



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Alcoy

Uso de fertilizantes basados en sustancias húmicas como
colorantes textiles aplicados en tejidos de algodón

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Química

AUTOR/A: Zamora Orengo, Sandra

Tutor/a: Santos-Juanes Jordá, Lucas

Cotutor/a: Bou Belda, Eva

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

Resumen

La industria textil contribuye de manera considerable a la contaminación ambiental, especialmente debido al uso extensivo de colorantes sintéticos y otros productos químicos en los procesos de fabricación, que generan grandes cantidades de aguas residuales. Esta problemática ha impulsado la búsqueda de alternativas más sostenibles, como el uso de colorantes naturales, los cuales podrían reducir considerablemente el impacto ambiental negativo asociado con los métodos convencionales, ya que se trata de productos menos agresivos y que son biodegradables.

El objetivo principal de este estudio es evaluar la viabilidad de utilizar fertilizantes basados en sustancias húmicas como colorantes textiles aplicados para la coloración y funcionalización de tejidos de algodón.

Se ha realizado un diseño experimental de tintura en muestras previamente caracterizadas con el objetivo de evaluar la medida del color, así como la posible mejora de la protección ultravioleta que presenta el textil. Para ello se han variado 3 parámetros de operación: temperatura, pH y concentración de fertilizante.

Además de evaluar estas propiedades fundamentales, se ha realizado un estudio detallado sobre la solidez del color frente al frote y al lavado. Estas pruebas son esenciales para analizar la durabilidad y la resistencia de los colorantes basados en sustancias húmicas en aplicaciones textiles reales. Como resultado de este trabajo se ha obtenido que el uso de colorantes naturales puede ofrecer intensidad de color al tejido, así como buenas características de resistencia y protección UV.

Las condiciones que han demostrado mejores resultados en términos de rendimiento y durabilidad se han seleccionado para ser escaladas a producciones industriales. A su vez, se ha realizado un análisis comparativo del costo de este proceso en relación con otros aditivos convencionales con funciones similares, proporcionando así una evaluación integral de la viabilidad económica de la propuesta.

Palabras clave: sustancias húmicas; tintura; algodón; protección UV; solidez

Resum

La indústria tèxtil contribueix de manera considerable a la contaminació ambiental, especialment a causa de l'ús extensiu de colorants sintètics i altres productes químics en els processos de fabricació, que generen grans quantitats d'aigües residuals. Aquesta problemàtica ha impulsat la cerca d'alternatives més sostenibles, com l'ús de colorants naturals, els quals podrien reduir considerablement l'impacte ambiental negatiu associat amb els mètodes convencionals, ja que es tracta de productes menys agressius i que són biodegradables.

L'objectiu principal d'aquest estudi és avaluar la viabilitat d'utilitzar fertilitzants basats en substàncies húmiques com a colorants tèxtils aplicats per a la coloració i funcionalització de teixits de cotó.

S'ha realitzat un disseny experimental de tintura en mostres prèviament caracteritzades amb l'objectiu d'avaluar la mesura del color, així com la possible millora de la protecció ultraviolada que presenta el tèxtil. Per a això s'han variat 3 paràmetres d'operació: temperatura, pH i concentració de fertilitzant.

A més d'avaluar aquestes propietats fonamentals, s'ha realitzat un estudi detallat sobre la solidesa del color enfront del freqüència i a la rentada. Aquestes proves són essencials per a analitzar la durabilitat i la resistència dels colorants basats en substàncies húmiques en aplicacions tèxtils reals. Com a resultat d'aquest treball s'ha obtingut que l'ús de colorants naturals pot oferir intensitat de color al teixit, així com bones característiques de resistència i protecció UV.

Les condicions que han demostrat millors resultats en termes de rendiment i durabilitat s'han seleccionat per a ser escalades a produccions industrials. Al seu torn, s'ha realitzat una anàlisi comparativa del cost d'aquest procés en relació amb altres additius convencionals amb funcions similars, proporcionant així una avaluació integral de la viabilitat econòmica de la proposta.

Paraules clau: substàncies húmiques; tintura; cotó; protecció UV; solidesa

Abstract

The textile industry is a major contributor to environmental pollution, especially due to the extensive use of synthetic dyes and other chemicals in manufacturing processes, which generate large quantities of wastewater. This problem has prompted the search for more sustainable alternatives, such as the use of natural dyes, which could considerably reduce the negative environmental impact associated with conventional methods, as they are less aggressive and biodegradable.

The main objective of this study is to evaluate the feasibility of using fertilisers based on humic substances as textile dyes applied for the colouring and functionalisation of cotton fabrics.

An experimental dyeing design has been carried out on previously characterised samples with the aim of evaluating the colour measurement, as well as the possible improvement of the ultraviolet protection of the textile. For this purpose, 3 operating parameters were varied: temperature, pH and fertiliser concentration.

In addition to evaluating these fundamental properties, a detailed study of the colour fastness to rubbing and washing has been carried out. These tests are essential to analyse the durability and resistance of humic-based dyes in real textile applications. As a result of this work, it has been found that the use of natural dyes can offer colour intensity to the fabric, as well as good fastness and UV protection characteristics.

The conditions that have shown the best results in terms of performance and durability have been selected to be scaled up to industrial productions. In turn, a comparative analysis of the cost of this process in relation to other conventional additives with similar functions has been carried out, thus providing a comprehensive assessment of the economic viability of the proposal.

Keywords: humic substances; dyeing; cotton; UV protection; fastness

ÍNDICE

RESUMEN	I
RESUM	II
ABSTRACT	III
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 PROBLEMÁTICA AMBIENTAL INDUSTRIAL A NIVEL GLOBAL	1
1.2 IMPACTO AMBIENTAL DE LA INDUSTRIA TEXTIL	3
1.3 FIBRAS TEXTILES	9
1.4 FIBRAS DE ALGODÓN	11
1.5 MORDENTADO	16
1.6 PROCESO PRODUCTIVO	18
1.7 COLORANTES SINTÉTICOS	22
1.8 ALTERNATIVAS A COLORANTES SINTÉTICOS	25
1.9 SUSTANCIAS HÚMICAS	26
1.10 EMPLEAR EXTRACTOS HÚMICOS COMO COLORANTES TEXTILES	29
1.11 FACTOR DE PROTECCIÓN ULTRAVIOLETA EN LOS TEJIDOS TEXTILES	29
2 OBJETIVOS	33
2.1 OBJETIVO GENERAL	33
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	33
2.3 OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE	34
3 METODOLOGÍA EMPLEADA	36
3.1 MATERIALES Y REACTIVOS	36
3.2 EQUIPOS	38
3.3 DISEÑO EXPERIMENTAL	49
3.4 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	53
4 RESULTADOS EXPERIMENTALES	63
4.1 CARACTERIZACIÓN DEL PRODUCTO COMERCIAL	63
4.2 RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS	66
4.3 ENSAYO DE SOLIDEZ DEL COLOR AL FROTE	69
4.4 ENSAYO DE SOLIDEZ DEL COLOR AL LAVADO	69
4.5 MEDIDA DE COLOR	70
4.6 PROTECCIÓN UV	75
4.7 ANÁLISIS DE SUPERFICIE DE RESPUESTA ESTIMADA	77
5 ESCALADO INDUSTRIAL	84

