



**UNIVERSIDAD
DEL AZUAY**

**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

“Optimización del proceso de teñido de la paja toquilla”

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:
INGENIERA AMBIENTAL**

Autora:

Samira Valentina Carmona Ullauri

Director:

Bolívar Andrés Pérez González

CUENCA, ECUADOR

2025

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, por haberme sostenido con su amor infinito en cada paso de esta travesía. A mis padres, por ser mi inspiración, mi fortaleza y el mayor ejemplo de amor y entrega. A mi hermana, por estar siempre a mi lado, con una sonrisa, un consejo o un abrazo en el momento justo. Este logro es para ustedes, porque sin su amor, nada de esto habría sido posible.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradezco a Dios, fuente inagotable de fortaleza, luz y sabiduría. Gracias por haberme acompañado en cada paso de este camino, por darme salud cuando el cansancio me vencía, por sostenerme cuando sentía que no podía más, y por iluminar mi mente cuando las ideas no fluían. Su presencia constante me dio paz y esperanza incluso en los momentos más inciertos. Este logro, sin duda, es testimonio de Su amor y fidelidad.

A mis padres, mi mayor ejemplo de esfuerzo, amor y perseverancia. Gracias por su apoyo incondicional, por trabajar incansablemente para que yo pudiera alcanzar mis sueños, y por enseñarme con el ejemplo que todo se puede lograr con disciplina, fe y dedicación. Su confianza en mí ha sido mi motor, y cada palabra de aliento me dio la fuerza para continuar. Esta meta alcanzada es tanto mía como suya.

A mi hermana, confidente y compañera en todo momento.

Gracias por tu amor inmenso, por tus palabras de motivación cuando más las necesitaba y por estar siempre a mi lado, celebrando mis logros y levantándome en mis caídas. Tu compañía ha sido un regalo invaluable en esta etapa de mi vida. A todos los docentes especialmente a mi tutor el Ingeniero Andrés Pérez y la Ingeniera Johanna Ochoa que me aportaron con sus ideas, sugerencias o simplemente con su presencia, mi más sincero agradecimiento.

Finalmente, gracias a todas las personas que creyeron en mí, incluso cuando yo misma dudaba. Cada palabra de ánimo, cada gesto de apoyo y cada muestra de fe me acercaron a esta meta.

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE TEÑIDO DE LA PAJA TOQUILLA

El presente trabajo tuvo como objetivo reducir el impacto ambiental del teñido artesanal del sombrero de paja toquilla, optimizando el uso de colorantes sintéticos sin afectar la calidad visual del producto. Los objetivos específicos incluyeron: determinar la concentración óptima de colorantes, evaluar un teñido con mezclas mediante un diseño experimental, analizar parámetros de calidad del agua residual (DQO, pH y conductividad eléctrica) y documentar el proceso optimizado.

El proceso experimental incluyó el descruce de la fibra, la preparación de soluciones de colorantes, un diseño factorial de dos niveles para determinar concentraciones mínimas efectivas de teñido, y ensayos empíricos a partir de una solución madre de 2000 ppm. El diseño experimental de mezclas no logró generar una tonalidad roja adecuada, lo que llevó a descartar esta metodología. Los análisis visuales y estadísticos demostraron que es posible reducir el uso de colorante hasta 70 ppm sin afectar perceptiblemente la calidad del teñido.

Los análisis fisicoquímicos del efluente evidenciaron una mejora en la calidad del agua residual al reducir la concentración de colorantes. En conclusión, fue posible optimizar el proceso de teñido, logrando una reducción significativa del uso de colorantes sin comprometer el acabado del producto ni su color final.

Palabras clave: Teñido, colorantes sintéticos, diseño experimental, pH, DQO, conductividad eléctrica

OPTIMIZATION OF THE TOQUILLA STRAW DYEING PROCESS

This study aimed to reduce the environmental impact of the artisanal dyeing process of the toquilla straw hat by optimizing the use of synthetic dyes without compromising the visual quality of the final product. The specific objectives included: determining the optimal dye concentration, evaluating a dyeing process using mixtures through an experimental design, analyzing wastewater quality parameters (COD, pH, and electrical conductivity), and documenting the optimized process. The experimental procedure involved scouring the fiber, preparing dye solutions, a two-level factorial design to determine the minimum effective dyeing concentrations, and empirical trials based on a 2000 ppm stock solution. The mixture design approach did not produce an adequate red hue, leading to the dismissal of that methodology. Visual and statistical analyses demonstrated that it is possible to reduce dye concentration to 70 ppm without perceptibly affecting the dyeing quality. Physicochemical analyses of the effluent revealed an improvement in wastewater quality due to the reduced dye concentration. In conclusion, the dyeing process was successfully optimized, achieving a significant reduction in dye use without compromising the product's finish or final color.

