus aplicaciones pueden recibir un nombre comercial y código a través de la Sociedad de Tintoreros Coloristas (SDC) (*Society of*

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

Dyers Colourists por su sigla en inglés), a partir de su origen se pueden clasificar en dos grupos importantes (Uddin et al., 2022):

- Colorantes inorgánicos: son de origen químico, generalmente en su estructura se presentan grupos auxocromo y cromóforo. Suelen dividirse en colorantes directos o sustantivos, colorantes reactivos, colorantes sulfurosos, colorantes indantrenos, colorantes naftoles, colorantes ácidos y colorantes básicos.
- Colorantes naturales: procedentes de origen natural debido a características que intensifican o modifican el color, por lo general se subdividen en tres grupos como colorantes de origen animal, de origen vegetal y microorganismos como bacterias, levaduras y hongos filamentosos.

2.5.2 Biotintas que se hayan producido a partir de borra de café o de otras materias primas tipo agrícola con aplicación gráfica o textil

Las biotintas de café tienen gran potencial gráfico y textil por sus propiedades colorantes y su abundancia como residuo. Salcedo & Riascos (2023) obtuvieron, mediante procesos fisicoquímicos, pigmentos de tonalidades marrones y terrosas aptos para impresión artesanal y serigráfica, con viabilidad para integrarse en matrices poliméricas biodegradables, reduciendo el impacto de los tintes sintéticos.

De forma similar, otros residuos agrícolas (cáscara de cebolla, remolacha, cúrcuma), ricos en compuestos fenólicos y flavonoides, han producido biotintas de colores intensos con buena fijación sobre papel y fibras naturales. Los extractos de cebolla y remolacha mostraron estabilidad a la luz y al lavado, viables para textiles (Jácome et al., 2023), mientras que las tintas de cúrcuma

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

y remolacha resultaron compatibles con serigrafía y grabado artesanal, contribuyendo a disminuir el impacto ambiental (Salinas, 2018).

2.5.3 Teñido de telas con biotintas de origen natural

El teñido con biotintas naturales incluye dos etapas: mordentado de la fibra (con alumbre potásico u otras sales metálicas, o biomordientes vegetales) y aplicación del extracto colorante. El mordentado es clave para mejorar la fijación y resistencia al lavado, dado que los pigmentos naturales tienen menor afinidad por las fibras que los sintéticos (Pizzicato et al., 2023b); recientemente se prefieren alternativas más ecológicas como taninos vegetales y biomordientes, que reducen la toxicidad y mantienen la intensidad del color.

Colorantes naturales como índigo, cúrcuma, cochinilla y eucalipto ofrecen amplia gama cromática y propiedades antioxidantes o antimicrobianas. Residuos agroindustriales – cáscaras de cebolla, semillas de aguacate y residuos de café- también generan tonalidades estables y atractivas, aportando economía circular al teñido textil (Pranta & Rahaman, 2024).

Además de lo ambiental, el teñido con biotintas responde a criterios culturales y estéticos: la variabilidad cromática (según pH, temperatura y tipo de fibra) da un carácter único a cada pieza, valorado en el diseño artesanal y sostenibilidad como un sello diferenciador en vez de una limitación (Santiago et al., 2023).

2.6 Estabilidad del colorante en teñido de telas

2.6.1 Pruebas de estabilidad ejercidas sobre telas teñidas con colorantes de origen natural

La estabilidad de los colorantes naturales en textiles es crítica para su adopción industrial, ya que la pérdida de intensidad cromática frente a la luz, el lavado, el pH, la temperatura y la

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

interacción con mordientes o fibras limita su competitividad frente a los sintéticos. Lombardi et al. (2025) señalan que la durabilidad del color en algodón depende del método de mordentado y de la naturaleza química del extracto, siendo los taninos y el alumbre potásico los que mejoran la fijación y reducen la pérdida de color.

En fibras proteicas como la lana, mezclas de colorantes biodegradables (rojo de rubia, azul de gardenia y amarillo de gardenia) lograron una paleta estable sin mordientes metálicos, aunque con poca resistencia a la luz (Shokrzadeh et al., 2025), confirmando que la estabilidad depende de la interacción colorante-fibra y las condiciones ambientales.

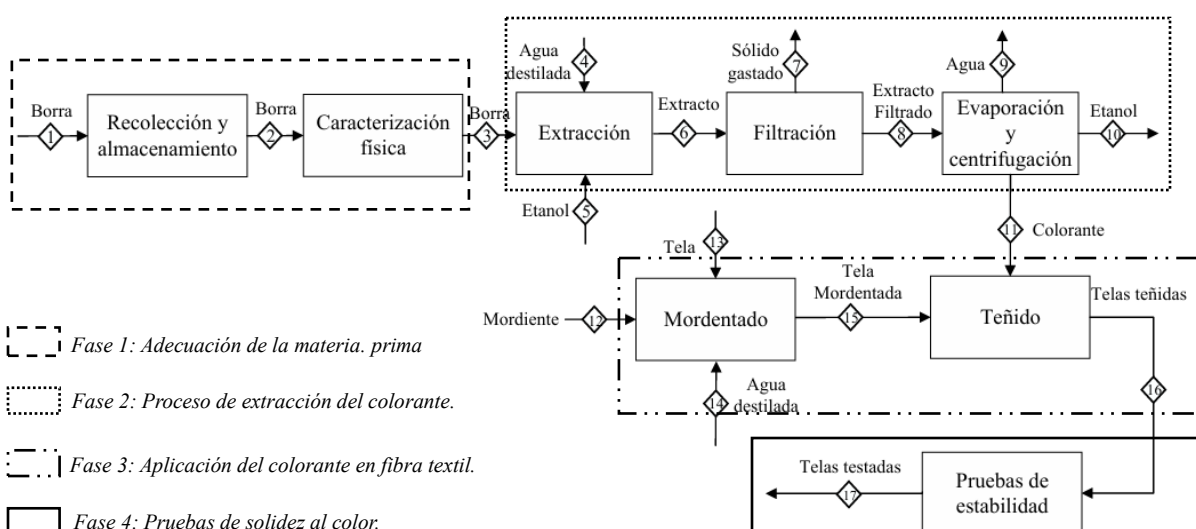
Estas pruebas se rigen por normas internacionales: ISO 105-B02 (solidez a la luz), ISO 105-C06 (resistencia al lavado) e ISO 105-X12 (resistencia a la fricción). Botteri et al. (2022) aplicaron estos protocolos en algodón teñido con cebolla y granada, observando pérdida gradual de color tras varios lavados, efecto que mejoró con el uso de mordientes.

3. Metodología

A continuación, en la Figura 1, se resume la metodología en cuatro fases: adecuación de la materia prima, obtención y separación del colorante, teñido de la tela de popelina con el colorante, y evaluación de la estabilidad cromática del color aplicado.

Figura 1

Esquema metodológico.



3.1 Fase 1: Adecuación de la materia prima.

3.1.1 Recolección y almacenamiento de la borra de café.

La fase inicial del proyecto se enfocó en la recolección y acondicionamiento de la materia prima, obtenida a partir de los residuos de borra de café provenientes de la cafetería Don Cafeto de la Universidad Industrial de Santander. La borra correspondió al sedimento obtenido luego de la preparación de café de marca premium *Hyphen*, variedad tipo castilla, con tosti3n media y declarado de origen del departamento del Huila. Dado que este residuo corresponde a un material

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

fresco con elevada retención de agua, condición esperable dada la naturaleza de la materia prima, el control de la humedad constituyó un aspecto crucial desde esta etapa. Con el fin de garantizar la estabilidad del residuo y favorecer los posteriores procesos de extracción, la materia prima recolectada se distribuyó en bolsas tipo ziploc y se congeló a una temperatura de -18°C , con el fin de evitar el crecimiento microbiano derivado de la humedad presente en la borra y así preservar sus características hasta el momento de su uso.

3.1.2 Caracterización física de la materia prima.

En esta etapa del proyecto, se realizó la caracterización de la materia prima, considerando parámetros como el contenido de humedad y tamaño de partícula. Para la determinación de la humedad, se tomaron 2 gramos de muestra, los cuales se analizaron en el equipo (*Precisa XM 60-HR*, Suiza), un analizador basado en el principio de termogravimetría, que determina el porcentaje de humedad mediante la pérdida de peso de la muestra al ser sometida a calentamiento, registrando de manera continua la diferencia entre la masa inicial y la masa final una vez alcanzada la deshidratación completa. El equipo finalizó el análisis de forma automática, al detectar la estabilización en la pérdida de masa de la muestra. El ensayo se realizó por duplicado, con tiempos de secado de 22.7 y 21.1 minutos para la primera y segunda réplica, respectivamente.

Por otra parte, el tamaño de partícula se determinó mediante un análisis granulométrico por tamizado. Para ello, la muestra se sometió previamente a un proceso de secado en un horno de convección a 60°C hasta alcanzar un porcentaje de humedad menor al 10%. El principio de secado se basó en los lineamientos generales establecidos por la norma NREL/TP-510-42621 Sluiter et al., (2008), para la determinación de sólidos totales en biomasa, adaptando la temperatura a 60°C con el fin de minimizar la degradación térmica de los compuestos de interés presentes en la borra

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

de café. Posteriormente, se pesaron 45 gramos de muestra y se colocaron en la parte superior de una serie de tamices ASTM con aperturas entre 1000 y 180 μm , organizados en orden decreciente de tamaño de abertura, con un recipiente colector en la base, procedimiento similar al reportado en estudios previos de caracterización de borra de café mediante tamizado (Bejenari et al., 2021a). La columna de tamices se sometió a agitación durante 10 minutos en el equipo (*Biobase JS14S*, China), permitiendo la separación de las partículas según su tamaño.

Finalizado el proceso de tamizado, se recuperó y pesó el material retenido en cada uno de los tamices utilizando la balanza (*UXILAI Scientific EXJ1003*, China), registrando las masas correspondientes para el cálculo del porcentaje retenido y acumulado, lo que permitió obtener la distribución granulométrica del material y el tamaño de partícula promedio.

3.2 Fase 2: Proceso de extracción del colorante.

3.2.1 Extracción Soxhlet y ultrasonido.

En esta etapa del proyecto se llevó a cabo la extracción del colorante mediante los métodos de Soxhlet y ultrasonido. Para la extracción por Soxhlet, la muestra sólida se colocó en un cartucho poroso (dedal de celulosa), el cual se introdujo en el cuerpo del extractor Soxhlet, acoplado a un matraz que contenía una mezcla 50:50 de etanol: agua como solvente de extracción. El sistema se sometió a calentamiento mediante un manto calefactor, el cual mantuvo una temperatura aproximada de $108^{\circ}\text{C} (\pm 1^{\circ}\text{C})$, regulada automáticamente por el propio equipo, lo que permitió la evaporación del solvente; los vapores ascendieron hacia el condensador de reflujo, donde se enfriaron y condensaron. El solvente condensado goteó sobre la muestra, extrayendo el colorante, y se acumuló en la cámara del extractor hasta alcanzar el nivel de sifón, momento en el cual retornó al matraz. Este ciclo de extracción se repitió de manera continua durante 6 horas, tiempo

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

consistente con lo reportado en la literatura para la extracción de colorantes naturales mediante Soxhlet, donde tiempos de extracción similares han permitido obtener un mayor contenido de compuestos fenólicos (Khalil et al., 2025), favoreciendo así la recuperación de compuestos con potencial colorante incluyendo, por ejemplo, melanoidinas.