5.1	PROCESO DE TINTURA.....	84
5.2	PRETRATAMIENTO DEL TEJIDO.....	87
5.3	CONSUMO ENERGÉTICO.....	88
5.4	COMPARACIÓN DE CONSUMOS	89
6	ESTUDIO ECONÓMICO.....	91
6.1	COSTE TINTURA CON COLORANTE NATURAL.....	91
6.2	COSTE TINTURA CON COLORANTE SINTÉTICO.....	92
6.3	COSTE DE ENERGÍA.....	93
6.4	COSTE PERSONAL.....	94
6.5	COSTES TOTALES.....	96
7	CONCLUSIONES	98
8	BIBLIOGRAFÍA	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Nivel promedio de dióxido de carbono (CO ₂) en la atmósfera	2
Figura 2. Consumo de agua en el proceso de producción [12]	5
Figura 3. Producción mundial de fibras químicas y textiles de 1975 a 2022(en miles de toneladas métricas) [13]	7
Figura 4. Residuos textiles [15]	8
Figura 5. Economía circular [16]	9
Figura 6. Consumo de fibras textiles [18]	10
Figura 7. Fibra de algodón [1].....	12
Figura 8. Estructura química de la celulosa [23].....	16
Figura 9. Estructura química del quitosano [24]	17
Figura 10. Cosecha del algodón Desgomado [27]	19
Figura 11. Diagrama de producción de textiles de algodón [18]	21
Figura 12. Reacción para la fijación de colorantes reactivos con las fibras [32].....	24
Figura 13. Colorante sulfuroso	25
Figura 14. Descomposición de los restos orgánicos [36].....	28
Figura 15. Ácidos húmicos y fúlvicos [38]	28
Figura 16. Espectro electromagnético [39]	30
Figura 17. Objetivos de desarrollo sostenible	34
Figura 18. Mordente.....	37
Figura 19. NaOH 0.1 M	38
Figura 20. H ₂ SO ₄ 0.1 M.....	38
Figura 21. Detergente.....	38
Figura 22. Sistema de purificación de agua	39
Figura 23. Termorreactor	39
Figura 24. Fotómetro.....	40
Figura 25. Analizador de TOC.....	40
Figura 26. pHmetro	41
Figura 27. Espectrofotómetro.....	42
Figura 28. Conductímetro	43
Figura 29. Agitador magnético	43
Figura 30. Rodillos exprimidores.....	44
Figura 31. Estufa	44
Figura 32. Equipo de tintura.....	45
Figura 33. Interior baño de tintura	45
Figura 34. Espectrofotómetro de reflexión	46
Figura 35. Lámpara emisión UV.....	46
Figura 36. Medidor de irradiación	47
Figura 37. Crockmeter	48
Figura 38. Lavadora FONG's	48
Figura 39. Diseño de Döehlert para la optimización de tres variables [43]	49
Figura 40. Tejido sumergido en la disolución de quitosano	57
Figura 41. Preparación del proceso de tintura.....	58
Figura 42. Espectro del producto comercial	65
Figura 43. Tela multifibra vs muestra textil.....	70
Figura 44. Coordenadas CIELAB [66]	71
Figura 45. K/S vs. Longitud de onda	73

Figura 46. K/S a 400 nm	74
Figura 47. Resultados obtenidos UPF	77
Figura 48. Superficie de respuesta estimada UPF T=65 °C	79
Figura 49. Superficie de respuesta estimada UPF T=80 °C	79
Figura 50. Superficie de respuesta estimada UPF T=95 °C	80
Figura 51. Superficie de respuesta estimada L T=65 °C	81
Figura 52. Superficie de respuesta L T=80 °C	82
Figura 53. Superficie de respuesta L T=95 °C	82
Figura 54. Máquina para teñido textil [47]	85
Figura 55. Maquinaria Ramen [48]	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición de la fibra de algodón [22]	15
Tabla 2. Clasificación de tejidos en función de su UPF (Norma AS/NZ 4399: 1996)	32
Tabla 3. Contenido declarado producto comercial.....	36
Tabla 4. Matriz Döehlert de códigos para un diseño de 3 variables	50
Tabla 5. Codificación de los factores estudiados en la optimización del proceso de tintura ..	51
Tabla 6. Diseño experimental.....	52
Tabla 7. Preparación de muestras.....	55
Tabla 8. Resumen resultados obtenidos	66
Tabla 9. Muestras obtenidas	67
Tabla 10. Resultados obtenidos en el ensayo de solidez del color al frote	69
Tabla 11. Resultados obtenidos en el ensayo de solidez del color al lavado	70
Tabla 12. Resultados obtenidos de las coordenadas CIELAB	71
Tabla 13. Resultados obtenidos del UPF.....	75
Tabla 14. Rango de valores que influyen en el UPF	78
Tabla 15. Rango de valores que influyen en L*	80
Tabla 16. Comparación de consumos entre escala de laboratorio e industrial.....	89
Tabla 17. Costes estimados para la tintura con colorantes naturales	91
Tabla 18. Costes estimados para la tintura con colorantes sintéticos.....	93
Tabla 19. Costes de energía en función de los horarios	94
Tabla 20. Coste promedio de energía	94
Tabla 21. Industria de obtención de fibras de algodón y obtención de subproductos.....	95
Tabla 22. Coste total por ciclo.....	96
Tabla 23. Comparación de costes entre colorantes sintéticos y naturales.....	97

1 Introducción

1.1 Problemática ambiental industrial a nivel global

La industria ha experimentado un crecimiento al alza en las últimas décadas a nivel mundial, convirtiéndose en un pilar fundamental de la economía global. Este crecimiento se remonta a la Revolución Industrial iniciada en Gran Bretaña, un periodo que transformó la producción y la economía desde el siglo XVIII. Esta etapa experimentó una transición de una economía agraria y artesanal a una basada en la industria y la manufactura. La mecanización de la producción, impulsada por innovaciones tecnológicas como la máquina de vapor y la maquinaria textil, revolucionó los procesos de fabricación y permitió una producción a gran escala nunca antes vista [2].

Las industrias que experimentaron los cambios más significativos en sus procesos convencionales fueron aquellas que sustituyeron en gran medida la mano de obra por maquinaria y tecnología avanzada. La industria textil fue una de las primeras en adoptar la mecanización. Con la introducción de máquinas como la lanzadera volante, la hiladora de Arkwright y el telar mecánico, se logró aumentar significativamente la producción y reducir la dependencia de la mano de obra [3].

Por otro lado, en la industria metalúrgica, el desarrollo de nuevas técnicas como la pudelación, revolucionó la producción de hierro y acero. Antes de estos avances, la producción de metales era mucho más lenta, pero la introducción de nueva maquinaria y el desarrollo de procesos químicos permitió fabricar metales más resistentes y duraderos a una escala mucho mayor [4].