Keywords: Dyeing, Synthetic dyes, Experimental design, pH, COD, electrical conductivity

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Dedicatoria	i
Agradecimientos	ii
Resumen	iii
Abstract	iv
Índice de Contenidos	v
Índice de Figuras	vi
Índice de Tablas	vii
I Introducción	1
II Metodología	2
II-A Procedimiento Experimental	3
III Resultados	6
IV Conclusiones	8
V Recomendaciones	9
VI Anexos	9
VII Bibliografía	11
Referencia	11

ÍNDICE DE FIGURAS

1	Descrude de la paja toquilla	9
2	Soluciones de colorantes	9
3	Diseño Experimental factorial de dos niveles	10
4	Diseño experimental factorial para determinar las concentraciones mínimas de teñido	10
5	Diferencias en el teñido con mezclas de colorantes con apariencia similar	10
6	Diseño Experimental de Mezclas	10
7	Definición visual de referencia de tonalidad	10
8	Optimización Lineal	10
9	Evaluación Visual de la Reducción del Colorante	10
10	Fotómetro	11
11	Termoreactor	11
12	Material Informativo	11

ÍNDICE DE TABLAS

I	Diseño Experimental factorial de dos niveles	4
II	Diseño Experimental de Mezclas	4
III	Resultados del análisis de pH y conductividad eléctrica del efluente con colorante rojo a 70 ppm	8
IV	Resultados de la DQO	8

Optimización del proceso de teñido de la paja toquilla

Samira Carmona
Escuela de Ingeniería Ambiental
Universidad del Azuay
Cuenca, Ecuador
carmona.samira@es.uazuay.edu.ec

Resumen—

El presente trabajo tuvo como objetivo reducir el impacto ambiental del teñido artesanal del sombrero de paja toquilla, optimizando el uso de colorantes sintéticos sin afectar la calidad visual del producto. Los objetivos específicos incluyeron: determinar la concentración óptima de colorantes, evaluar un teñido con mezclas mediante un diseño experimental, analizar parámetros de calidad del agua residual (DQO, pH y conductividad eléctrica) y documentar el proceso optimizado.

El proceso experimental incluyó el descruce de la fibra, la preparación de soluciones de colorantes, un diseño factorial de dos niveles para determinar concentraciones mínimas efectivas de teñido, y ensayos empíricos a partir de una solución madre de 2000 ppm. El diseño experimental de mezclas no logró generar una tonalidad roja adecuada, lo que llevó a descartar esta metodología. Los análisis visuales y estadísticos demostraron que es posible reducir el uso de colorante hasta 70 ppm sin afectar perceptiblemente la calidad del teñido.

Los análisis fisicoquímicos del efluente evidenciaron una mejora en la calidad del agua residual al reducir la concentración de colorantes. En conclusión, fue posible optimizar el proceso de teñido, logrando una reducción significativa del uso de colorantes sin comprometer el acabado del producto ni su color final.

*Palabras clave—*Teñido, colorantes sintéticos, diseño experimental, pH, DQO, conductividad eléctrica.

I. INTRODUCCIÓN

La industria textil en Ecuador ha experimentado un crecimiento notable, las micro empresas y empresas medianas influyen mucho en la economía del país, generando empleo. El sombrero de paja toquilla es reconocido a nivel mundial, siendo un símbolo emblemático de la cultura ecuatoriana. La fabricación del sombrero de paja toquilla ha experimentado a lo largo de los años un crecimiento significativo, se considera como una de las más grandes artesanías en Ecuador (Pacheco, 2024).

Tiene un alto valor cultural, y es representada como una tradición ancestral que se ha mantenido durante varios años, incluso es reconocido por la UNESCO como Patrimonio Cultural Inmaterial de la Humanidad (Holguin & Jossue, 2024). Épocas atrás, en la fabricación de sombreros de paja toquilla, usaban en su principio tintes naturales para su decoración, estos provenientes de plantas, vegetales, frutas, entre otros (Echeverría-Paredes, 2023). Estos colorantes se usaron por varios años, pero con el tiempo se daban cuenta que carecían de características como: la solidez del color, la gama de colores no era muy variada y la intensidad del color era baja. Con el pasar de tiempo en 1856 se crearon los colorantes sintéticos. Estos son compuestos químicos derivados del petróleo, utilizados en varias industrias, siendo estos más duraderos, con una alta variedad de colores vibrantes fáciles de obtener. A pesar de su eficiencia, su impacto ambiental es considerado alto, ya que gran parte de sus residuos generados pueden ser tóxicos en el ambiente, más aún cuando no hay un correcto manejo de las aguas residuales (Fobiri, 2022). Las industrias textiles, generan una alta cantidad de contaminantes, ya que la mayor parte de los colorantes sintéticos que usan para el teñido se descargan al río o a cualquier cuerpo de agua, en la mayoría sin un correcto tratamiento o en algunos casos sin ningún tratamiento (Fobiri, 2022). Esto a generado que las descargas de esas aguas residuales causen efectos