Para la extracción por ultrasonido se empleó la sonda ultrasónica (*Ultrasonic Processor* VCX750, Estados Unidos), utilizando una mezcla 50:50 etanol: agua como solvente de extracción. En esta fase, se implementó un diseño factorial 3^2 , considerando como factores la temperatura de extracción (30, 40 y 50°C) y la relación sólido: solvente (1:20, 1:30 y 1:40 m/v). Cada condición experimental se realizó por triplicado, para un total de 27 ensayos experimentales. Cada ensayo se llevó a cabo bajo condiciones controladas, operando a una frecuencia de 20 kHz, una amplitud del 50% y en modo continuo durante 15 minutos por ensayo. Adicionalmente, la temperatura fue monitoreada de forma continua mediante un sistema de baño termostataado, lo que permitió una variación máxima de ± 2 °C respecto al valor fijado para la temperatura de extracción.

3.2.2 Filtración.

En esta etapa del proceso, se realizó la separación del residuo sólido de la fase líquida mediante el uso de un filtro metálico, con un tamaño de poro aproximado de 1,5 mm, con el fin de remover las partículas de mayor tamaño presentes en la mezcla.

3.2.3 Recuperación del solvente y separación del extracto.

En esta etapa del proceso, se lleva a cabo la recuperación del etanol y la separación del extracto obtenido. Inicialmente, la muestra líquida se sometió a evaporación en el equipo (DLAB RE100-Pro, China), operando a 55°C, 200 rpm y 180 mbar, condiciones que permitieron la evaporación del etanol y su recuperación eficiente. Posteriormente, el extracto concentrado se

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

sometió a centrifugación utilizando la centrífuga (*Thermo Scientific* SL 8R, China) operando a 4°C, 8000 rpm durante 15 minutos. Estas condiciones permitieron una separación eficiente de ambas fases, favoreciendo la obtención de una fracción líquida menos turbia y libre de sólidos insolubles.

3.2.4 Caracterización del extracto.

El análisis por Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier con Reflectancia Total Atenuada (FTIR-ATR) se realizó con el objetivo de identificar los principales grupos funcionales presentes en el extracto obtenido a partir de la borra de café, y relacionarlos con los compuestos responsables de las propiedades cromóforas del material, siguiendo la metodología reportada por Castellanos & Rojas, (2024). Los espectros se obtuvieron utilizando un equipo (IS50 FT-IR Nicolet, *Thermo Scientific*, Estados Unidos), en modo de Reflectancia Total Atenuada (ATR), en un rango de adquisición de 4000 a 400 cm^{-1} , con una resolución de 4 cm^{-1} , una velocidad óptica de 0.4747 cm/s y 32 escaneos, realizando las mediciones por triplicado.

3.2.5 Secado.

En esta etapa del proceso, se realizó el secado de la fase líquida obtenida tras la centrifugación, con el fin de separar los sólidos solubles y así determinar el rendimiento del proceso. Para ello, las muestras se introdujeron en un horno de convección (*Memmert*, Alemania) a una temperatura de 60°C durante 1 hora. Posteriormente, se trasladaron a un desecador durante 1 hora, con el fin de permitir su enfriamiento evitando la absorción de humedad del ambiente, garantizando así una medición de masa precisa y reproducible. Transcurrido este tiempo, las muestras se pesaron individualmente en balanza analítica. El ciclo de secado, enfriamiento en desecador y pesaje se repitió hasta alcanzar peso seco constante, criterio que, según la metodología

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

de la NREL, se cumple cuando la diferencia entre dos pesadas consecutivas es inferior al 0.1% de la masa de la muestra. Finalmente, el rendimiento fue calculado en base seca, según la ecuación 1:

$$Rendimiento (\%) = \frac{m_{extracto\ seco}}{m_{borra\ base\ seca}} \times 100 \quad (Ec.1)$$

Donde m_{seca} corresponde a la masa del extracto seco obtenido (g) y $m_{borra\ base\ seca}$ a la masa de la borra de café en base seca utilizada (g).

3.2.6 Análisis estadístico.

Los datos experimentales obtenidos fueron sometidos a un análisis estadístico con el fin de seleccionar la condición experimental utilizada posteriormente en la fase de teñido de la tela. Dicha selección se realizó mediante un análisis de varianza (ANOVA de dos factores), realizado con Microsoft Excel®, considerando un nivel de significancia de 0.05, con el fin de evaluar el efecto de las variables de estudio (temperatura y relación sólido: solvente) sobre el rendimiento de extracción como variable de respuesta. Adicionalmente, se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey, calculada a partir de los resultados del ANOVA, con un nivel de significancia del 95%, con el fin de identificar diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados.

3.3 Fase 3: Aplicación del colorante en una fibra textil

3.3.1 Preparación de la tela

En esta etapa, se realizó la preparación de la tela comercialmente conocida como popelina 100% algodón. Inicialmente, la tela se cortó en muestras de 10 cm x 10 cm. Posteriormente, las muestras se sometieron a un proceso de lavado con jabón neutro extran de la marca Merck, con el

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

fin de eliminar impurezas que pudieran interferir en la absorción del colorante. Finalmente, las telas se dejaron secar a temperatura ambiente del laboratorio (24°C).

3.3.2 Diseño experimental para la aplicación del colorante en la popelina

Para evaluar el efecto de las variables de estudio sobre el color obtenido en las muestras teñidas, se empleó un diseño de experimentos factorial 3^2 , con dos factores evaluados en tres niveles cada uno: la concentración de mordiente (10, 15 y 20 %p/p respecto al peso de la popelina) y la concentración de colorante (10, 20 y 30 %p/v respecto al peso de la popelina). Este diseño generó un total de 9 tratamientos, cada uno de los cuales se evaluó por duplicado, para un total de 18 unidades experimentales (Tabla 1).

Tabla 1

Diseño experimental del porcentaje de mordiente y colorante utilizados en cada tela.

Tratamiento (Tela)	Mordiente (%)	Colorante (%)
A	10	10
B	10	20
C	10	30
D	15	10
E	15	20
F	15	30
G	20	10
H	20	20
I	20	30

Como variable de respuesta se consideró el color de la tela, determinado mediante el sistema colorimétrico CIELab, utilizando la aplicación ColorGrab para la captura y análisis de las

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

coordenadas cromáticas de cada muestra, herramienta validada previamente para la extracción de coordenadas de color a partir de imágenes digitales de smartphone (Peng et al., 2019).

3.3.3 Pre-mordentado y teñido.

En esta etapa de la fase de teñido, las muestras de tela previamente preparadas (numeral 3.3) fueron sometidas a un proceso de pre-mordentado utilizando $KAl(SO_4)_2$ (sulfato de aluminio y potasio) comúnmente conocido coloquialmente como alumbre, el cual actúa como agente fijador entre el colorante y la fibra mediante la formación de complejos de coordinación (Darmawan et al., 2024). Para ello, las telas se sumergieron en una solución de alumbre preparada con agua destilada manteniendo siempre la relación de baño (tela: solución) en 1:20, y posteriormente se llevaron a un baño termostático (*Lauda Alpha* RA12, Alemania) manteniendo una temperatura interna de la solución constante de 70°C durante 60 minutos, condiciones similares a las reportadas como óptimas en estudios previos de mordentado sobre tela de algodón (Darmawan et al., 2024). Finalmente, las muestras se enjuagaron con agua destilada y se dejaron secar a temperatura ambiente del laboratorio (23±1°C).

Posteriormente, las muestras ya mordentadas fueron sometidas a la etapa de teñido, para lo cual se sumergieron en un baño de colorante, manteniendo las mismas condiciones de proceso empleadas en el pre-mordentado (relación de baño, temperatura de 70°C y tiempo de 60 minutos en el baño termostático (*Lauda Alpha* RA12, Alemania)), condiciones también reportadas como óptimas para la etapa de tinción sobre tela de algodón (Darmawan et al., 2024). La diferencia entre ambas etapas radicó, por tanto, únicamente en la composición del baño: en el pre-mordentado se empleó una solución de alumbre, mientras que en el teñido se utilizó el baño de colorante.

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

3.4 Fase 4: Pruebas de solidez al color

Las unidades experimentales correspondientes a las 18 telas teñidas resultantes del diseño experimental de la fase 3.8 y 3.9 se cortaron por la mitad, con el fin de someter cada una de las fracciones a las pruebas de solidez al lavado y frote en seco, evaluando así la estabilidad cromática del color.

3.4.1 Prueba de lavado

Para evaluar la solidez del color al lavado, se tomó una fotografía de referencia de cada muestra antes de iniciar el primer ciclo de lavado, la cual se utilizó como punto de comparación para determinar la variación del color a lo largo del ensayo. Posteriormente, cada fracción de tela se sometió a un proceso de lavado utilizando una plancha de calentamiento con agitación magnética (*Biobase MS-H-S10*, China), en la cual se ubicó un vaso de precipitado con un agitador magnético, jabón neutro y la muestra correspondiente. Cada ciclo de lavado tuvo una duración de 30 minutos, y este proceso se repitió 5 veces, con el fin de simular las condiciones de un lavado múltiple según lo establecido en la norma ISO 105-C06. Entre cada ciclo, las muestras se enjuagaron y se dejaron secar a temperatura ambiente del laboratorio (24°C), luego de 24 horas, se registró su apariencia mediante fotografías tomadas en una cámara de medición, bajo condiciones controladas de iluminación, con el fin de minimizar la influencia de factores externos sobre la percepción del color.

Para el análisis de estas fotografías, se empleó la aplicación ColorGrab, la cual permite obtener coordenadas CIELab para luminosidad (L^*) y las coordenadas cromáticas a^* (eje rojo-verde) y b^* (eje amarillo y azul) de cada muestra a partir de la imagen capturada, evaluando así la variación del color de las telas teñidas frente a lavados repetitivos.

3.4.2 Pruebas de frote en húmedo

Para evaluar la solidez del color al frote húmedo, se empleó un montaje manual alternativo, en el cual se utilizó un dedo envuelto en una tela blanca de popelina 100% algodón como superficie de frotamiento, adaptando así los principios generales establecidos en la norma ISO 105-X12. La tela blanca se humedeció con agua destilada y, mediante pesaje en balanza analítica antes y después de humedecerla, se verificó un porcentaje de absorción de humedad (%MP) aproximado al 95%, calculado mediante la ecuación 2:

$$\%MP = \frac{m_{húmeda} - m_{seca}}{m_{seca}} \times 100 \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde m_{seca} corresponde a la masa de la tela blanca antes de humedecerla, y $m_{húmeda}$ a la masa inmediatamente después de humedecerla y antes de iniciar el frote. Sobre cada muestra teñida se realizaron 10 ciclos de frote manual, ejerciendo una presión constante mediante el dedo cubierto con la tela blanca humedecida. Antes y después de realizar el frote, se fotografió la tela teñida en la cámara de medición, bajo las mismas condiciones controladas de iluminación empleadas en la prueba de lavado. Para el análisis de estas fotografías, se empleó la aplicación ColorGrab, con el fin de obtener las coordenadas CIELab de la muestra teñida antes y después del frote, para determinar de esta manera la variación del color (ΔE) como indicador de la solidez del color al frote húmedo de las telas teñidas.