Otro sector que también experimentó cambios drásticos fue la minería, la introducción de máquinas de vapor y, posteriormente, de máquinas eléctricas, permitió excavar y procesar minerales de manera más eficiente. Las técnicas de perforación y extracción se volvieron más avanzadas, sustituyendo en gran parte del proceso la mano de obra y mejorando la seguridad de los trabajadores y la productividad de las operaciones mineras. Estos cambios también impulsaron la fabricación de nueva maquinaria y herramientas, así como su transporte a las zonas industriales [5].

Sin embargo, este crecimiento industrial que se ha producido a lo largo de los años ha venido acompañado de graves impactos ambientales que no estaban previstos en su momento, y se ha

empezado a darle importancia hace relativamente poco tiempo. Uno de los principales problemas asociados a la industrialización es su contribución a la contaminación, tanto atmosférica, como de suelos y agua, así como la emisión de gases de efecto invernadero. En la **Figura 1**, se puede observar como a medida que avanzan los años, la concentración de CO_2 aumenta constantemente. La industria es responsable en gran medida de este incremento, ya que es una de las principales fuentes de contaminación atmosférica a nivel mundial, contribuyendo significativamente al aumento de los niveles de dióxido de carbono.

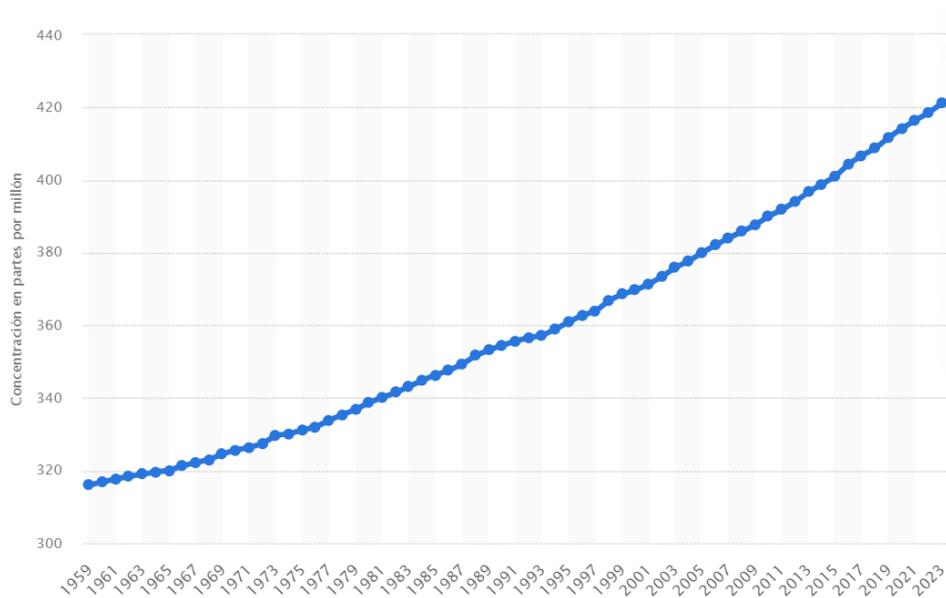


Figura 1. Nivel promedio de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera

La quema de combustibles fósiles que se realiza principalmente para generar energía y para la producción industrial, como el carbón y el petróleo, libera contaminantes en el aire contribuyendo a la emisión de gases de efecto invernadero. En la actualidad, la medición de la contaminación atmosférica se realiza a través de la evaluación de la huella de carbono. Este parámetro se define como la cantidad total de gases de efecto invernadero (GEI) liberados durante los procesos industriales u otras actividades que contribuyen a la emisión de gases. Estos gases, que incluyen el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O), provienen principalmente de la combustión de combustibles fósiles para la generación de energía, la producción de materias primas y la manufactura de productos. La industria es responsable de una parte significativa de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, lo que la convierte en un sector clave para abordar los impactos ambientales y reducir las emisiones a nivel mundial [6].

Por otro lado, las industrias generan una gran cantidad de residuos. La mayoría de las empresas descargan residuos industriales y químicos directamente en ríos, lagos y océanos, lo que tiene un impacto devastador en la vida acuática. Contaminantes como metales pesados, productos químicos tóxicos y desechos orgánicos pueden destruir los ecosistemas acuáticos, eliminando la biodiversidad y alterando las cadenas alimenticias.

La presencia de estos contaminantes puede provocar la muerte masiva de peces y otros organismos acuáticos, además de afectar a las aves y mamíferos que dependen de estos ecosistemas para alimentarse. La contaminación del agua hace que esta no sea apta para el consumo humano, afectando a las comunidades que dependen de estas fuentes para su agua potable. La exposición a estos contaminantes puede causar problemas de salud graves, como enfermedades gastrointestinales, problemas neurológicos o cáncer.

Otro aspecto importante que se debe tener en cuenta es que la actividad industrial a menudo implica la extracción y el consumo de recursos que provienen del petróleo. Esta explotación intensiva de recursos naturales tiene múltiples consecuencias negativas. En primer lugar, la degradación del medio ambiente es un resultado directo de prácticas como la minería y la perforación petrolera, que pueden devastar grandes extensiones de tierra y destruir hábitats naturales. La dependencia de estos recursos lleva a su agotamiento progresivo, lo que puede resultar en una escasez crítica para las generaciones futuras.

1.2 Impacto ambiental de la industria textil

Como se ha mencionado en el apartado anterior, el sector textil fue pionero en la introducción de máquinas para la producción en Gran Bretaña. La creciente demanda de productos textiles, impulsada por una revolución demográfica en ascenso, generó la necesidad de aumentar la producción. La introducción de la máquina de vapor, creada por James Watt en 1769, implicó grandes cambios en la industria, incrementando la producción de hilo y tejido a elevados niveles. La prometedora rentabilidad del sector textil atrajo a capitalistas que querían obtener grandes beneficios, ya que obtenían sus ganancias provenían del comercio [7].

El desarrollo del sistema de transportes tuvo mucho que ver con la expansión del mercado nacional, facilitando la expansión de productos textiles por toda la región.

La prohibición del importe de telas de algodón desde la India, principal competidor de Inglaterra, favoreció el crecimiento de la producción de algodón en el país. Además, este

crecimiento proporcionaba una gran cantidad de materia prima económica para las industrias inglesas. Por otro lado, la ausencia de regulaciones en el proceso productivo del algodón también jugó un papel crucial, permitiendo una mayor flexibilidad.

En Europa, a partir del siglo XVIII, se experimentó un notable crecimiento de la población. Este aumento generó una creciente demanda de bienes de consumo, entre ellos los tejidos textiles, impulsando la necesidad de producir en grandes cantidades y buscar métodos de fabricación más eficientes. La expansión de los mercados y la creciente demanda global de productos manufacturados también desempeñaron un papel crucial. Europa estaba estratégicamente posicionada para aprovechar estas oportunidades gracias a su red comercial y a la disponibilidad de recursos.