secundarios, provocando así una contaminación a los cuerpos de agua. El agua es un factor importante a considerar, ya que en estos casos la contaminación se genera directamente en el agua y luego se extiende a diferentes entornos provocando efectos negativos (Fobiri, 2022). La descarga de las aguas residuales después del proceso de teñido contiene concentraciones de varios contaminantes, lo que puede provocar problemas que pueden manifestarse a corto, mediano o largo plazo, como se evidencia a través de parámetros como el pH, la conductividad eléctrica y la demanda química de oxígeno (DQO) (Slama et al., 2021). El 20% del agua contaminada en el mundo es gracias a la industria textil, ya que las aguas residuales que se generan contienen altos niveles de toxicidad, dado que los colorantes no son biodegradables (Moreno, 2023). Los colorantes presentes en el agua residual producida después de un proceso de teñido, generan daños e impactos graves a la salud de los seres humanos, afectando a órganos vitales como el cerebro, riñones, corazón y sistemas del organismo humano. Las enfermedades pueden desencadenarse al momento de que se ingiere alimentos, o se tiene contacto directo con el agua (Slama et al., 2021). A pesar de todos los avances en cuanto a la tecnología, pocos estudios se enfatizan en la optimización del proceso de teñido de sombreros de paja toquilla, aunque hay estudios en los que se basan en poder tratar esas aguas residuales, o como fomentar una sostenibilidad. Varios estudios se centran en reducir la contaminación, aplicando tecnologías aptas de tratamiento, una de ellas es mediante procesos de oxidación avanzada, que es básicamente implementar diferentes técnicas para eliminar contaminantes. Este proceso ha sido implementado en diferentes países, Ecuador es uno de ellos, en donde se usó para tratar efluentes de industrias textiles en donde se removió colorantes de

anilina que se usaba para el proceso de teñido, y en más países como España, Brasil y México (Castro-Peña & Durán-Herrera, 2014) (Echeverría-Paredes, 2023). Existen otros métodos como es la adsorción, filtración, que también sirven para la remoción o disminución de contaminantes en las aguas residuales, estos métodos de tratamiento se han aplicado en diferentes lugares como India, Bangladesh, etc. A pesar de todos estos métodos de tratamiento, se requiere una investigación más exhaustiva sobre como optimizar el uso de los colorantes sintéticos en Ecuador para la elaboración de sombreros de paja toquilla (Slama et al., 2021).

Por estos motivos, se propone optimizar el uso de colorantes sintéticos en la producción artesanal de sombreros de paja toquilla. Esta actividad representa una de las artesanías más emblemáticas del Ecuador, por lo que dejar de producir no es una opción viable; en su lugar, se busca mejorar y hacer más sostenible el proceso. Se pretende lograr que se pueda reducir la cantidad de tinte que se necesita para el proceso del teñido y así poder disminuir la contaminación directa o indirecta que se genera en los cuerpos de agua. A su vez lograr disminuir los costos de elaboración y producción, ya que, se reducen las cantidades de los insumos que se van a utilizar y se logra beneficiar a los artesanos. Además, que se tenga concientización ambiental, es decir adoptar prácticas más sostenibles logrando que esta artesanía se considere más sostenible sin alterar la calidad final del producto.

II. METODOLOGÍA

Para este estudio se aplicó una metodología experimental, con el fin de cumplir con los objetivos planteados. Para alcanzar el primer objetivo, se realizaron ensayos en laboratorio para identificar la eficiencia de absorción de los colorantes comúnmente utilizados en el proceso de teñido

(rojo, azul y amarillo). Se prepararon soluciones de cada colorante y se aplicaron a las fibras de paja toquilla, siguiendo las condiciones estándar de teñido artesanal. Posteriormente, se recolectaron las aguas residuales resultantes para su análisis. Como parte de este mismo análisis, se midió la absorbancia mediante un espectrofotómetro para identificar la máxima absorción de cada colorante sintético (rojo, azul y amarillo). Se observó que el colorante amarillo y azul se absorbieron de manera eficiente por las fibras, dando como resultado una disminución de la cantidad de colorante en el agua residual tras el proceso de teñido. Sin embargo, para el colorante rojo no se observó una disminución en la concentración del colorante después del teñido. Sugiriendo que la fibra no absorbió el colorante rojo eficazmente, generando una mayor carga de contaminante en el agua residual. Se emplearon tres colorantes sintéticos diferentes (rojo, amarillo, azul) para evaluar su efecto en la calidad del teñido. Para el segundo objetivo, se analizaron tres parámetros físico-químicos del efluente residual: pH, conductividad eléctrica y demanda química de oxígeno (DQO), con base en los métodos estándar descritos en el libro *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 22nd Edition. El análisis del pH se realizó utilizando un potenciómetro, mientras que la conductividad se midió con un conductímetro de mesa. Para la determinación de la DQO, se utilizaron tubos de digestión con 5 ml de muestra, los cuales fueron sometidos a 120°C durante 120 minutos en un termoreactor, y posterior pasados a un fotómetro para medir su absorción. Para el tercer y último objetivo, se procedió a documentar de forma sistemática el proceso artesanal de teñido optimizado de la paja toquilla.