4. Resultados y análisis de resultados

4.1 Caracterización de la materia prima

4.1.1 Determinación de humedad de la borra de café

El valor de humedad ($61,1\% \pm 0,006$) correspondió a un valor característico de la borra de café, debido a su capacidad de retención de agua asociada a la estructura lignocelulósica de esta biomasa y a las condiciones del proceso de preparación a través de la extracción sólido-líquido para una obtener una bebida a partir del grano de café. Se han reportado valores de humedad superiores al 50%, los cuales difieren según el método de extracción del café, para esta investigación la cafetería Don Cafeto usaba el método de percolación y una temperatura de 25°C como condición de almacenamiento de este residuo. Estos valores de humedad implican que el valor de $61,1\% \pm 0,006$ presenta una mayor susceptibilidad a la proliferación microbiana y a la degradación química de los compuestos fenólicos, lo que justifica la necesidad de congelar la borra en la fase de adecuación para garantizar su estabilidad y reproducibilidad en los procesos posteriores (Kovalcik et al., 2018).

4.1.2 Análisis granulométrico de la borra de café

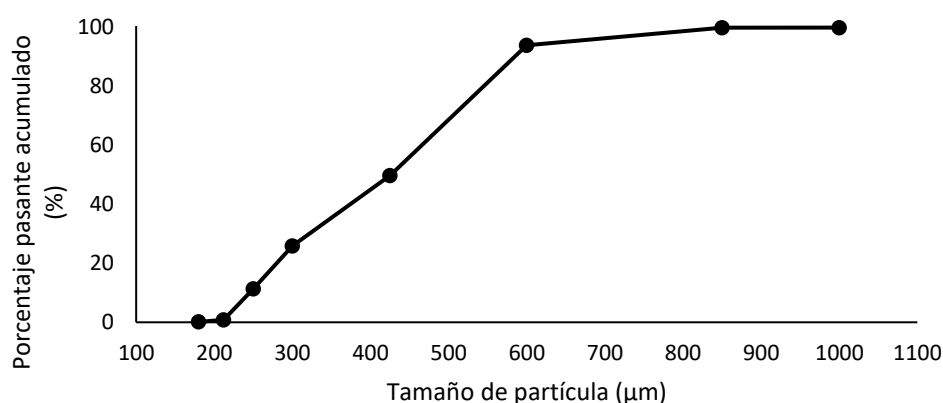
Los resultados experimentales obtenidos fueron representados a través de una curva del porcentaje pasante (%P) en función del tamaño de partícula (abertura), con el propósito de visualizar el comportamiento granulométrico del material analizado. Como se observa en la figura 2, la mayor retención de masa (%Ri) se presentó en el tamiz de 425 μm , correspondiente a un 49% aproximadamente del material analizado, seguido del tamiz de 300 μm con un 24% aproximadamente. Estos valores indican que la borra de café presenta una distribución de

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

partículas denominada media, la cual se concentra principalmente en los tamices mencionados. Asimismo, el análisis demostró un tamaño de partícula promedio de 314 μm , valor que se encuentra dentro del rango (297-430 μm) reportado por Bejenari et al (2021).

Figura 2

Curva de distribución granulométrica de la borra de café.



Por otra parte, la curva de distribución granulométrica presento una tendencia acumulativa ascendente típica de materiales pulverulentos heterogéneos, donde aproximadamente el 26% de las partículas poseen tamaños inferiores a 300 μm , mientras que el 11% son menores a 250 μm . A su vez, se evidenció una baja porción de partículas extremadamente finas (<180 μm), las cuales solo representan el 0,1% del total de la muestra, lo que sugiere una distribución controlada y con poca generación de finos. El tamaño de partícula obtenido resulta comparable con lo reportado en la literatura para borra de café. En estudios de caracterización fisicoquímica de borra de café, se ha reportado que la mayor proporción de partículas se encuentra en rangos comprendidos entre 200 y 600 μm , con diámetros promedio cercanos al rango de 297-430 μm (Bejenari et al., 2021). En particular el trabajo desarrollado por Gora et al, (2022) en ACS Omega clasificó la borra de

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

café en intervalos granulométricos entre 106-300 μm y 300-500 μm , indicando que estas fracciones representan la mayor proporción del material obtenido tras la molienda y extracción del café.

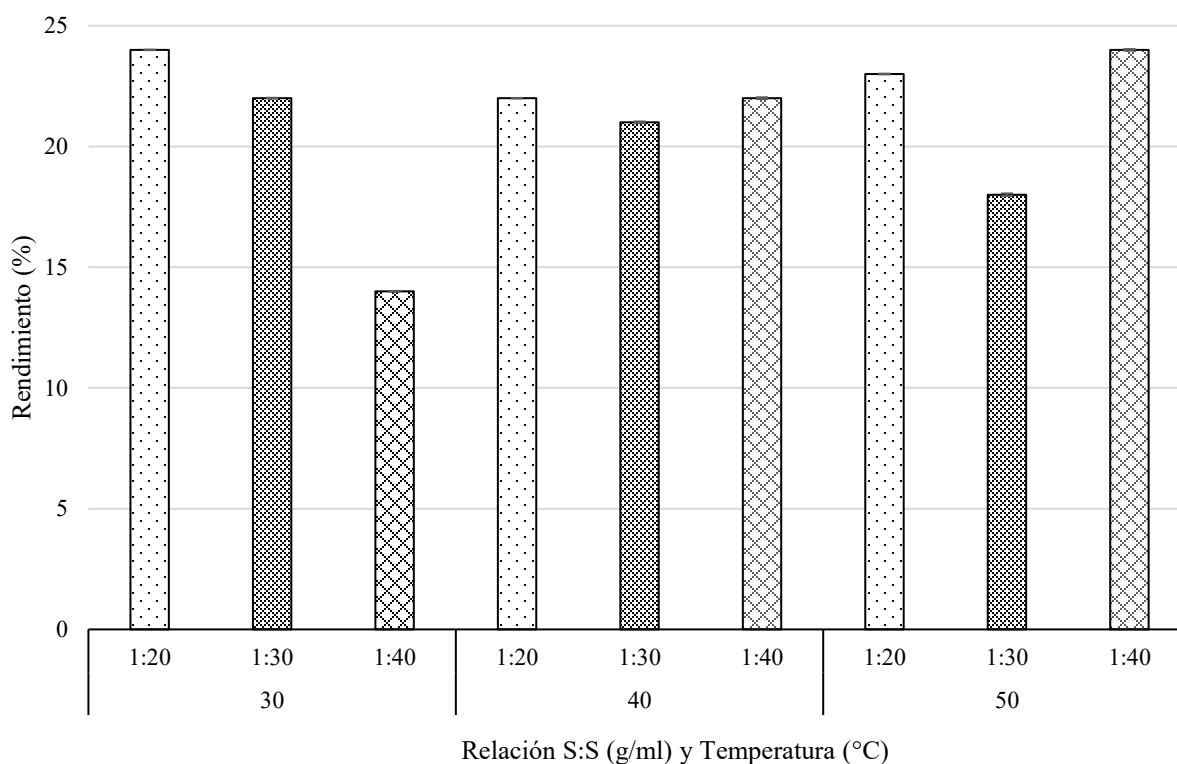
4.2 Extracción del colorante de la materia prima mediante ultrasonido

4.2.1 Rendimientos de extracción mediante ultrasonido

A partir de los resultados experimentales obtenidos, se calcularon los rendimientos promedios para cada combinación de temperatura y relación sólido: solvente evaluada en el diseño de experimentos, estos resultados se presentan en la figura 3.

Figura 3

Promedio de rendimiento de extracción para cada tratamiento experimental.



EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

Como se observa en figura 3, el rendimiento de extracción obtenido para las diferentes relaciones sólido: solvente evaluadas a una temperatura 30,40 y 50°C. Donde a una temperatura de 30°C las relaciones S:S de 1:20 y 1:30 presentaron rendimientos similares (24 y 22%, respectivamente), mientras que la relación de 1:40 mostro una disminución de aproximadamente 10% respecto al mayor rendimiento, lo que indica que para esta temperatura un aumento en la cantidad de solvente no favoreció la extracción del colorante. A 40°C, los rendimientos fueron similares entre las tres relaciones S:S, con valores cercanos a 21-22% evidenciando una menor influencia de la relación S:S sobre el proceso de extracción. Por su parte, a 50°C el comportamiento del rendimiento fue diferente a la menor relación (1:20), ya que en esta temperatura se obtuvo un mayor rendimiento para la relación 1:40 (24%), seguido de 1:20 (23%), mientras que la relación de 1:30 presento el menor valor de rendimiento (18%). En conjunto, la relación de 1:20 mantuvo rendimientos elevados en las tres temperaturas evaluadas, mientras que la relacion 1:40 presento la mayor variación, pasando del menor rendimiento (14%) a 30°C al mayor (24%) a 50°C.

Los resultados del análisis de varianza mostraron que la interacción entre la temperatura (T) y la relación sólido: solvente (R) presentó un efecto significativo sobre la variable de respuesta con ($p = 0,007$), debido a que este valor de probabilidad fue menor que el nivel de significancia establecido ($p < 0,05$). Por su parte, los factores individuales temperatura ($p = 0,373$) y relación S:S ($p = 0,124$) no mostraron efectos significativos de manera independiente. Este comportamiento puede atribuirse a la interacción entre los fenómenos de transferencia de masa y la capacidad de solubilización del solvente, donde la temperatura favorece la extracción de compuestos fenólicos debido a la mejora de la difusión y la liberación de metabolitos hacia el medio líquido. Por su parte la relación entre el sólido y el solvente influye de manera directa sobre el gradiente de concentración que impulsa la transferencia de masa, por lo que ninguna de las dos variables por si

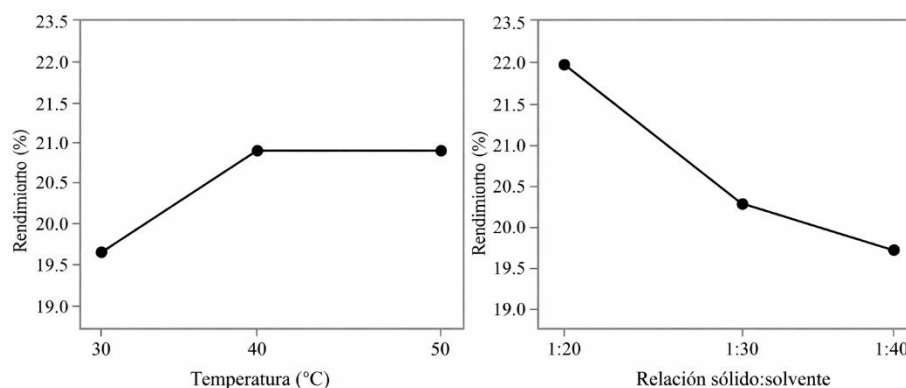
EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

solas determinan el mayor rendimiento de extracción, sino que se debe buscar la mejor combinación de ambas condiciones (Chemat et al., 2017c).

Con el fin de visualizar el comportamiento de las variables evaluadas sobre el rendimiento de extracción promedio para cada una, se elaboraron las gráficas de efectos principales (figura 4) para la temperatura y la relación sólido: solvente (S:S).

Figura 4

Efectos principales de la temperatura y relación sólido: solvente sobre el rendimiento de extracción.