La industria textil es el sector de la industria manufacturera dedicado a la producción de una amplia gama de productos que incluyen fibras naturales y sintéticas, telas, hilados y otros materiales relacionados con la confección de ropa y textiles para el hogar. Este sector abarca desde la fabricación de tejidos y materiales hasta la confección de prendas de vestir y accesorios, e incluso la producción de calzado [7]. Las actividades de la industria textil se llevan a cabo en fábricas especializadas, donde se emplean técnicas avanzadas para satisfacer la demanda tanto a nivel local como internacional.

En la actualidad, la industria textil figura como una de las principales fuentes de contaminación a nivel mundial [8]. El proceso de producción de textiles conlleva un alto consumo de recursos, especialmente agua y energía.

El agua se utiliza en abundancia en diversas etapas, especialmente en el proceso de tintura [9]. Además de su uso en el proceso productivo, el agua es esencial para el cultivo del algodón y otros tipos de fibras naturales. La intensa demanda de agua en la industria textil tiene un impacto significativo en los recursos hídricos globales. En 2020, el sector textil fue identificado como la tercera mayor fuente de degradación del agua y del uso del suelo a nivel mundial. La producción y el procesamiento de textiles no solo agotan grandes cantidades de agua, sino que también afecta a los organismos que se encuentran en estos espacios [10].

La industria textil consume aproximadamente 93.000 millones de metros cúbicos de agua al año, agravando los problemas de escasez de agua en algunas regiones. La fabricación de un par de pantalones vaqueros requiere 10.000 litros de agua, la misma cantidad de agua que una persona bebe en 10 años [11].

En la **Figura 2** se muestra el porcentaje de consumo de agua en diferentes actividades dentro de la industria textil. Las operaciones de proceso, preparación, tintura y acabados representan el mayor consumo de agua con un porcentaje que se acerca al 80%, lo que indica que la mayor parte del agua utilizada en la industria textil se destina a los procesos de producción. Por otro lado, el acondicionamiento utiliza una porción de agua similar a la de refrigeración necesaria para mantener las condiciones adecuadas de humedad y temperatura durante la producción textil.

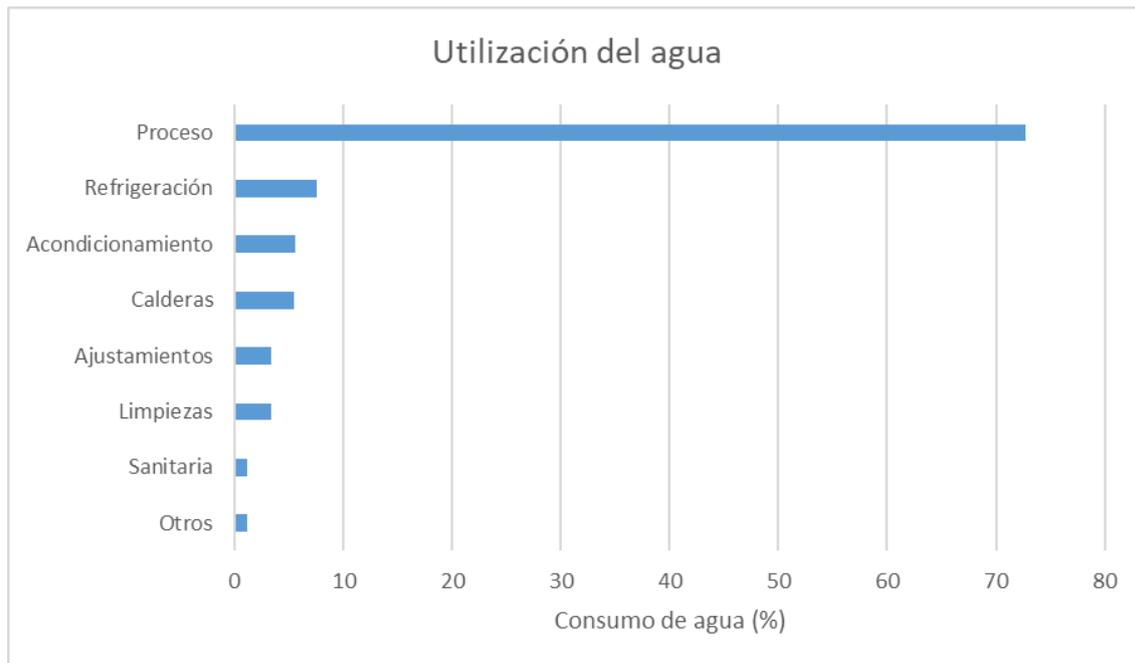


Figura 2. Consumo de agua en el proceso de producción [12]

A pesar de que durante la producción de textil se consume una gran cantidad de agua, este consumo no se limita a la fase de producción. La fase de uso, cuando los consumidores lavan la ropa, representa aproximadamente el 40% del consumo de agua que se utiliza con una pieza de ropa.

Sin embargo, el agua que se genera en el proceso de producción del sector textil contiene una gran cantidad de componentes tóxicos, principalmente debido al empleo de colorantes sintéticos durante los procesos de tintura y acabado de textiles. Estos colorantes contienen metales pesados, compuestos orgánicos volátiles (Coves), aminas aromáticas, sulfuros, sulfitos, cloruro de polivinilo (PVC) y formaldehído, entre otros componentes tóxicos. Es por ello por lo que generan un gran impacto medioambiental cuando las empresas los descargan a los sistemas acuáticos. Las aguas residuales pueden aumentar la salinidad y alterar el equilibrio del

pH de los sistemas acuáticos, causando daños significativos a la biodiversidad acuática y afectando la calidad del agua potable.

Por otro lado, la energía es fundamental en la industria textil, ya que se requiere para operar la maquinaria de producción, calentar los sistemas y transportar tanto las materias primas como los productos terminados. La mayor parte de esta energía proviene de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural. El uso extensivo de energía, en su mayoría proveniente de fuentes no renovables, contribuye a las emisiones de gases de efecto invernadero, aumentando los efectos del cambio climático y sus impactos asociados.

Uno de los procesos que más energía consume en la industria textil es el secado. Este proceso implica la eliminación del agua de los materiales textiles y requiere fuentes de calor que consumen grandes cantidades de energía. Las tecnologías de secado utilizadas en las fábricas textiles incluyen secadores de tambor, secadores de túnel o secadores infrarrojos, todos estos requieren un consumo elevado de energía para funcionar correctamente.

Además, durante el secado de las telas teñidas o acabadas, pueden evaporarse compuestos orgánicos volátiles (COVs), formaldehídos y otros productos químicos peligrosos utilizados en los procesos de teñido, acabado y blanqueado. Estos contaminantes expuestos al aire pueden tener efectos adversos en la salud de los trabajadores y de las comunidades cercanas a las instalaciones de producción, aumentando el riesgo de problemas respiratorios, irritaciones y otros problemas de salud graves.