A. Procedimiento Experimental

• **Descrude de la paja toquilla**

Antes de realizar el proceso de teñido, se tuvo que hacer el descruado de la paja, para poder eliminar las grasas, impurezas y otras sustancias que puedan intervenir en el proceso. Se uso alrededor de 300 gramos de paja para las diferentes pruebas, para este proceso se uso agua destilada, detergente y carbonato de sodio. Se uso 15 litros de agua en donde se adicionó los 30 gramos de detergente y los 30 gramos de carbonato de sodio. El carbonato de sodio se empleo para que la estructura de la paja se pueda abrir y el colorante pueda penetrar mejor, y en cuanto al uso del detergente, este fue para que se facilite la eliminación de las grasas y las partículas que estén adheridas a las fibras. La mezcla fue puesta a 85 grados centígrados durante 45 minutos. Finalizado el tiempo se procedió a enjuagar y a secar la paja durante dos días.

• **Preparación de soluciones de colorantes**

En este paso se prepararon las soluciones necesarias para el proceso de teñido. Se midieron los reactivos con precisión y se disolvieron en agua destilada bajo condiciones controladas de temperatura y agitación para garantizar su homogeneidad. Para la preparación de las soluciones madre de los colorantes, se disolvieron 2 g de colorante en 1000 ml de agua, obteniendo así una concentración de 2000 ppm de cada colorante. Estas soluciones fueron almacenadas en recipientes etiquetados para su posterior uso en el proceso.

• **Diseño Experimental factorial de dos niveles**

Se llevo a cabo un diseño factorial de dos niveles, el objetivo principal fue evaluar como fue el impacto en cuanto a la absorción del

colorante y la calidad del agua residual. Otro de los objetivos fue escoger la tonalidad de referencia para la comparación final. Para ello se realizaron varias pruebas como se puede observar en la (Tabla I). En la Tabla I se muestran las combinaciones utilizadas para el diseño experimental del proceso de teñido del sombrero. Se analizaron tres variables: **Temperatura, cantidad de colorante y razón (g paja/ml baño)**. Se establecieron niveles codificados: $(-1, 0, 1)$, correspondientes a valores bajos, medios y altos, como se detalla a continuación:

TABLA I: Diseño Experimental factorial de dos niveles

Temperatura	Colorante (ml)	Razón (g paja/ml baño)
-1	-1	-1
1	-1	-1
-1	1	-1
1	1	-1
-1	-1	1
1	-1	1
-1	1	1
1	1	1
0	0	0
0	0	0
0	0	0

– **Temperatura** $(-1, 0, 1)$: Niveles de temperatura en el proceso de teñido:

- -1 : Temperatura baja (80 °C)
- 0 : Temperatura media (85 °C)
- 1 : Temperatura alta (90 °C)

– **Colorante** $(-1, 0, 1)$: Cantidad de colorante:

- -1 : Concentración baja (20 ml)
- 0 : Concentración media (35 ml)
- 1 : Concentración alta (50 ml)

– **Razón (g paja/ml de solución)** $(-1, 0, 1)$: Proporción de paja respecto a la cantidad de solución:

- -1 : 1 gramo de paja en 100 ml de agua

- 0 : 1 gramo de paja en 150 ml de agua
- 1 : 1 gramo de paja en 200 ml de agua

• **Diseño experimental factorial para determinar las concentraciones mínimas de teñido**

Para reducir la cantidad de colorante utilizado, se prepararon soluciones diluidas 100 veces la concentración. Se obtuvo soluciones de 10 ppm, 5 ppm, y 1 ppm.

Se planificó una mezcla de colorantes que, en teoría, darían la misma tonalidad escogida en el primer diseño experimental. Para ello se utilizó un diseño experimental de mezclas.

• **Diseño Experimental de mezclas**

Se utilizó un modelo experimental de mezclas del tipo centroide con tres componentes. Los colorantes utilizados fueron, rojo, azul y amarillo en concentración de 20 ppm y se mezclaron siguiendo la siguiente planificación de experimento presentado en la (Tabla II).

TABLA II: Diseño Experimental de Mezclas

Orden	Rojo (ml)	Azul (ml)	Amarillo (ml)
1	500	0	0
2	0	500	0
3	0	0	500
4	250	250	0
5	250	0	250
6	0	250	250
7	167	167	167
8	333	83	83
9	83	333	83
10	83	83	333

• **Definición visual de referencia de tonalidad**

Con el objetivo de identificar una concentración adecuada del colorante escogido que permitiera obtener un teñido visualmente aceptable, se realizó una etapa previa de ensayo empírico. A partir de la solución madre de 2000 ppm, se prepararon disoluciones de 200 ppm, 100 ppm y 50 ppm. Posteriormente, a partir de la solución de 200 ppm se preparó una dilución de 20 ppm,

y desde la solución de 100 ppm se elaboró una de 75 ppm.