Como se evidencia en la figura 4, la temperatura como la relación sólido: solvente influyen en el rendimiento promedio del proceso de extracción, aunque con comportamientos diferentes. En el caso de la temperatura, el rendimiento aumentó al pasar de 30° C a 40° C y de 40°C a 50°C se mantuvo constante, lo que sugiere que el incremento de la temperatura favorece solamente hasta los 40° C. Por otro lado, para el factor correspondiente a la relación sólido:solvente se observa una tendencia descendente del rendimiento, puesto que a medida que aumenta la cantidad de solvente el rendimiento disminuye, aunque las gráficas sugieren una tendencia del rendimiento de extracción, el comportamiento real del sistema depende de la combinación simultanea de ambos

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

factores como se evidencia en el ANOVA. En la literatura se han reportado que incrementos entre 30°C y 50°C en la temperatura favorece la extracción de compuestos fenólicos y pigmentos naturales debido al aumento de la solubilidad del soluto y a la disminución de la viscosidad del solvente, facilitando la penetración del medio de extracción en la matriz vegetal (Chemat et al., 2017). Así mismo, temperaturas superiores a 60°C pueden provocar degradación térmica de compuestos bioactivos, afectando negativamente el rendimiento global de extracción.

De igual manera, la relación solido: solvente influye directamente sobre el gradiente de concentración y la capacidad de saturación del solvente. Relaciones con mayor cantidad de solvente pueden favorecer la transferencia de masa al incrementar el área efectiva de contacto entre el sólido y el medio a extraer. No obstante, relaciones excesivas a 1:20 pueden disminuir la eficiencia energética y diluir los compuestos extraídos (Chemat et al., 2017). Asimismo, se ha reportado que la eficiencia de extracción en procesos de ultrasonido depende en gran parte de las interacciones entre temperatura y la cantidad del solvente utilizado, debido a cambios simultáneos en la tensión superficial, viscosidad y capacidad difusional del medio extractante (Wen et al., 2018).

Adicionalmente al análisis de varianza (ANOVA), se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey con el fin de identificar diferencias significativas entre los tratamientos evaluados, considerando un nivel de confianza del 95%. Para la realización de esta prueba se utilizaron los valores promedio del rendimiento de extracción obtenidos para cada tratamiento, presentado en la tabla 2, así como los parámetros estadísticos derivados de análisis de varianza, los cuales se muestran a continuación.

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

Tabla 2

Resultados del ANOVA empleados en la prueba de comparación múltiple de Tukey.

Parámetro	Valor
Cuadrado medio del error (MSE)	0,0008
Valor crítico de Tukey (q)	4,05
Número de réplicas (n)	3
Grados de libertad del error (gl)	18
Nivel de significancia (α)	0,05

A partir de estos datos se calculó la Diferencia Honestamente Significativa (HSD, por sus siglas en inglés), obteniéndose un valor de 0,068. Este valor se utilizó como criterio para comparar las medias de rendimiento de extracción presentadas en la tabla 2. De acuerdo con la prueba de Tukey, cuando la diferencia absoluta entre dos medias es inferior al valor de HSD, se concluye que no existen diferencias significativas entre los tratamientos evaluados; por el contrario, si dicha diferencia supera este valor, se considera que existe una diferencia estadísticamente significativa entre ellos. Los resultados obtenidos mediante la prueba de Tukey se presentan en la tabla 3.

Tabla 3

Valores obtenidos en la prueba de Tukey usados para determinar la mejor combinación de factores.

Combinación	Rendimiento promedio (%)	Diferencia respecto al mayor rendimiento	Comparación con HSD
T1–R1	24	0	$0 < 0.068$
T3–R3	23,7	0,3	$0,3 > 0.068$
T3–R1	23	1	$1 > 0,068$
T1–R3	14	10	$10 > 0,068$

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

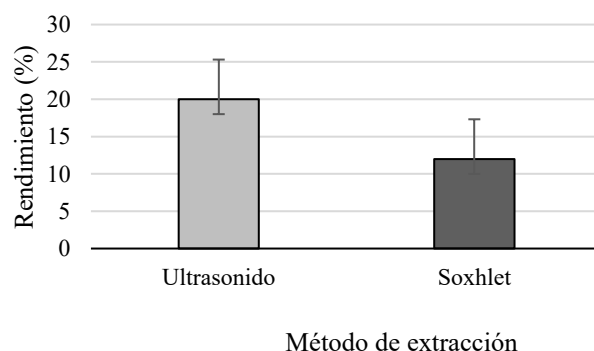
La prueba de Tukey mostró diferencias significativas entre tratamientos: la combinación T1-R1 (30°C, S:S 1:20) dio el mayor rendimiento (24%), mientras que T1-R3 (30°C, S:S 1:40) dio menor, evidenciando que más solvente no mejora necesariamente la extracción. Esto coincide con la literatura. Martínez-Ramos et al. (2020) señala por ejemplo que la interacción entre temperatura y relación sólido: solvente afecta significativamente la eficiencia de extracción por ultrasonido, vía cambios en la transferencia de masa y la intensidad de cavitación.

4.2.2 Comparación entre extracción ultrasónica y extracción Soxhlet

Para evaluar la eficiencia de la extracción asistida por ultrasonido frente a un método convencional, se llevaron a cabo ensayos de extracción mediante Soxhlet utilizando una relación sólido: solvente de 1:40 ya que para este proceso se requería un volumen de 200 ml para cada 5 gramos de borra seca, el cual garantizaba la operación continua del sifón y la completa inmersión del sólido durante los ciclos de extracción. Posteriormente, se compararon los rendimientos de extracción obtenidos por ambos métodos, cuyos resultados se presentan en la figura 5:

Figura 5

Comparación del rendimiento promedio de extracción entre ultrasonido y Soxhlet a relación S:S de 1:40.



EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

El método convencional arrojó un rendimiento promedio de $13\pm 2\%$, valor inferior al obtenido mediante el método no convencional, el cual alcanzó un valor de $20\pm 5\%$ para la misma relación sólido: solvente. Como se observa en la figura 5, el mayor rendimiento obtenido mediante el uso de ultrasonido puede atribuirse a la cavitación acústica generada por las ondas ultrasónicas, fenómeno que favorece la ruptura de estructuras celulares y en consecuencia, mejora la transferencia de masa (Martínez-Ramos et al., 2020). En contraste, la extracción Soxhlet depende principalmente de procesos de difusión y calentamiento prolongado, lo que no solo incrementa el tiempo de extracción, sino que también puede favorecer la degradación térmica de los compuestos sensibles. Asimismo, se ha reportado que la extracción asistida por ultrasonido representa una alternativa más eficiente y sostenible frente a métodos convencionales, debido a la reducción en tiempos de operación, menor consumo energético y mayor recuperación de compuestos fenólicos (Vinatoru et al., 2017). En consecuencia, los resultados obtenidos en esta investigación evidencian que la extracción por el método no convencional constituye una metodología eficiente para la obtención de colorantes naturales a partir de borra de café, permitiendo alcanzar rendimientos de extracción mayores en comparación con el método convencional Soxhlet.

4.2.3 Análisis por espectroscopia FTIR-ATR del extracto de colorante obtenido a partir de borra de café

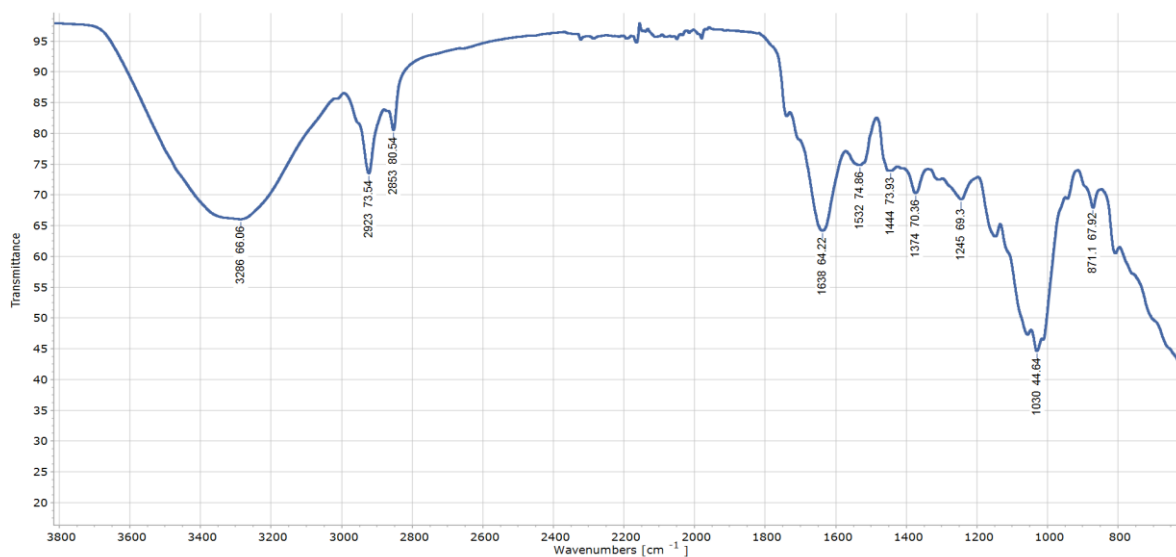
El análisis por Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier con Reflectancia Total Atenuada (FTIR-ATR) se realizó con el objetivo de identificar los principales grupos funcionales presentes en el extracto hidroalcohólico (etanol:agua 50:50) de color obtenido a partir de la borra de café, y correlacionarlos con los compuestos cromóforos responsables de la pigmentación del material. Las condiciones instrumentales empleadas abarcaron un rango

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

espectral de $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$, con una resolución de 4 cm^{-1} , 32 *scans*. Se obtuvieron tres espectros correspondientes a réplicas experimentales de la muestra analizada. El procesamiento de los datos espectrales se llevó a cabo utilizando el software *Spectragryph* (Menges Friedrich, 2022). Para garantizar la representatividad del análisis y optimizar la calidad de las señales, los espectros en bruto fueron sometidos a una corrección de línea base y a la eliminación de picos anómalos (*cosmic spikes*), para finalmente ser promediados matemáticamente. La comparación previa entre las réplicas evidenció una alta reproducibilidad espectral, indicando una notable estabilidad en los datos y uniformidad en la composición química del extracto. El espectro promedio resultante (Figura 6) fue utilizado para la identificación final de las bandas de absorción (Tabla 4).

Figura 6

Espectros FTIR-ATR del extracto obtenido de borra de café.



En la región de campo alto del espectro, se observa una banda ancha y de gran intensidad con un máximo de absorción en 3286 cm^{-1} . Esta señal corresponde a las vibraciones de estiramiento de los grupos hidroxilo (-OH), y su notable magnitud en este extracto se explica por

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

el uso de la mezcla solvente etanol: agua, la cual favorece una alta tasa de extracción de la matriz orgánica. Durante el proceso de tostión del grano, los ácidos fenólicos propios del café (como el ácido clorogénico, que posee múltiples grupos -OH en su estructura) se integran a la red polimérica de las melanoidinas (Bekedam et al., 2008). Al concentrar estas macromoléculas solubles en el extracto, se produce una acumulación masiva de grupos hidroxilo interactuando mediante puentes de hidrógeno, lo cual ensancha y amplifica la señal. Seguidamente, como parte integral de los compuestos co-extraídos por la fracción alcohólica, se identificaron señales agudas en 2923 cm^{-1} y 2853 cm^{-1} , atribuidas a las vibraciones de estiramiento asimétrico y simétrico de enlaces C-H alifáticos ($-\text{CH}_2$ y $-\text{CH}_3$), confirmando la presencia de fracciones lipídicas residuales solubilizadas.