Otro aspecto importante para tener en cuenta es la gran cantidad de residuos que se generan, tanto sólidos como líquidos. Los residuos sólidos incluyen recortes de tela, desechos de producción y textiles descartados, que pueden terminar en vertederos o incineradoras, contribuyendo a la contaminación del suelo y del aire. Por otra parte, los residuos líquidos representan otra preocupación importante, estos efluentes están contaminados con una variedad de productos químicos utilizados en los procesos de producción textil, incluyendo colorantes, agentes de acabado, solventes y otros aditivos. Si estos efluentes no se tratan adecuadamente antes de su descarga en los sistemas acuáticos, pueden contaminar aún más estos ecosistemas y afectar a la calidad del agua potable.

Es muy importante que las industrias adopten una gestión responsable para minimizar su impacto ambiental y proteger la salud pública, implementando prácticas sostenibles en todas las etapas de producción. Esto incluye el tratamiento adecuado de aguas residuales, el uso de

tecnologías limpias y la adopción de métodos de producción más eficientes. Además, es crucial que las industrias cumplan las normativas para proteger el medio ambiente.

En la **Figura 3** que se muestra a continuación, se puede observar un crecimiento en el volumen de producción textil a medida que avanzan los años. Este incremento conlleva consigo un aumento en el impacto ambiental asociado a esta industria, de ahí la importancia de buscar prácticas más sostenibles para reducir este impacto.

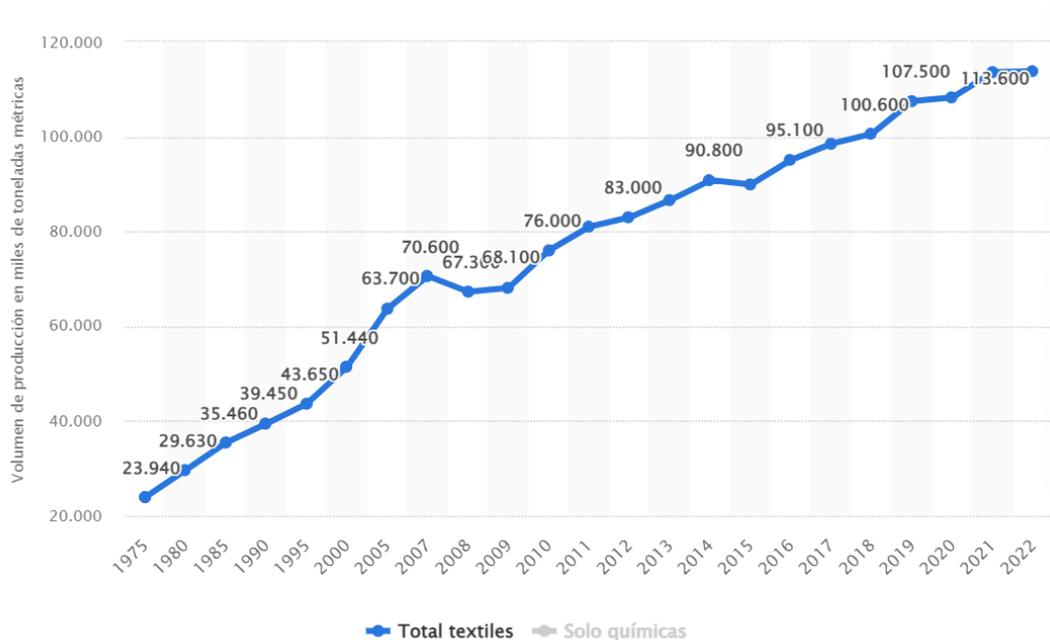


Figura 3. Producción mundial de fibras químicas y textiles de 1975 a 2022(en miles de toneladas métricas) [13]

La producción de fibras textiles ha experimentado un crecimiento notable a nivel global en las últimas décadas. En el año 2000, se produjeron aproximadamente 58 millones de toneladas de fibras textiles a nivel mundial. Para el año 2020, esta cifra casi se duplicó, alcanzando los 109 millones de toneladas. Se proyecta que esta tendencia de crecimiento continúe, estimándose que la producción podría alcanzar los 145 millones de toneladas para el año 2030 [10].

Este aumento en la producción de fibras textiles refleja la creciente demanda mundial de productos textiles y prendas de vestir. Sin embargo, este crecimiento está influenciado en gran medida por el fenómeno de la *Fast Fashion*, un modelo de negocio que impulsa la producción masiva y rápida de prendas de vestir para satisfacer las demandas cambiantes del mercado. Esto no solo ha contribuido al aumento de la producción de fibras químicas y textiles, sino que también ha aumentado los desafíos ambientales y sociales de la industria textil, incluyendo el consumo intensivo de recursos y la elevada generación de residuos.

El consumismo es uno de los mayores responsables de que se lleve a cabo este tipo de prácticas. Una de las consecuencias de esto es la producción masiva, en contraste con el tiempo de utilización de la ropa, que es muy corto [14]. Cuando una prenda se deteriora, la mayoría de las personas tienden a desecharla en lugar de repararla o buscar formas de prolongar su uso. Este hábito de descarte rápido contribuye de manera significativa al problema global de la generación de residuos textiles.

Las prendas descartadas terminan en vertederos, donde no solo ocupan espacio, sino que también generan impactos ambientales negativos. Muchas de estas prendas están compuestas por materiales sintéticos y mezclas de fibras que pueden tardar años, e incluso décadas, en descomponerse completamente. Durante este proceso de descomposición, pueden liberar productos químicos y contaminantes en el suelo y en el agua, afectando negativamente a los ecosistemas y a la salud humana. Anualmente, la ropa y el calzado acumulan 5.2 millones de toneladas de residuos en la UE [15].



Figura 4. Residuos textiles [15]

El ciclo de consumo rápido y descartable es alimentado por la disponibilidad constante de nuevas colecciones de moda a precios accesibles, promoviendo así la compra impulsiva y continua.

Para abordar estos desafíos, es crucial adoptar prácticas de producción más sostenibles en la industria textil. Esto incluye la implementación de tecnologías más eficientes y menos agresivas con el medio ambiente, la promoción de la economía circular para reducir los residuos textiles

y la adopción de estándares ambientales más estrictos en toda la cadena de valor. Asimismo, fomentar un consumo más consciente y responsable por parte de los consumidores puede contribuir a disminuir los impactos negativos asociados con el crecimiento continuo de la producción de fibras textiles.