- **Optimización Lineal**

Se trató de reducir al mínimo la cantidad de colorantes para que nos de la misma intensidad de tonalidad del baño escogido en el primer diseño experimental. Las concentraciones que se trabajaron, las cuales fueron obtenidas de la solución madre de 1000 ppm, fueron las siguientes: 120, 110, 100, 90, 85, 80, 75, 70. Se utilizaron 2 puntos sobre los 100 ppm de referencia y 5 puntos debajo del mismo. En este caso, no se utilizó la solución madre de 20 ppm, ya que los resultados del anterior diseño mostraron que no se llegaba a la tonalidad esperada.

- **Evaluación Visual de la Reducción del Colorante**

Esta prueba sensorial fue desarrollada como parte del proceso de optimización lineal, con el objetivo de seleccionar la concentración más adecuada para ser comparada posteriormente con la muestra de referencia. Al momento de completar todas las pruebas experimentales, se alcanzó reducir aproximadamente un 60% del colorante en el proceso de teñido. Para evaluar si esa reducción es perceptible y si la muestra con menor concentración puede ser utilizada sin generar diferencias visuales significativas, se llevó a cabo una prueba de diferenciación sensorial con observadores.

En este experimento, En cada hoja, se colocaron dos fragmentos teñidos con una misma concentración de colorante y un fragmento teñido con una concentración diferente, sin informar a los observadores cuál era cuál. El objetivo era que los participantes identificaran cuál muestra era distinta, evaluando si existía una diferen-

cia visual significativa en la tonalidad. Esta metodología permitió analizar si las diferencias de concentración aplicadas en la etapa de optimización eran perceptibles a simple vista, con el fin de determinar si alguna concentración menor mantenía la calidad visual del teñido. Participaron 20 observadores, lo que permitió obtener una base para validar si la reducción de colorante era viable sin comprometer la apariencia del producto final.

- **Análisis de los parámetros fisicoquímicos del efluente**

Se analizaron tres parámetros físico químicos: pH, conductividad eléctrica y la demanda química de oxígeno (DQO). Las mediciones se realizaron con la muestra escogida en el anterior diseño. Para analizar el pH se usó un potenciómetro y para la conductividad eléctrica se utilizó un conductímetro de mesa. En el caso de la DQO se utilizó un tubo de reacción, en donde se colocó los 5ml de la muestra residual del colorante escogido, posteriormente se colocó 120 °C durante 120 minutos en un termo reactor. Para cuantificar con precisión la DQO, se elaboró una curva de calibración utilizando sacarosa (azúcar) como compuesto orgánico patrón. Para ello, se preparó una solución madre de 10000 ppm disolviendo 19,43 g de azúcar en 1000 ml de agua. A partir de esta solución madre, se generaron una serie de disoluciones con concentraciones conocidas: 5000 ppm, 2500 ppm, 1000 ppm y 500 ppm, mediante diluciones sucesivas. Además, de la solución de 1000 ppm se prepararon tres disoluciones adicionales de 250 ppm, 100 ppm y 50 ppm, obteniendo un total de ocho patrones.

- *P2* (5000 ppm): 50 mL de solución madre aforados a 100 mL

- *P3* (2500 ppm): 25 mL de solución madre aforados a 100 mL
- *P4* (1000 ppm): 10 mL de solución madre aforados a 100 mL
- *P5* (500 ppm): 5 mL de solución madre aforados a 100 mL

A partir de la solución de 1000 ppm, se prepararon tres disoluciones adicionales:

- *P6* (250 ppm): 25 mL de la solución de 1000 ppm aforados a 100 mL
- *P7* (100 ppm): 10 mL de la solución de 1000 ppm aforados a 100 mL
- *P8* (50 ppm): 5 mL de la solución de 1000 ppm aforados a 100 mL

A cada una de estas muestras se les extrajo 5 ml, y se añadió en 8 tubos de reacción, los cuales también fueron sometidos a digestión térmica en el termo reactor bajo las mismas condiciones (120 °C durante 120 minutos) (Anexo 11). Este procedimiento permitió generar una curva de calibración que relaciona la concentración de materia orgánica (expresada en ppm) con la respuesta obtenida de la absorción. La finalidad de la curva de calibración es establecer una relación directa entre la cantidad de materia orgánica presente en las muestras (en este caso, en forma de sacarosa) y la señal analítica obtenida tras la digestión. Posteriormente, se gráfica la curva y nos da la respuesta de la DQO, sacada de la ecuación de la recta que nos genera la gráfica.

III. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados que se obtuvieron en todo el proceso del desarrollo experimental. Se llevaron a cabo diferentes diseños experimentales. El estudio comenzó con un Diseño Experimental factorial de dos niveles. A partir de ese diseño, se implementó un diseño experimental factorial para determinar las concentraciones

mínimas de teñido. Y por último un diseño experimental de mezclas. Al finalizar se hizo una evaluación visual de las muestras mediante una prueba de diferenciación sensorial con observadores. A continuación se detallan los hallazgos de cada experimento y su optimización en el proceso.

• **Descrude de la paja toquilla**

Tras el proceso de descrude, se observó una notable eliminación de impurezas y grasas en la paja toquilla, lo que permitió mejorar su capacidad de absorción del colorante. Se evidenció que el tratamiento con carbonato de sodio facilitó la apertura de la estructura de la fibra, lo que posteriormente favoreció una distribución más uniforme del colorante en el proceso de teñido (Anexo 1).

• **Soluciones de colorantes**

Las soluciones de colorantes preparadas en distintas concentraciones mostraron una estabilidad adecuada para su uso en el proceso de teñido. Se verificó que la dilución de la solución madre de 2000 ppm permitió obtener concentraciones homogéneas, asegurando la reproducibilidad de los experimentos y garantizando que los resultados no se vieran afectados por variaciones en la preparación de los colorantes (Anexo 2).

• **Diseño Experimental factorial de dos niveles**

Después de realizar el diseño factorial de dos niveles, se analizó y evaluó la absorción del colorante en las muestras teñidas. La temperatura de 85°C mostró una mejor fijación de colorante sin comprometer la integridad de la fibra. En comparación a la temperatura más baja, se observó que había una menor absorción del colorante, por lo que se genera una mayor cantidad de colorante en el agua residual, y en cuanto a la de 90°C, no hubo una diferencia

significativa, por lo que se decidió continuar con la temperatura de 85°C en los siguientes experimentos. Al haber escogido la temperatura óptima, se observó que la cantidad de colorante rojo en el agua residual seguía siendo alta, en comparación al colorante azul y amarillo, indicando que no toda la cantidad de colorante fue absorbido por la fibra. Por lo que el rojo fue el colorante optimizado. También se seleccionó una tonalidad de referencia para la comparación final. Se escogió el colorante rojo con una concentración de 200 ppm como base. Por lo que se llegó a plantear un nuevo diseño experimental (Anexo 3).

- **Diseño experimental factorial para determinar las concentraciones mínimas de teñido**

Se evaluó la concentración del colorante rojo en la fibra de paja toquilla a diferentes concentraciones (1 ppm, 5 ppm, 10 ppm y 20 ppm). Se notó que al disminuir la concentración del colorante, la intensidad del color en la fibra disminuía de manera progresiva. La solución de 20 ppm fue la que mejor fijación logró, sin embargo el tono obtenido no coincidía con el rojo que se esperaba para el proceso de teñido. A pesar de la diferencia en cuanto a la tonalidad, se utilizó la solución madre de 20 ppm para el siguiente experimento. El objetivo era que mediante el diseño experimental de mezclas, evaluar si se podía obtener una combinación de colorantes que genere una tonalidad del rojo deseado (Anexo 4).

- **Diseño experimental de Mezclas**

El objetivo de este diseño era evaluar si al mezclar distintas cantidades de colorante en proporciones específicas, se podía llegar a obtener el rojo deseado, todo esto con la solución madre de 20 ppm. A pesar de que

las soluciones presentan un color visualmente similar (rojo), el resultado en el teñido de la paja toquilla varió significativamente. Esto evidencia la influencia de la proporción específica de cada colorante en la mezcla, lo cual afecta directamente la tonalidad obtenida en el producto final, incluso cuando el agua residual muestra un color aparentemente uniforme (Anexo 5). Se realizó el diseño del tipo centroide con tres componentes. Sin embargo, los resultados evidenciaron que ninguna de las combinaciones logró replicar el rojo deseado (Anexo 6).

- **Resultados de la Definición visual de referencia de tonalidad**

Se observó que la concentración de 100 ppm del colorante rojo proporcionaba una coloración aceptable y similar a la lograda en los baños iniciales del proceso de teñido. Las muestras teñidas con concentraciones más bajas, como 50 ppm, 20 ppm o incluso 75 ppm, presentaban una tonalidad considerablemente más débil.

En consecuencia, se definió la concentración de 100 ppm como la referencia visual para la siguiente etapa del estudio: la optimización lineal. En esta fase, se buscó reducir la cantidad de colorante manteniendo una intensidad de color lo más cercana posible a la lograda con 100 ppm (Anexo 7).

- **Resultados de la optimización lineal**

Los resultados mostraron que la concentración de 70 ppm producía una tonalidad visualmente indistinguible de la de 120 ppm e incluso comparable a la referencia de 100 ppm lo que sugiere que es posible reducir el consumo de colorante sin alterar significativamente el resultado del teñido (Anexo 8).