Retomando la región media del espectro, el pico prominente en 1638 cm^{-1} constituye una zona de intenso solapamiento donde confluyen la flexión de los enlaces O-H (proveniente de la humedad residual) y las vibraciones de estiramiento de grupos carbonilo ($\text{C}=\text{O}$) y dobles enlaces ($\text{C}=\text{C}$) de anillos aromáticos conjugados (banda Amida I). Resulta de particular importancia para este estudio la aparición concurrente de la señal en 1532 cm^{-1} , característica de la banda Amida II, generada por la combinación vibracional de la flexión N-H y el estiramiento del enlace C-N. La presencia simultánea de las bandas Amida I y II constituye un marcador espectral robusto para evidenciar la formación y evolución estructural de las melanoidinas (Wang et al., 2023). Esta señal en 1532 cm^{-1} confirma inequívocamente la incorporación de grupos amino en las macromoléculas poliméricas nitrogenadas formadas mediante la reacción de Maillard, las cuales fungen como los principales agentes cromóforos del extracto (Mohsin et al., 2018).

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

Tabla 4

Asignación de bandas espectrales FTIR-ATR observadas en el extracto hidroalcohólico de colorante de borra de café.

Número de onda (cm ⁻¹)	Intensidad / Forma	Asignación Vibracional	Componente / Grupo Funcional	Referencia
3286	Ancha, fuerte	Estiramiento de enlaces O-H mediado por puentes de hidrógeno intermoleculares.	Compuestos fenólicos acoplados (ácidos clorogénicos), agua residual.	Bekedam et al., 2008; Coelho et al., 2014
2923	Aguda, media-débil	Estiramiento asimétrico C-H (de grupos -CH ₂ y -CH ₃).	Fracciones lipídicas solubilizadas, ceras extractables.	Ha et al., 2023
2853	Aguda, débil	Estiramiento simétrico C-H (de grupos -CH ₂ y -CH ₃).	Fracciones lipídicas solubilizadas.	Ha et al., 2023
1638	Pronunciada, media	Estiramiento C=O (Banda Amida I) y C=C aromático conjugado. Flexión O-H.	Melanoidinas, compuestos fenólicos oxidados, humedad residual.	Wang et al., 2023; Mohsin et al., 2018
1532	Definida, media-débil	Flexión N-H acoplada con estiramiento C-N (Banda Amida II).	Melanoidinas nitrogenadas (productos de Maillard).	Wang et al., 2023; Mohsin et al., 2018
1444	Débil	Deformación / flexión asimétrica de enlaces C-H.	Estructuras esqueléticas aromáticas y grupos metilo.	Patrignani & González-Forte, 2020
1374	Débil	Deformación / flexión simétrica en el plano de enlaces C-H.	Grupos alquilo (-CH ₃) solubles.	Patrignani & González-Forte, 2020
1245	Débil, hombro	Estiramiento C-O y vibración combinada C-N (Banda Amida III).	Compuestos fenólicos, polímeros de Maillard complejos.	Patrignani & González-Forte, 2020
1030	Muy fuerte, aguda	Estiramiento de enlaces C-O y C-O-C.	Carbohidratos solubles (azúcares, oligosacáridos) y fenoles coextraídos.	Ha et al., 2023

Finalmente, en la región de la huella dactilar, se observó la banda dominante del espectro en 1030 cm⁻¹, acompañada de señales de menor intensidad en 1245 cm⁻¹, 1374 cm⁻¹ y 1444 cm⁻¹. La pronunciada absorción en 1030 cm⁻¹ corresponde a las vibraciones de estiramiento de enlaces C-O y C-O-C. A diferencia del material lignocelulósico insoluble (celulosa y lignina estructural) que permanece en el residuo sólido, el extracto hidroalcohólico arrastra una alta concentración de carbohidratos solubles (azúcares simples y oligosacáridos) y compuestos fenólicos. Esta alta carga

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

de solutos solubilizados genera la absorción glucídica/fenólica masiva en 1030 cm^{-1} , la cual enmascara vibraciones de menor energía correspondientes a enlaces sencillos C-N adicionales, corroborando el carácter polimérico y la composición híbrida (carbohidrato-proteína-fenol) de la red cromófora extraída.

4.3 Pruebas de estabilidad cromática sobre la tela teñida

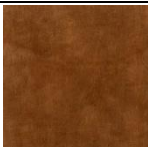
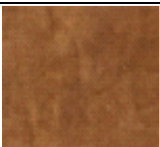
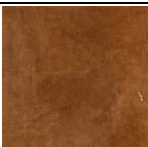
Con el fin de establecer una referencia para las pruebas de estabilidad, se determinaron las coordenadas colorimétricas iniciales CIELab de las telas teñidas bajo las diferentes condiciones experimentales (%p/p mordiente y %p/v colorante), estas constituyen la base para el cálculo de las variaciones cromáticas (ΔE) evaluadas posteriormente en las pruebas de lavado y frote. En la figura 7 se presentan las coordenadas CIELab de las telas teñidas con los diferentes tratamientos realizados. En general, los valores de luminosidad (L) oscilaron aproximadamente entre 72 y 79 unidades, indicando que todas las telas presentaron tonalidades relativamente claras (tonos beige). Donde los tratamientos D y H registraron los valores mayores de luminosidad (79 y 76 unidades), mientras que los tratamientos F e I mostraron valores inferiores con 73 unidades aproximadamente sugiriendo una coloración más intensa. Sin embargo, las diferencias observadas entre tratamientos fueron moderadas, lo que indica que las condiciones de teñido evaluadas generaron tonalidades visualmente similares. El análisis de varianza para la coordenada L^* , mostro que ni la concentración de mordiente ($p = 0,992$), ni la concentración de colorante ($p = 0,875$), ni la interacción entre ambos factores ($p = 0,984$) ejercieron un efecto estadísticamente significativo sobre la luminosidad de las telas teñidas. Estos resultados indican que las condiciones de teñido evaluadas produjeron valores de luminosidad comparables entre los tratamientos, lo cual coincide con la superposición observada en la figura 7. Kovačević et al. (2021) sugirieron que bajo

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

condiciones controladas de teñido con colorantes naturales (extracto floral), la luminosidad presento variaciones reducidas (0,46 - 12,6%) entre tratamientos cuando las concentraciones de mordiente se mantuvieron dentro del rango (3 - 5%), atribuyendo este comportamiento a una absorción uniforme del colorante por la fibra.

Tabla 5

Coordenadas iniciales de cada tela teñida CIELab (L^* , a^* , b^*).

Porcentaje Colorante (% p/V) (columnas)→	10%		20%		30%	
Porcentaje mordiente (% p/p) (filas)↓	Foto de la tela teñida húmeda	Codificación Lab tela seca	Foto de la tela teñida húmeda	Codificación Lab tela seca	Foto de la tela teñida húmeda	Codificación Lab tela seca
10 %		$L = 75,1 \pm 4,3$ $a = -3,7 \pm 0,6$ $b = 20,8 \pm 1,1$		$L = 75,4 \pm 7,6$ $a = -1,8 \pm 0,4$ $b = 20,3 \pm 1,1$		$L = 75,2 \pm 4,8$ $a = -2,3 \pm 1,8$ $b = 22,7 \pm 0,5$
15 %		$L = 78,9 \pm 12,4$ $a = -3,1 \pm 0,4$ $b = 18,6 \pm 2,8$		$L = 74,0 \pm 12,1$ $a = -1,3 \pm 0,4$ $b = 21,2 \pm 4,0$		$L = 72,6 \pm 0,6$ $a = -1,8 \pm 0,5$ $b = 22,7 \pm 2,5$
20 %		$L = 75,1 \pm 6,8$ $a = -2,7 \pm 0,6$ $b = 17,0 \pm 2,5$		$L = 75,8 \pm 7,5$ $a = -3,0 \pm 0,0$ $b = 19,3 \pm 0,4$		$L = 72,9 \pm 16,7$ $a = -1,6 \pm 0,5$ $b = 21,9 \pm 2,4$

Las coordenadas cromáticas (a) presentaron valores cercanos a cero e incluso ligeramente negativos, lo que evidencia una baja contribución de tonalidades rojizas y una ligera tendencia hacia matices verdosos. El análisis de varianza para la coordenada a^* , evidenció un efecto estadísticamente significativo de la concentración de colorante ($p = 0,029$), mientras que para el porcentaje de mordiente ($p = 0,4604$) y la interacción entre los factores ($p = 0,239$), no presentaron

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

diferencias significativas ($p > 0,05$). Lo que sugiere que la cantidad de colorante empleado influyó en el componente cromático rojo-verde (a^*) del tejido, mientras que las variaciones en las concentraciones del mordiente no modificaron de manera significativa este parámetro. Este resultado fue evidenciado por Vadood & Haji (2022), quienes observaron que la concentración del colorante natural produjo cambios en las coordenadas cromáticas de las telas teñidas, debido a su influencia sobre la cantidad de pigmento fijado en la fibra. Por otra parte, los valores positivos de el parámetro (b) en todos los tratamientos, comprendidos en aproximadamente 17 y 23 unidades, indican una predominancia de tonalidades amarillas/marrones. Este comportamiento coincide con la naturaleza química de los pigmentos presentes en la borra de café, los cuales suelen ser en mayor parte melanoidinas. Los resultados del proceso de teñido concuerdan con Hong (2018) quien encontró que las telas teñidas con la misma biomasa presentan valores positivos de b^* y valores de a^* cercanos a cero, los cuales están asociados a las tonalidades ya descritas para la borra. El análisis de varianza para la coordenada b^* indico que ninguno de los factores; porcentaje de mordiente ($p = 0,368$), porcentaje de colorante ($p = 0,058$) y la interacción entre ambos ($p = 0,812$) presento un efecto estadísticamente significativo sobre el componente amarillo-azul del color ($p > 0,05$). Aunque la concentración del colorante reflejo un valor cercano al nivel de significancia ($\alpha = 0,05$), lo que demuestra que las diferencias observadas entre tratamientos no fueron suficientes para atribuirlos a los factores evaluados. Según Jabar et al. (2020) cambios en el sistema de mordentado (con o sin) mantienen valores positivos en b^* para sustratos textiles (algodón) teñidos con colorantes naturales (*Bridelia ferruginea B*), los cuales generan cambios en la tonalidad amarillo-azul (14-28 unidades) lo cual indica que no produjeron una alteración en la coordenada cromática.