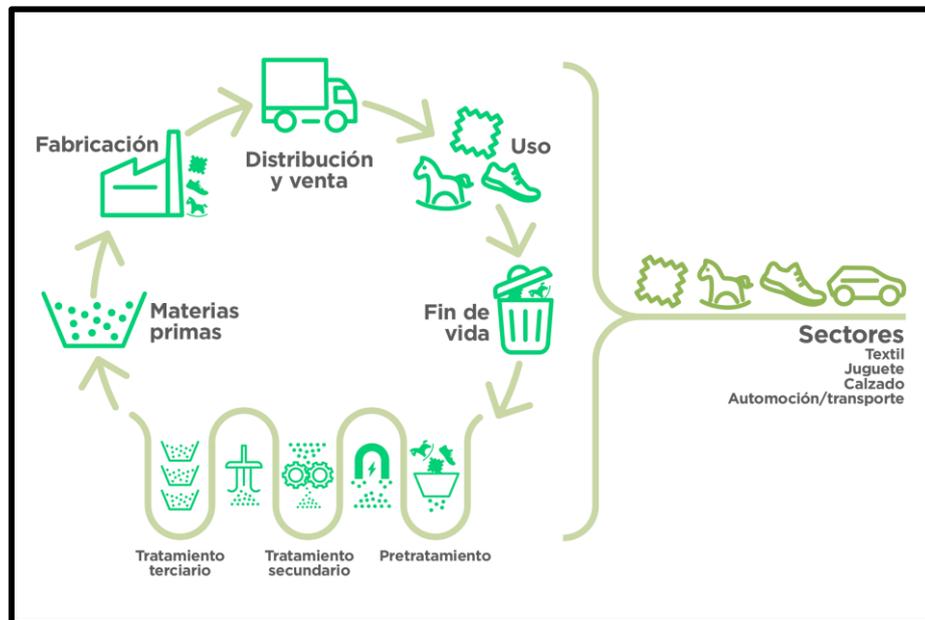


Figura 5. Economía circular [16]

Además, una acción positiva sería lanzar campañas de concienciación sobre los impactos negativos del uso excesivo de ropa para disminuir los problemas ambientales. Promover la economía circular en la moda puede ser una estrategia muy efectiva. Es fundamental resaltar los beneficios de apoyar marcas de moda sostenible que utilizan materiales ecológicos y prácticas amigables con el medio ambiente. Al ofrecer esta información, los consumidores pueden tomar decisiones más informadas y responsables, optando por productos que no solo cumplen con sus necesidades estéticas y funcionales, sino que también apoyan activamente la sostenibilidad ambiental y social.

1.3 Fibras textiles

Las fibras sintéticas se obtienen a través de procesos industriales que modifican polímeros naturales (viscosa, acetato, lyocell...) o crean polímeros sintéticos (poliéster, poliamida, acrílica...), mientras que las fibras naturales provienen directamente de fuentes animales (lana, alpaca, mohair, cachemira, seda...), vegetales (algodón, lino, cáñamo, yute...) o minerales (amiante).

Las fibras sintéticas son fuertes y duraderas y atractivas, lo que las hace ideales para la confección de ropa resistente al desgaste. Además, son resistentes a las arrugas y tienen un peso ligero, haciéndolas muy atractivas. Otra ventaja es que hay una amplia gama de texturas y acabados, estas son capaces de imitar la apariencia y el tacto de fibras naturales como la seda, la lana o el algodón.

Sin embargo, las fibras sintéticas se producen a partir de materiales derivados del petróleo. Tanto la materia prima como la producción del filamento son artificiales, implicando de esta manera la utilización de recursos no renovables y la generación de contaminantes durante el proceso de producción. Este tipo de fibras no son biodegradables, contribuyendo a la acumulación de residuos textiles en vertederos, por lo que su elevada contaminación hace necesario buscar otras alternativas menos perjudiciales [17].

Por otro lado, dentro del grupo de las fibras naturales, encontramos dos categorías principales: las fibras celulósicas, como el algodón, y las fibras proteicas, como la lana. En este caso, el estudio se va a llevar a cabo con fibras de algodón. El algodón es una de las fibras más utilizadas en la industria textil, en la **Figura 6** se puede observar que es la fibra más consumida tanto para la producción de ropa como para la de textiles de hogar.

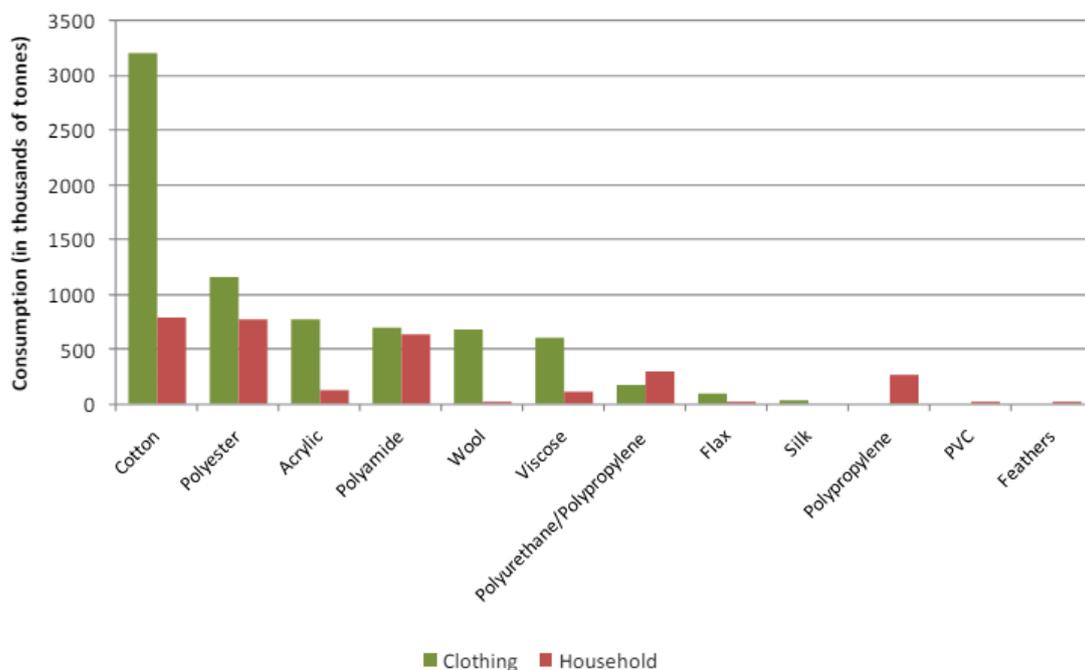


Figura 6. Consumo de fibras textiles [18]

El algodón y el poliéster son las fibras más usadas en la industria textil debido a una serie de factores como son la disponibilidad, características técnicas, el costo y la versatilidad. El algodón es una fibra natural que proviene de la planta de algodón, conocida por su suavidad, lo que lo hace ideal para prendas de vestir y textiles de hogar. Es hipoalergénico y transpirable, permitiendo una buena ventilación y absorción de humedad. Además, es resistente y duradero, soportando bien los lavados frecuentes sin perder sus propiedades. Puede ser blanqueado y teñido fácilmente, lo que permite una gran variedad de colores y diseños.

El poliéster es una fibra sintética conocida por su alta resistencia a la tensión y al desgaste, lo que prolonga la vida útil de las prendas. Es resistente a las arrugas, al encogimiento y a las manchas, lo que facilita su mantenimiento. Generalmente, el poliéster es más barato de producir que las fibras naturales debido a los procesos de fabricación a gran escala y el uso de materias primas relativamente económicas.

En comparación, otras fibras como el acrílico, la poliamida, la lana y la seda también tienen sus usos específicos, pero no alcanzan el mismo alcance de popularidad que el algodón y el poliéster. El acrílico y la poliamida, aunque son sintéticas y resistentes, pueden ser menos confortables en comparación con el algodón y el poliéster, aunque esta característica depende también de otras características propias del tejido, tal como la estructura lineal y la laminar utilizada. La lana y la seda son excelentes en términos de confort y termorregulación, pero son más costosas y requieren cuidados especiales. Las fibras regeneradas como la viscosa tienen un tacto similar al algodón, pero pueden no ser tan duraderas y pueden requerir procesos de producción más complejos.