- **Evaluación Visual de la Reducción del Colorante**

Los resultados de las pruebas de evaluación visual indicaron que la mayoría de personas no pudieron notar una diferencia entre las muestras de 120 ppm y de 70 ppm. En la primera prueba, en donde se colocó dos muestras de 120 ppm y una de 70 ppm, el 37,5 % de los observadores identificaron correctamente las muestras iguales, mientras que el 62,5 % no lograron identificar. Para la segunda prueba en donde se colocaron dos muestras de 70 ppm y una de 120 ppm, el 17,5 % si logro identificar las muestras iguales, y el 82.5 % no lograron identificar la diferencia. Por lo que esto sugiere que si es posible utilizar concentraciones mas bajas de colorante sin que se vea afectado el color en el producto final. En las pruebas de discriminación sensorial, en este caso comparación pareada se considera que para que exista una diferencia perceptible entre las dos muestras, el porcentaje de aciertos debe ser mayor al 65 % , pero en nuestro caso los aciertos fueron inferiores, lo que refuerza la conclusión de que la reducción de la concentración no es detectada por el ojo humano (ISO 5495:2005, 2005). Dando como resultado una reducción significativa en la cantidad de colorante utilizado, reduciendo así los costos de producción como también el impacto ambiental (Anexo 9).

• **Análisis de los parámetros fisicoquímicos del efluente**

En la Tabla III se presentan los resultados obtenidos del análisis de los parámetros fisicoquímicos de la muestra con colorante rojo a 70 ppm. El pH fue de 5.30, lo cual indica una ligera acidez en el efluente. Por otro lado, la conductividad eléctrica fue de 102.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$, valor que, aunque se encuentra dentro del rango aceptable para aguas no contami-

nadas, refleja la presencia de una carga iónica asociada principalmente a la presencia del colorante (TULSMA, n.d.).

TABLA III: Resultados del análisis de pH y conductividad eléctrica del efluente con colorante rojo a 70 ppm

Parámetro	Valor obtenido	Unidad	R.Referencia
pH	5.30	-	6 – 9
C. Eléctrica	102.8	$\mu\text{S}/\text{cm}$	50 – 500

Para determinar la demanda química de oxígeno (DQO) del efluente tratado con colorante rojo a 70 ppm, se realizó una curva de calibración utilizando disoluciones de sacarosa de concentraciones conocidas. Se midió la absorbancia de la curva de calibración utilizando un fotómetro (Anexo 10). Los resultados de absorbancia obtenidos se presentan en la Tabla IV. Con los datos válidos se gráfico la curva de calibración, en el eje X se colocó la concentración (ppm) y en el eje Y la absorbancia. La gráfica dio la línea de tendencia, con la cual se sacó la ecuación de la recta y se despejó la variable C, para determinar la concentración de DQO en la muestra. Se obtuvo un valor de DQO igual a 70.12 mg O₂/L para el efluente del colorante rojo a 70 ppm.

TABLA IV: Resultados de la DQO

Muestra	Absorbancia
70 ppm (rojo)	1.25
500 ppm	8.33
250 ppm	3.93
100 ppm	1.65
50 ppm	1.13

IV. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió evaluar el impacto ambiental del uso de colorantes sintéticos en el proceso de teñido del sombrero de paja toquilla, con un enfoque especial en la reducción de la concentración del colorante rojo. A través de análisis físico-

químicos y experimentación en laboratorio, se obtuvieron resultados que aportan criterios técnicos para una producción más sostenible. A continuación, se presentan las principales conclusiones derivadas de esta investigación.

- El estudio evidenció que el colorante rojo presenta una menor afinidad por las fibras de paja toquilla en comparación con los colorantes azul y amarillo. Esto se reflejó en una mayor concentración de colorante residual en el agua después del proceso de teñido, lo cual representa una mayor carga contaminante. A diferencia del rojo, los colorantes azul y amarillo mostraron un buen nivel de absorción, permitiendo un menor impacto ambiental.
- A través del diseño experimental de mezclas, se concluyó que no es viable sustituir el colorante rojo sin comprometer la calidad del color final. Sin embargo, reducir su concentración a un nivel mínimo eficaz es una estrategia clave para mantener la estética del producto y, al mismo tiempo, mitigar su impacto ambiental.
- Se comparó el valor de DQO obtenido a partir del efluente tratado con colorante rojo a 70 ppm, que fue de 70.12 mg O₂/L, con el valor inicial estimado para el efluente con la concentración original de 200 ppm, el cual alcanzó una DQO de 199.74 mg O₂/L. El límite permisible de DQO para descarga en aguas dulces es de 100 mg O₂/L. En este caso, el efluente tratado (70.12 mg O₂/L) no supera el límite para aguas dulces.
- Finalmente, se comprobó que la reducción en la concentración del colorante rojo a 70 ppm, también disminuye proporcionalmente su impacto ambiental, haciendo que esta propuesta sea viable como alternativa sostenible para la industria artesanal sin sacrificar la calidad del

teñido tradicional.