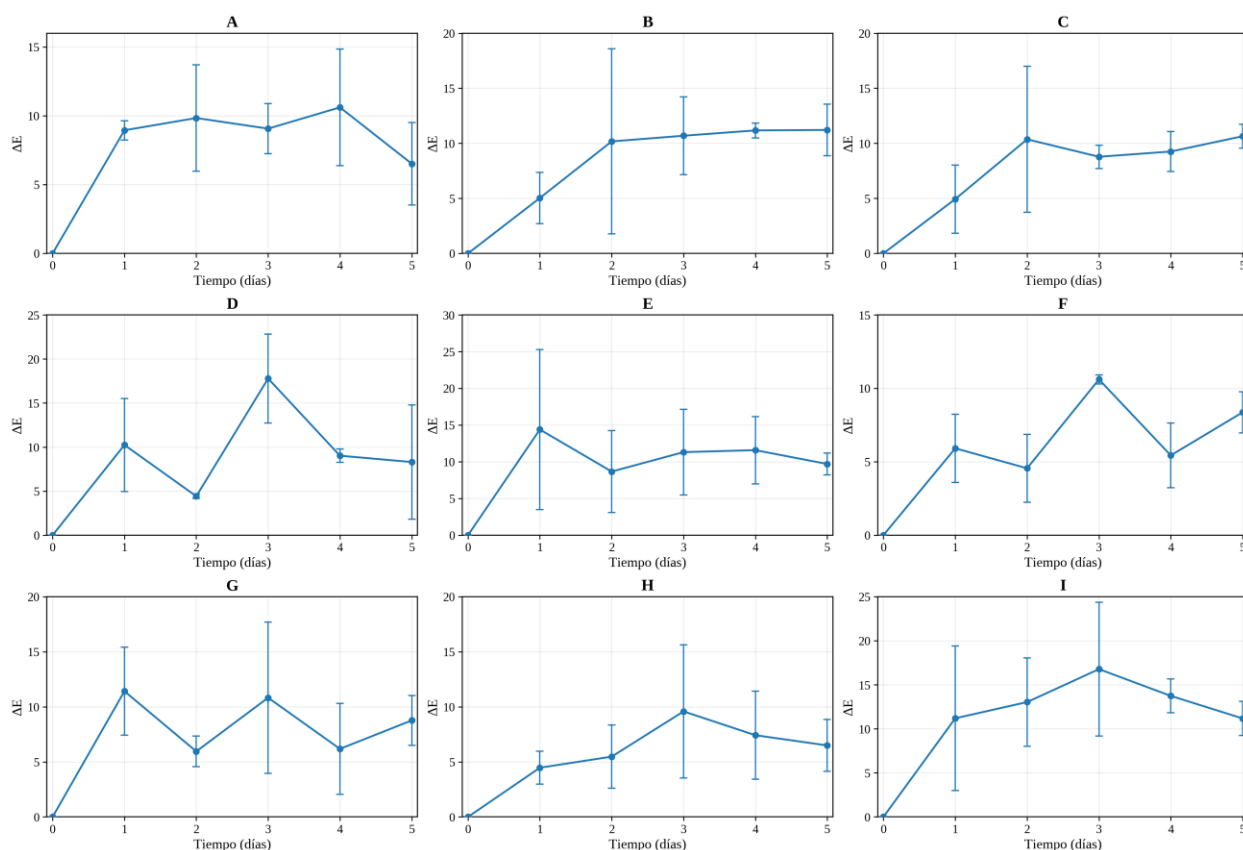
4.3.1 Prueba de lavado

A continuación, la figura 7 muestra la evolución del parámetro ΔE promedio para cada una de las nueve telas evaluadas, incluyendo sus respectivos duplicados. El seguimiento de este parámetro permite cuantificar los cambios cromáticos ocurridos tras las pruebas de lavado y evaluar la capacidad del colorante para mantener su fijación de color sobre las fibras textiles de origen natural. En la figura 7, se puede evidenciar un comportamiento similar en la mayoría de los tratamientos, caracterizado por un incremento inicial del parámetro ΔE durante los dos primeros días de evaluación, seguido de una tendencia de estabilización o fluctuaciones moderadas. Este comportamiento sugiere que la mayor variación cromática ocurrió en las primeras etapas del ensayo, debido a la remoción del colorante superficialmente adsorbido sobre la tela, mientras que los compuestos retenidos mediante interacción con el mordiente permanecieron fijados después de los ciclos posteriores de lavado. De manera general, los tratamientos E (tela 5 con 15% de mordiente y 20% de colorante) e I (tela 9 con 20% de mordiente y 30% de colorante) presentaron los mayores valores de ΔE , alcanzando variaciones superiores a 15 unidades, mientras que los tratamientos F (tela 6 con 15% de mordiente y 30% de colorante) y H (tela 8 con 20% de mordiente y 20% de colorante) registraron cambios cromáticos más moderados (10 unidades). Estos resultados indican que un incremento en la concentración del colorante y mordiente no necesariamente resulta en una mayor estabilidad cromática, ya que la fijación del color depende de la interacción química entre los compuestos presentes del extracto, el mordiente y la estructura de la fibra textil.

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

Figura 7

Comportamiento del parámetro ΔE durante la prueba de lavado para cada uno de los tratamientos.



El comportamiento observado coincide por lo reportado por Hong, (2018) quien encontró que las fibras de lana teñidas con colorante proveniente de la borra de café presentaron una mayor resistencia en presencia del mordiente, donde se adhirieron con mayor facilidad los compuestos fenólicos. De manera similar Nguyen et al, (2024) reportaron que la estabilidad del color en tejidos teñidos con los pigmentos de la borra dependía del sistema de mordentado y de la afinidad entre el colorante y la fibra. Por lo que la pérdida de color durante el lavado constituye uno de los principales desafíos de los colorantes naturales, debido a la limitada resistencia de los compuestos

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

fenólicos frente a la acción simultanea del agua, detergente y agitación mecánica. En conjunto, los resultados obtenidos en esta prueba de lavado siguen el comportamiento de fibras teñidas las cuales han sido reportadas previamente para colorantes naturales (Saeed et al., 2023).

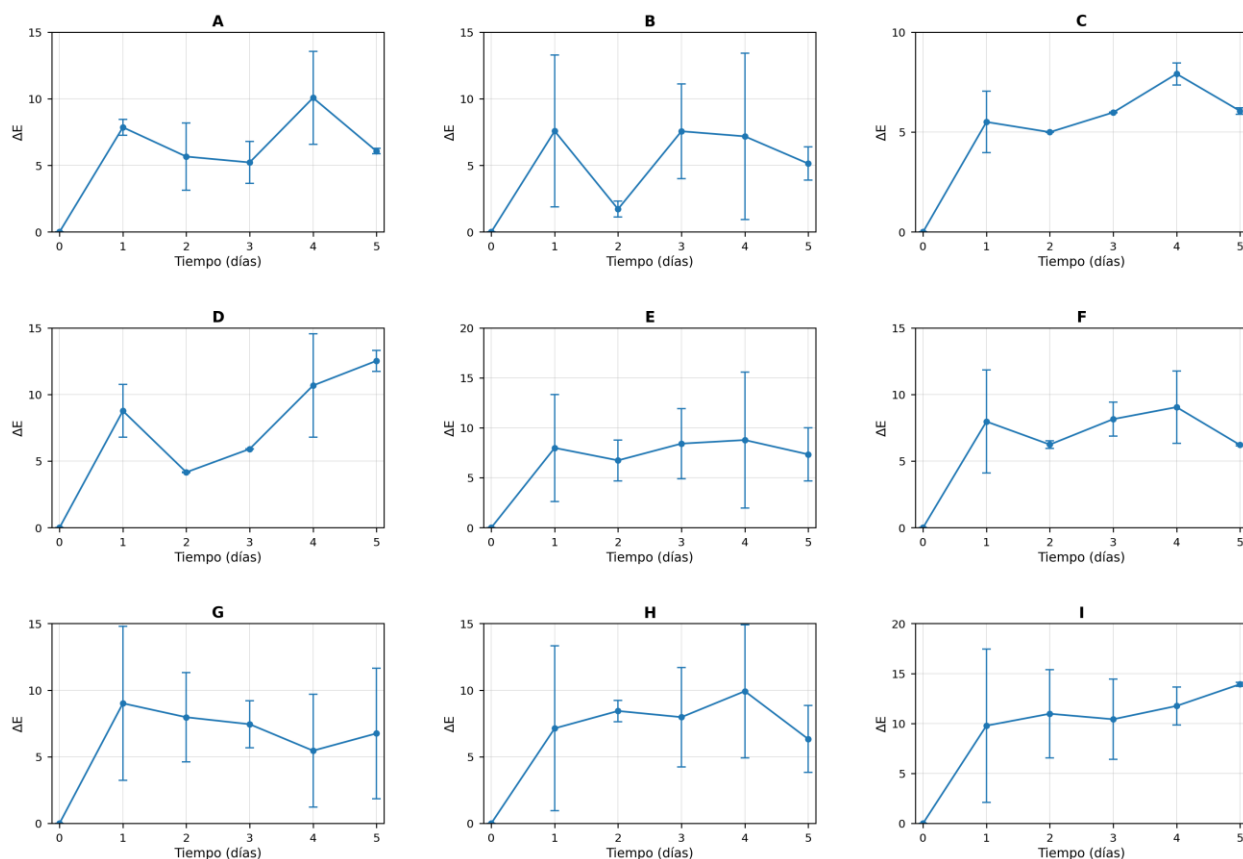
4.3.2 Prueba de frote en húmedo

A continuación, la figura 8 muestra la evolución del ΔE promedio para cada una de las nueve telas evaluadas, incluyendo sus respectivos duplicados. El seguimiento de este parámetro permite cuantificar los cambios cromáticos ocurridos tras las pruebas de frote en húmedo y permitió a su vez la evaluación de la capacidad del colorante para mantener sus características de color sobre las fibras textiles. En la figura 8, se muestra un comportamiento similar en la mayoría de los tratamientos, el cual esta caracterizado por un incremento inicial del parámetro ΔE durante el primer día de evaluación, seguido de una etapa de estabilización con fluctuaciones moderadas. Este comportamiento sugiere que los principales cambios cromáticos ocurrieron en las primeras etapas de la prueba, mientras que posteriormente el colorante permaneció estable sobre la superficie textil. De manera general, los tratamientos E, F, G y H presentaron una tendencia estable después del incremento inicial en la variación cromática, mientras que los tratamientos D & I mostraron un aumento progresivo de ΔE hacia el final del periodo de evaluación, donde se observan las mayores variaciones cromáticas.

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

Figura 8

Comportamiento del parámetro ΔE durante la prueba de frote en húmedo para cada uno de los tratamientos.



La ausencia de una relación directa entre el aumento de la concentración del colorante y el mordiente y la solidez del color al frote indica que la resistencia mecánica del teñido depende principalmente de las interacciones establecidas entre los compuestos (melanoidinas y polifenoles) presentes en la borra de café, el mordiente (alumbre) y la estructura de la fibra textil (algodón). Este comportamiento se refuerza debido a que Hong (2018) reportó, por ejemplo, que la estabilidad de color en tejidos teñidos con colorantes naturales esta influenciada por el sistema de mordentado

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

y la afinidad química presente entre el extracto y la fibra. A su vez, los resultados obtenidos se pueden comparar con lo reportado por Saeed et al. (2023) donde se indica que la solidez al frote esta influenciada principalmente por la naturaleza química del colorante, el tipo y concentración del mordiente y la capacidad de fijación en la tela, estos factores explican las diferencias observadas para cada tratamiento. Finalmente, se encontró de manera similar que la resistencia al frote mejora cuando existe una adecuada interacción entre el colorante y el sistema de mordentado, favoreciendo la retención del tinte frente a esfuerzos mecánicos (Guru Ramratan & Rani Jyoti, 2023). Por otra parte, Neaz et al. (2022) sugieren que la resistencia al frote suele presentar un comportamiento más estable que otras pruebas de resistencia de color debido a que el desprendimiento ocurre principalmente a nivel superficial.

4.3.3 Análisis estadístico de las pruebas de estabilidad sobre las telas teñidas con el colorante natural

El análisis de la variación cromática promedio (ΔE) obtenida en la prueba de lavado indico que el porcentaje en la concentración de mordiente ($p = 0,966$), porcentaje de concentración de colorante ($p = 0,92$) y la interacción entre ambos factores ($p = 0,087$) no ejercieron un efecto estadísticamente significativo sobre la estabilidad del color ($p > 0,05$). Estos resultados sugieren que, aunque las curvas de los tratamientos presentaron diferencias en la magnitud de ΔE , dichas variaciones se encuentran dentro de la variabilidad experimental y no pueden atribuirse de forma concluyente a las condiciones de teñido evaluadas. Estos resultados pueden ser respaldados por Jabar et al.(2021) donde para la prueba de lavado la concentración del mordiente no tuvo una variabilidad ya que se obtuvieron valores cercanos de valoración (entre 3-5) para los diferentes tratamientos realizados sobre tejidos de algodón.