1.4 Fibras de algodón

Las fibras de algodón se obtienen de las semillas del algodónero (*Gossypium*). En la **Figura 7** se puede observar que al analizar el algodón mediante microscopía electrónica las fibras presentan una apariencia de cintas planas con torsiones. Estas falsas vueltas de torsión se generan a consecuencia de la savia presente en la planta que circula por la fibra cuando se cosecha, esta se seca y se deposita de forma irregular en su interior.



Figura 7. Fibra de algodón [1]

Al tratarse de una fibra natural y renovable, se trata de un material biodegradable lo que significa que se descomponen de manera natural sin causar un daño significativo al medio ambiente. Además, son reciclables, permitiendo su reutilización y reduciendo así la necesidad de producir nuevas fibras a partir de materias primas vírgenes [11].

Sin embargo, el cultivo y procesamiento convencional del algodón requieren grandes cantidades de agua y productos químicos. El algodón es una planta que necesita mucha agua para crecer, y en regiones donde el agua es un recurso escaso, esto puede aumentar los problemas de disponibilidad de agua. Además, se utilizan pesticidas y fertilizantes en grandes cantidades para proteger y nutrir las plantas de algodón. Estos productos químicos pueden contaminar el suelo y las fuentes de agua cercanas.

A pesar de este inconveniente, que además está siendo modificado por la incorporación de productos naturales para su procesamiento y producción, el algodón sigue siendo una de las fibras más demandadas debido a sus cualidades naturales, como la suavidad, la transpirabilidad y la capacidad de absorción de humedad.

En cuanto a la viabilidad económica, el algodón presenta varias ventajas que lo hacen atractivo tanto para fabricantes como para consumidores. En primer lugar, el algodón es una materia prima abundante y disponible en muchas regiones del mundo, lo que reduce los costes de adquisición y transporte. A su vez puede traducirse en precios más competitivos para los productos textiles finales. Además, la demanda de algodón en la industria textil asegura un mercado estable y la posibilidad de obtener beneficios a largo plazo.

En términos de sostenibilidad, esta fibra también ofrece ventajas ecológicas significativas. A medida que la conciencia sobre la importancia de la moda sostenible crece, muchas marcas y consumidores están optando por la utilización de materiales naturales y biodegradables. El algodón cumple con estos criterios al ser una fibra natural y biodegradable, lo que lo convierte en una opción más sostenible en comparación con las fibras sintéticas.

Para poder caracterizar y evaluar las fibras de algodón, es fundamental analizar tanto sus propiedades físicas como químicas. A continuación, se detallan las características más relevantes de este material.

PROPIEDADES FÍSICAS

- La longitud de las fibras de algodón varía generalmente entre 20 y 40 mm [19].
- La finura de las fibras de algodón oscila entre 1 y 4 dtex [19]. La unidad decitex (dtex) mide la masa en gramos por 10000 metros de longitud de la fibra o hilo, y a su vez, determina la suavidad y el tacto del tejido final.
- El rizado de las fibras de algodón es poco considerable en comparación con otras fibras naturales como la lana. La ausencia de rizado facilita su procesamiento en la fabricación textil [20].
- Las fibras de algodón presentan una tenacidad que varía entre 10 y 30 cN/tex [19]. La tenacidad en cN/tex indica cuánta fuerza se requiere para romper una fibra de algodón de un tex de densidad. Esta propiedad mide la resistencia a la rotura, indicando que el algodón es resistente, aunque no el más resistente entre las fibras naturales.
- La resiliencia del algodón es baja, lo que significa que la fibra tiene dificultad para recuperar su forma inicial después de una deformación. Esto implica que las prendas de algodón pueden arrugarse fácilmente.
- El algodón tiene una resistencia media a la abrasión, haciéndolo adecuado para prendas que no están expuestas a un desgaste excesivo.
- Las fibras de algodón no generan pilling, es decir, no forman bolas en la superficie del tejido con el uso.
- Al ser una fibra natural, el algodón no tiene un punto de fusión definido. Sin embargo, puede degradarse a altas temperaturas.

- El algodón es una fibra mate.

PROPIEDADES QUÍMICAS

- La tasa legal de humedad en el algodón es del 8.5%, lo que ayuda a mantener la fibra flexible y reduce la estática [20].
- El algodón puede retener entre un 42% y un 53% de su peso en agua, lo que lo hace muy absorbente [19].
- Las fibras de algodón se pueden someter a lavados, pero pueden encogerse si se exponen a temperaturas elevadas o a una fuerte acción mecánica durante el lavado.
- El algodón es capaz de soportar disolventes utilizados en la limpieza en seco, como el percloroetileno, sin degradarse.
- El algodón se degrada con el tratamiento en pH ácido y resiste relativamente bien los tratamientos alcalinos, lo que permite su uso en procesos industriales específicos.
- El algodón puede ser teñido con una variedad de colorantes, incluyendo directos, reactivos, de tina y sulfurosos. Como se muestra en la **Figura 8**, donde se presenta la estructura química de la celulosa, la presencia de grupos hidroxilos en su estructura facilita la reactividad de la fibra tanto con los colorantes descritos, como con otro tipo de productos químicos empleados para su tratamiento posterior.
- Las fibras de algodón pueden ser atacadas fácilmente por oxidantes como la lejía. Esto debe tenerse en cuenta durante los procesos de blanqueo y limpieza.
- El algodón puede perder resistencia y desvanecerse si se expone prolongadamente a la luz, especialmente la luz solar directa.

En el algodón, las fibras de celulosa son de gran pureza, alrededor del 92%. Los componentes restantes representan un porcentaje minoritario, incluyendo ceras, proteínas, pectinas y otros compuestos naturales. Estos componentes son eliminados durante los procesos de refinado y purificación, tales como el desmotado, el lavado, y el blanqueo. Como resultado, se obtiene la fibra de algodón con un contenido de celulosa superior al 99% [21].

En la **Tabla 1** se muestra la composición detallada del algodón antes y después de los procesos de refinado, donde se observa cómo estos procesos eliminan las impurezas, dejando una fibra

de alta pureza. Esta pureza es esencial para garantizar la buena calidad del algodón, ya que asegura su durabilidad, suavidad y capacidad de absorción.

Tabla 1. Composición de la fibra de algodón [22]

Constituyente	Composición (Peso seco)	
	Típico %	Rango %
Celulosa	95	88-96
Proteína	1.3	1.1-1.9
Sustancias pépticas	0.9	0.7-1.2
Ceniza	1.2	0.7-1.6
Cera	0.6	0.4-1.0
Azúcar total	0.3	0.1-1.0
Ácidos Orgánicos	0.8	0.5-1.0
Pigmentos	Trazas	-
Otros	1.5	-

Las fibras celulósicas provienen de la celulosa, que es el compuesto orgánico natural más abundante y el principal componente de la pared celular de las plantas. Este polímero lineal está formado por unidades de glucosa, y las cadenas de celulosa se agrupan en haces mediante enlaces de hidrógeno formando una estructura compacta y ordenada.