V. RECOMENDACIONES

Dado que es posible reducir la cantidad de colorantes, se considera oportuno que se revise las buenas prácticas de producción para mitigar el impacto ambiental. Para ello se propone generar información que pueda ser difundida en la comunidad y como ejemplo, se ha desarrollado un material informativo como el que se observa en el (Anexo 12).

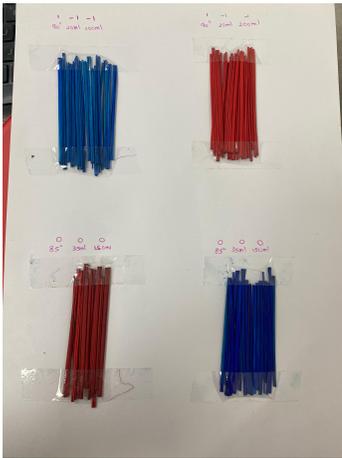
VI. ANEXOS



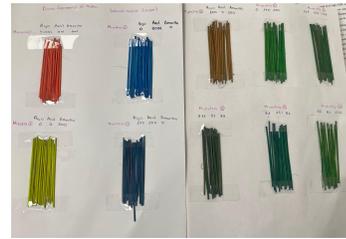
ANEXO 1: Descruce de la paja toquilla



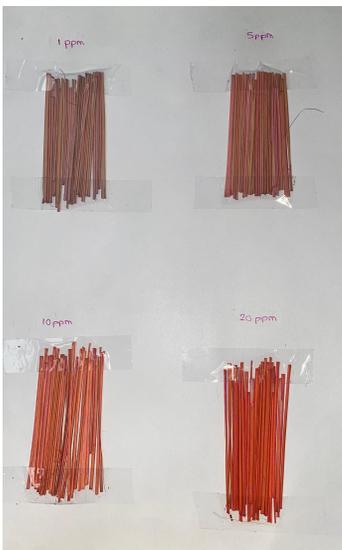
ANEXO 2: Soluciones de colorantes



ANEXO 3: Diseño Experimental factorial de dos niveles



ANEXO 6: Diseño Experimental de Mezclas



ANEXO 4: Diseño experimental factorial para determinar las concentraciones mínimas de tñido



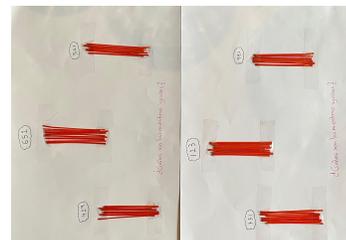
ANEXO 7: Definición visual de referencia de tonalidad



ANEXO 5: Diferencias en el tñido con mezclas de colorantes con apariencia similar



ANEXO 8: Optimización Lineal



ANEXO 9: Evaluación Visual de la Reducción del Colorante



ANEXO 10: Fotómetro



ANEXO 11: Termoreactor



ANEXO 12: Material Informativo

VII. BIBLIOGRAFÍA

REFERENCIAS

Castro-Peña, L., & Durán-Herrera, J. E. (2014). Degradación y decoloración de agua contaminada con colorantes tex-

tiles mediante procesos de oxidación avanzada. *Revista Tecnología en Marcha*, 27(2), ág-40.

Echeverría-Paredes. (2023). Tratamiento de efluentes coloreados provenientes del teñido de paja toquilla mediante un proceso fenton optimizado. *Ciencia en Desarrollo*, 14(1), 99-110.

Fobiri, G. K. (2022). Synthetic dye application in textiles: A review on the efficacies and toxicities involved. *Text. Leather Rev*, 5, 180-198.

Holguin, D., & Jossue, D. (2024). Sostenibilidad del sombrero de paja toquilla en Ecuador: desafíos y oportunidades en el mercado.

ISO 5495:2005. (2005). *Análisis sensorial — metodología — prueba de comparación pareada*. <https://www.iso.org/standard/31621.html>. (Organización Internacional de Normalización)

Moreno, N. (2023). Toxicidad de aguas residuales textiles en ambato: evaluación del conocimiento de decisores. *Revista Universidad y Sociedad*, 15(2), 306-315.

Pacheco, A. (2024). *Economía circular y la industria textil en el Ecuador*.

Slama, H. B., Chenari Bouket, A., Pourhassan, Z., Alenezi, F. N., Silini, A., Cherif-Silini, H., ... Belbahri, L. (2021). Diversity of synthetic dyes from textile industries, discharge impacts and treatment methods. *Applied Sciences*, 11(14), 6255.

TULSMA. (n.d.). Anexo 1 del libro vi del texto unificado de legislación secundaria del ministerio del ambiente: norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes al recurso agua. *LEXIS FINDER*, 12, 14-26.