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

Para la prueba de frote húmedo, el análisis de varianza mostro una tendencia similar a la prueba de lavado, donde el porcentaje para la concentración de mordiente ($p = 0,564$), concentración de colorante ($p = 0,892$) y la interacción entre ambos ($p = 0,898$) no presentaron efectos estadísticamente significativos sobre la variación cromática (ΔE) ($p > 0,05$). Esto indica que la resistencia al desprendimiento del color por acción mecánica (frote) fue comparable entre los tratamientos evaluados, a pesar de las diferencias visuales observadas en las curvas. Estos resultados son respaldados por Saeed et al., (2023) donde señalan que la resistencia al frote depende principalmente de la fijación superficial del colorante sobre la fibra textil y que variaciones en las concentraciones de mordiente y colorante no generan cambios en este tipo de ensayos.

5. Conclusiones

La extracción asistida por ultrasonido permitió obtener un mayor rendimiento de colorante a partir de la borra de café en comparación con métodos convencionales (Soxhlet), alcanzando su mejor desempeño bajo las condiciones de 30°C y una relación solido: solvente de 1:20, con un rendimiento de $24 \pm 0,007\%$. El análisis de varianza confirmó que este comportamiento estuvo determinado por la interacción entre las variables ya mencionadas ($p = 0,007$), mientras que los factores evaluados de manera independiente no presentaron un efecto significativo. Resultados que evidencian que la extracción asistida por ultrasonido constituye a una alternativa más eficiente para el aprovechamiento de este residuo agroindustrial como fuente de colorantes naturales.

La caracterización mediante espectroscopia FTIR-ATR confirmó que el extracto proveniente de la borra de café está constituido principalmente por compuestos fenólicos, melanoidinas, carbohidratos solubles y otros compuestos oxigenados. La identificación de las melanoidinas como principales agentes cromóforos del extracto junto con la presencia de compuestos fenólicos, evidencia que el proceso de extracción asistida por ultrasonido permitió recuperar los compuestos responsables de la coloración marrón y de la composición híbrida (carbohidrato-proteína-fenol) del extracto, respaldando su potencial como colorante natural para aplicaciones en la industria.

Los resultados de las pruebas de estabilidad demostraron que el extracto obtenido a partir de borra de café presentó capacidad para fijarse sobre tela tipo popelina, obteniéndose una mayor estabilidad cromática en las combinaciones de 15% de mordiente – 30% de colorante (tratamiento F) y 20% de mordiente - 20% de colorante (tratamiento H), mientras que las combinaciones 15% de mordiente – 20% de colorante (tratamiento E) y 20% de mordiente - 30% de colorante

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

(tratamiento I) presentaron mayores variaciones de color durante los ensayos. Estas diferencias indican que la estabilidad del color no depende únicamente del incremento en el porcentaje de las concentraciones de mordiente y colorante, sino de la afinidad química establecida entre las melanoidinas y compuestos fenólicos presentes en el extracto, el alumbre y la fibra de algodón. No obstante, el análisis de varianza evidenció que dichas variaciones no fueron estadísticamente significativas ($p > 0,05$), por lo que el comportamiento observado se atribuye a la variabilidad experimental en el proceso de teñido y las pruebas de estabilidad.

6. Recomendaciones

Se recomienda evaluar un rango más amplio de condiciones de extracción asistida por ultrasonido, incorporando variables como la amplitud ultrasónica, el tiempo de extracción, la frecuencia y la composición del sistema para el solvente, con el fin de maximizar la recuperación de compuestos cromóforos y mejorar el rendimiento del proceso.

A su vez, se recomienda ampliar el estudio del proceso de teñido mediante la evaluación de diferentes tipos de mordientes, fibras textiles y condiciones operacionales, como el pH, la temperatura y el tiempo de teñido, con el propósito de incrementar la fijación del colorante y mejorar la estabilidad cromática frente a ensayos de lavado y frote.

Finalmente, se recomienda evaluar propiedades adicionales del colorante obtenido, como su actividad antioxidante, estabilidad de almacenamiento y resistencia frente a la radiación UV, con el fin de ampliar el conocimiento sobre su desempeño y potencial aplicación en diferentes industrias.

Referencias bibliográficas

- Bejenari, V., Marcu, A., Ipate, A. M., Rusu, D., Tudorachi, N., Anghel, I., Șofran, I. E., & Lisa, G. (2021a). Physicochemical characterization and energy recovery of spent coffee grounds. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 4437–4451. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2021.10.064>
- Bejenari, V., Marcu, A., Ipate, A. M., Rusu, D., Tudorachi, N., Anghel, I., Șofran, I. E., & Lisa, G. (2021b). Physicochemical characterization and energy recovery of spent coffee grounds. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 4437–4451. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2021.10.064>
- Bekedam, E. K., Schols, H. A., Van Boekel, M. A. J. S., & Smit, G. (2008). Incorporation of Chlorogenic Acids in Coffee Brew Melanoidins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(6), 2055–2063. <https://doi.org/10.1021/JF073157K>
- Botteri, L., Miljković, A., & Glogar, M. I. (2022). Influence of Cotton Pre-Treatment on Dyeing with Onion and Pomegranate Peel Extracts. *Molecules* 2022, Vol. 27, Page 4547, 27(14), 4547. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES27144547>
- Campos-Vega, R., Loarca-Piña, G., Vergara-Castañeda, H. A., & Dave Oomah, B. (2015). Spent coffee grounds: A review on current research and future prospects. *Trends in Food Science & Technology*, 45(1), 24–36. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2015.04.012>
- Carreño, S. (2022). *Análisis del proceso de producción de biodiesel a partir de la borra de café*. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/8819>
- Cevallos, J., & Guerrero, J. (2017). *Extracción y caracterización de colorante natural a partir de la borra de café*.
- Chemat, F., Rombaut, N., Sicaire, A. G., Meullemiestre, A., Fabiano-Tixier, A. S., & Abert-Vian, M. (2017a). Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 540–560. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2016.06.035>
- Chemat, F., Rombaut, N., Sicaire, A. G., Meullemiestre, A., Fabiano-Tixier, A. S., & Abert-Vian, M. (2017b). Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 540–560. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2016.06.035>
- Chemat, F., Rombaut, N., Sicaire, A. G., Meullemiestre, A., Fabiano-Tixier, A. S., & Abert-Vian, M. (2017c). Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 540–560. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2016.06.035>

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

- Coelho, C., Ribeiro, M., Cruz, A. C. S., Domingues, M. R. M., Coimbra, M. A., Bunzel, M., & Nunes, F. M. (2014). Nature of Phenolic Compounds in Coffee Melanoidins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(31), 7843–7853. <https://doi.org/10.1021/JF501510D>
- Darmawan, A., Widowati, Riyadi, A., Muhtar, H., Kartono, & Adhy, S. (2024). Enhancing cotton fabric dyeing: Optimizing Mordanting with natural dyes and citric acid. *International Journal of Biological Macromolecules*, 276, 134017. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2024.134017>
- Guru Ramratan, & Rani Jyoti. (2023, May). *Rubbing Fastness of Silk Fabric Treated with Azadirachta Indica Leaves Using Potassium Aluminium Sulfate and Citrus Limon Extract*. https://www.researchgate.net/publication/371011249_Rubbing_Fastness_of_Silk_Fabric_Treated_with_Azadirachta_Indica_Leaves_Using_Potassium_Aluminium_Sulfate_and_Citrus_Limon_Extract
- Ha, G. S., Song, H. S., Oh, D. H., Mba-Wright, M., Ha, J. M., Yoo, C. J., Choi, J. W., Kim, C. S., Jeon, B. H., Jeong, H., & Kim, K. H. (2023). Efficient chemo-catalytic transformation of spent coffee grounds into lactic acid using erbium triflate. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(5), 110682. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2023.110682>
- Hong, K. H. (2018). Effects of tannin mordanting on coloring and functionalities of wool fabrics dyed with spent coffee grounds. *Fashion and Textiles 2018 5:1*, 5(1), 33-. <https://doi.org/10.1186/S40691-018-0151-3>
- Jabar, J. M., Adedayo, T. E., & Odusote, Y. A. (2021). Green, eco-friendly and sustainable alternative in dyeing cotton fabric using aqueous extract Mucuna slonaei F dye: effects of metal salts pre-mordanting on color strength and fastness properties. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 4, 100151. <https://doi.org/10.1016/J.CRGSC.2021.100151>
- Jabar, J. M., Ogunmokun, A. I., & Taleat, T. A. A. (2020). Color and fastness properties of mordanted Bridelia ferruginea B dyed cellulosic fabric. *Fashion and Textiles 2020 7:1*, 7(1), 1-. <https://doi.org/10.1186/S40691-019-0195-Z>
- Jácome, C., Aucatoma, K., Agualongo, S., Callan, C., & Montero, V. (2023). Biotecnología para la extracción de pigmentos vegetales, para uso industrial. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 4(1), 1475–1488–1475–1488. <https://doi.org/10.56712/LATAM.V4I1.353>
- Khalil, S., Laaraj, S., Firdous, N., Farooq, U., Bouhrim, M., Herqash, R. N., Shahat, A. A., Hussain, A., Mouhaddach, A., Eto, B., Batool, A., Bibi, B., Ayesha, A., Arshad, F., & Elfazazi, K. (2025). Extraction and Analysis of Natural Color From Beetroot (Beta vulgaris L.) Using Different Techniques, and Its Utilization in Ice Cream Manufacturing. *Food Science & Nutrition*, 13(4), e70167. <https://doi.org/10.1002/FSN3.70167>

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

- Kovačević, Z., Sutlović, A., Matin, A., & Bischof, S. (2021). Natural Dyeing of Cellulose and Protein Fibers with the Flower Extract of *Spartium junceum* L. *Plant. Materials* 2021, Vol. 14, Page 4091, 14(15), 4091. <https://doi.org/10.3390/MA14154091>
- Kovalcik, A., Obruca, S., & Marova, I. (2018). Valorization of spent coffee grounds: A review. *Food and Bioproducts Processing*, 110, 104–119. <https://doi.org/10.1016/J.FBP.2018.05.002>
- Laura Flórez. (2025). *Producción de café en Colombia rompe récord histórico: el mejor resultado en más de tres décadas.*
<https://www.vanguardia.com/economia/nacional/2025/10/07/produccion-de-cafe-en-colombia-rompe-record-historico-el-mejor-resultado-en-mas-de-tres-decadas/>
- Limón, R., López, V., Aguilar, F., & Hernández, I. (2020). *Evaluación del potencial bioenergético de la borra de café* (Vol. 5, Number 1).
- Lombardi, E., Costa, S., Galli, C., & Mancini, C. (2025). *Mordanting strategies and colour fastness evaluation of natural dyes on cotton textiles*. 7(7), 165–167.
<https://doi.org/10.33545/26646781.2025.v7.i7c.542>
- Martínez-Ramos, T., Benedito-Fort, J., Watson, N. J., Ruiz-López, I. I., Che-Galicia, G., & Corona-Jiménez, E. (2020). Effect of solvent composition and its interaction with ultrasonic energy on the ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from Mango peels (*Mangifera indica* L.). *Food and Bioproducts Processing*, 122, 41–54.
<https://doi.org/10.1016/J.FBP.2020.03.011>
- Menges Friedrich. (2022). *Spectragryph - optical spectroscopy software.*
<https://www.effemm2.de/spectragryph/>
- Mercado Prado, G. S. (2022). “*Hacia los 100 años de la ESPM*” – ESPM.
<https://espm.mx/relevante/2do-conversatorio-espm-100anios/>
- Mohsin, G., Schmitt, F., Kanzler, C., Dirk Epping, J., Flemig, S., & Hornemann, A. (2018). Structural characterization of melanoidin formed from d-glucose and l-alanine at different temperatures applying ftir, nmr, epr, and maldi-tof-ms. *Food Chemistry*, 245, 761–767.
<https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2017.11.115>
- Mongkhlorattanasit, R., Nakpathom, M., & Vuthiganond, N. (2021). Eco-dyeing with biocolorant from spent coffee ground on low molecular weight chitosan crosslinked cotton. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2021.100389>
- Morshed Neaz, Ahmed Zakaria, Alam Ashraful, Talukder Pulak, & Rahman Taslima. (2022). *ENVIRONMENTAL SCIENCE ARCHIVES OPEN ACCESS Application and Fastness Analysis of Natural Dyes on Cotton Knitted Fabric.*
https://www.researchgate.net/publication/361534080_ENVIRONMENTAL_SCIENCE_ARCHIVES_OPEN_ACCESS_Application_and_Fastness_Analysis_of_Natural_Dyes_on_Cotton_Knitted_Fabric

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

- Narváez, M., & Villota, L. (2018). *Caracterización fisicoquímica de la borra de café proveniente de la hacienda supracafé en el municipio de Cajibío, departamento del cauca*.
- Nguyen, T. A., Thi Hong, D. N., Nguyen Thi, T., & Tran Dang, K. (2024). Evaluation on dyeable, antibacterial and antioxidant properties of cotton fabric dyed with spent coffee grounds. *The Journal of The Textile Institute*, 115(10), 1784–1791. <https://doi.org/10.1080/00405000.2023.2265620>
- Novoa Lucía, & Ruíz Lyda. (2021). *Los residuos agroindustriales como una potencial fuente de colorantes y pigmentos vegetales para aplicaciones en la industria*. Universidad Industrial de Santander. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/42198>
- Patrignani, M., & González-Forte, L. del S. (2020). Characterisation of melanoidins derived from Brewers' spent grain: new insights into their structure and antioxidant activity. *International Journal of Food Science and Technology*, 56(1), 384–391. <https://doi.org/10.1111/IJFS.14653>
- Peng, B., Zhou, J., Xu, J., Fan, M., Ma, Y., Zhou, M., Li, T., & Zhao, S. (2019). A smartphone-based colorimetry after dispersive liquid–liquid microextraction for rapid quantification of calcium in water and food samples. *Microchemical Journal*, 149, 104072. <https://doi.org/10.1016/J.MICROC.2019.104072>
- Pizzicato, B., Pacifico, S., Cayuela, D., Mijas, G., & Riba-Moliner, M. (2023a). Advancements in Sustainable Natural Dyes for Textile Applications: A Review. In *Molecules* (Vol. 28, Number 16). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/molecules28165954>
- Pizzicato, B., Pacifico, S., Cayuela, D., Mijas, G., & Riba-Moliner, M. (2023b). Advancements in Sustainable Natural Dyes for Textile Applications: A Review. *Molecules* 2023, Vol. 28, Page 5954, 28(16), 5954. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES28165954>
- Pranta, A. D., & Rahaman, M. T. (2024). Extraction of eco-friendly natural dyes and biomordants for textile coloration: A critical review. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 39, 101243. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2024.101243>
- Puertas, M., Villegas, P., & Rojano, B. (2013). *Borra de café colombiano (Coffea arabica) como fuente potencial de sustancias con capacidad antirradicales libres in vitro*.
- Ramírez Navas, J. S. (2021). *Métodos de extracción de ingredientes naturales de origen vegetal*. <http://revistareciteia.es.tl/>
- Rodríguez Valencia, N., & Zambrano, D. (2010). *Los subproductos del café: fuente de energía renovable*. <https://doi.org/10.38141/10779/0393>
- Saeed, A., Hassan, K., & Sadaf, S. S. (2023). A Review on Colour Fastness of Natural Dyed Textiles: Review on Fastness Colours in Textiles. *Pakistan Journal of Scientific &*

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

Industrial Research Series A: Physical Sciences, 66(2), 201–212.
<https://doi.org/10.52763/PJSIR.PHYS.SCI.66.2.2023.201.212>

Salinas, C. M. (2018). *Teñido de textiles de algodón con tinte vegetal de cúrcuma*.

Santiago, D., Cunha, J., & Cabral, I. (2023). Chromatic and medicinal properties of six natural textile dyes: A review of eucalyptus, weld, madder, annatto, indigo and woad. *Heliyon*, 9(11), e22013. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2023.E22013>

Shokrzadeh, S., Razbin, M., Ghaheh, F. S., Tehrani, M., & Sadrjahani, M. (2025). Optimizing the eco-friendly dyeing of wool and nylon fabrics with *Prangos ferulacea* (L.) Lindl using artificial intelligence. *Scientific Reports* 2025 15:1, 15(1), 13267-.
<https://doi.org/10.1038/s41598-025-97551-w>

Sluiter, A., Hames, B., Hyman, D., Payne, C., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., Templeton, D., & Wolfe, J. (2008). *Determination of Total Solids in Biomass and Total Dissolved Solids in Liquid Process Samples Laboratory Analytical Procedure (LAP) Issue Date: 3/31/2008*.
www.nrel.gov

Uddin, M. A., Rahman, M. M., Haque, A. N. M. A., Smriti, S. A., Datta, E., Farzana, N., Chowdhury, S., Haider, J., & Muhammad Sayem, A. S. (2022). Textile colouration with natural colourants. *Journal of Cleaner Production*, 349, 131489.
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.131489>

Vadood, M., & Haji, A. (2022). Application of ANN Weighted by Optimization Algorithms to Predict the Color Coordinates of Cellulosic Fabric in Dyeing with Binary Mix of Natural Dyes. *Coatings* 2022, Vol. 12, Page 1519, 12(10), 1519.
<https://doi.org/10.3390/COATINGS12101519>

Vinatoru, M., Mason, T. J., & Calinescu, I. (2017). Ultrasonically assisted extraction (UAE) and microwave assisted extraction (MAE) of functional compounds from plant materials. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 97, 159–178. <https://doi.org/10.1016/J.TRAC.2017.09.002>

Wang, B. ;, Zhong, Y. ;, Wang, D. ;, Meng, F. ;, Li, Y. ;, Deng, Y., Wang, B., Zhong, Y., Wang, D., Meng, F., Li, Y., & Deng, Y. (2023). Formation, Evolution, and Antioxidant Activity of Melanoidins in Black Garlic under Different Storage Conditions. *Foods* 2023, Vol. 12, Page 3727, 12(20), 3727. <https://doi.org/10.3390/FOODS12203727>

Wen, C., Zhang, J., Zhang, H., Dzah, C. S., Zandile, M., Duan, Y., Ma, H., & Luo, X. (2018). Advances in ultrasound assisted extraction of bioactive compounds from cash crops – A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 48, 538–549.
<https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2018.07.018>

Zapata Vargas, J. (2015). *Caracterización de residuos generados en procesos productivos de la agroindustria del café*.

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

Apéndices

Apéndice A. Distribución granulométrica de la borra de café.

Tamiz (#)	Abertura (μm)	Masa retenida (g)	Ri (%)	Racum (%)	P (%)
18	1000	0,01	0,03	0,03	99,9
20	850	0,00	0,02	0,05	99,9
30	600	2,70	5,90	6,00	93,9
40	425	19,9	44,1	50,2	49,8
50	300	10,8	23,9	74,1	25,9
60	250	6,53	14,5	88,6	11,4
70	212	4,70	10,6	99,2	0,80
80	180	0,30	0,67	99,8	0,13
Fondo	<180	0,06	0,13	100	

Apéndice B. Matriz experimental y rendimiento de extracción obtenido mediante ultrasonido.

Temperatura(°C)	Rendimiento expresado como masa de extracto de colorante (%)		
	R1 (1:20)	R2 (1:30)	R3 (1:40)
T1 (30)	23	21	15
	24	21	15
	25	24	12
T2 (40)	21	17	22
	23	22	26
	21	24	19
T3 (50)	21	20	26
	24	23	25
	24	12	20

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

Apéndice C. *Análisis de varianza de las variables temperatura y relación sólido: solvente sobre el rendimiento de extracción ultrasónica.*

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Temperatura	0,002	2	0,0009	1,043	0,373	3,555
Relación S:S	0,004	2	0,0020	2,347	0,124	3,555
Interacción T Y R	0,017	4	0,0042	5,043	0,007	2,928
Dentro del grupo	0,015	18	0,0008			
Total	0,038	26				

Apéndice D. *Análisis de varianza de los porcentajes de concentración de mordiente y concentración de colorante sobre la coordenada L* del CIELab (L*, a*, b*) para las telas teñidas antes de las pruebas.*

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
% Mordiente	1,26	2	0,633	0,007	0,992	4,256
% Colorante	23,2	2	11,6	0,134	0,875	4,256
Interacción	29,7	4	7,43	0,085	0,984	3,633
Dentro del grupo	779	9	86,6			
Total	833	17				

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

Apéndice E. *Análisis de varianza de los porcentajes de concentración de mordiente y concentración de colorante sobre la coordenada a^* del CIELab (L^* , a^* , b^*) para las telas teñidas antes de las pruebas.*

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
% Mordiente	0,908	2	0,454	0,847	0,460	4,26
% Colorante	5,78	2	2,89	5,39	0,029	4,26
Interacción	3,59	4	0,897	1,67	0,239	3,63
Dentro del grupo	4,83	9	0,536			
Total	15,1	17				

Apéndice F. *Análisis de varianza de los porcentajes de concentración de mordiente y concentración de colorante sobre la coordenada b^* del CIELab (L^* , a^* , b^*) para las telas teñidas antes de las pruebas.*

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
% Mordiente	11,3	2	5,65	1,12	0,368	4,26
% Colorante	40,1	2	20,1	3,97	0,058	4,26
Interacción	7,85	4	1,96	0,388	0,812	3,63
Dentro del grupo	45,5	9	5,05			
Total	105	17				

EXTRACCIÓN ULTRASÓNICA
DE TINTA DE BORRA DE CAFÉ

Apéndice G. *Análisis de varianza de los porcentajes de concentración de mordiente y concentración de colorante sobre la variación cromática (ΔE) de las pruebas de lavado.*

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
% Mordiente	0,374	2	0,187	0,034	0,966	4,26
% Colorante	0,916	2	0,458	0,084	0,920	4,26
Interacción	62,7	4	15,7	2,88	0,087	3,63
Dentro del grupo	49,1	9	5,45			
Total	113	17				

Apéndice H. *Análisis de varianza de los porcentajes de concentración de mordiente y concentración de colorante sobre la variación cromática (ΔE) de las pruebas de frote húmedo.*

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Muestra	20,5	2	10,2	0,611	0,564	4,26
Columnas	3,88	2	1,94	0,116	0,892	4,26
Interacción	17,3	4	4,30	0,260	0,898	3,63
Dentro del grupo	151	9	16,8			
Total	192	17				