El algodón se caracteriza por la presencia de grupos hidroxilo (-OH) en su estructura química, los cuales presentan cargas eléctricas negativas. Estos grupos -OH son polares y tienden a ionizarse en soluciones acuosas, liberando iones hidrógeno (H⁺) y iones hidroxilo (OH⁻).

Las cadenas poliméricas lineales están formadas por unidades de anhidro-glucosa unidas por enlaces β -1,4-glucosídicos. En el algodón, la longitud de la cadena, o grado de polimerización, puede alcanzar hasta 14000 unidades de anhidroglucosa conectadas en una sola molécula. Los enlaces de hidrógeno y las fuerzas de Van der Waals unen estos polímeros individuales, aportando una gran resistencia a la fibra de algodón. En la **Figura 8** se muestra la estructura química de la celulosa.

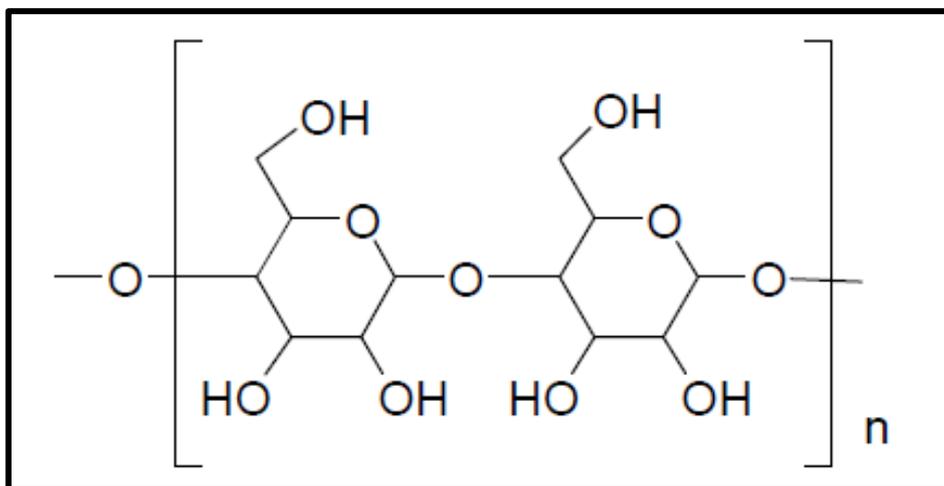


Figura 8. Estructura química de la celulosa [23]

Esta estructura contribuye a las propiedades favorables de las fibras celulósicas, como la durabilidad, la capacidad de absorción y la suavidad. Los grupos hidroxilo interactúan con el agua, lo que facilita la absorción de humedad, una característica clave en textiles. La capacidad de absorción no solo mejora la comodidad de los tejidos hechos de algodón, sino que también influye en su capacidad para ser teñidos y tratados químicamente.

1.5 Mordentado

Como se ha mencionado anteriormente, las fibras celulósicas están compuestas por grupos hidroxilo que poseen cargas eléctricas negativas. Por otro lado, el producto comercial que se va a utilizar como colorante en este estudio, que en este caso se trata de un fertilizante, también presenta carga negativa. Esto dificulta la unión del colorante al textil, ya que la carga negativa

presente en las fibras celulósicas y en el fertilizante pueden generar repulsión electrostática entre ambos, dificultando que el colorante se fije de manera uniforme y duradera en el tejido.

Ese problema de polaridad hace necesario la aplicación de sustancias químicas polarmente cargadas con cargas positivas, facilitando la interacción entre los dos elementos antes citados, haciendo posible el proceso de tintura. Para ello se va a emplear quitosano. El quitosano, es un polímero natural derivado de la quitina que contiene grupos amino positivos (NH_2^+) el cual se ha utilizado como mordiente para llevar a cabo este estudio. A continuación, en la **Figura 9** se observa la estructura química del quitosano.

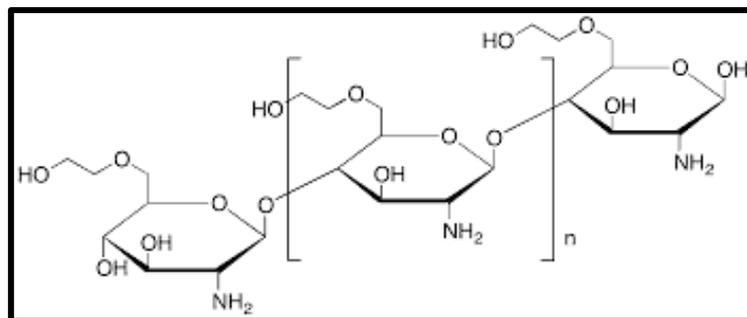


Figura 9. Estructura química del quitosano [24]

Al aplicar quitosano a las muestras de fibras celulósicas, se facilita la unión entre los grupos hidroxilo de la fibra y los grupos amino del quitosano, creando así un puente molecular que mejora la adherencia del colorante al textil.

Además de facilitar la unión del colorante, el quitosano confiere a las fibras celulósicas características adicionales, como una mayor resistencia y durabilidad en los lavados. Esto se debe a la formación de enlaces cruzados entre las cadenas de quitosano y las fibras celulósicas, que refuerzan la estructura del tejido y reducen la pérdida de color durante el lavado y el uso prolongado.

Para garantizar la eficacia y durabilidad del color, se emplean técnicas de mordentado, que se trata de un proceso comúnmente utilizado para teñir textiles con colorantes naturales. Las técnicas incluyen el premordentado, metamordentado y postmordentado, son esenciales para lograr resultados de teñido consistentes y de alta calidad. El premordentado es el método más utilizado ya que es fundamental para preparar los tejidos de algodón y garantizar una coloración uniforme y duradera en el proceso de teñido. El metamordentado se lleva a cabo después del teñido inicial y se centra en ajustes adicionales al color o la fijación del colorante. Mientras que

el postmordentado se lleva a cabo después del teñido inicial para mejorar aún más la fijación del colorante en el tejido, este proceso requiere un mayor tiempo y además produce una mayor producción de aguas residuales [25].

1.6 Proceso productivo

El proceso de producción y procesamiento de la fibra de algodón atraviesa varias etapas fundamentales que aseguran la calidad y utilidad del producto final. A continuación, se detallan dichas etapas:

- Cultivo

La primera etapa en la producción de algodón involucra el cultivo y la cosecha de las plantas, de las cuales se obtiene la materia prima esencial para la industria textil. El algodón cubre un 2,5% de la superficie total bajo riego y es el tercer cultivo que más agua consume, después del arroz y el trigo. Actualmente, la producción mundial de algodón alcanza los 25.5 millones de toneladas de granos y se cultiva en 34,8 millones de hectáreas. Los principales productores son Estados Unidos, China e India, los cuales representan casi el 60% de la producción global.

El algodón puede cultivarse en climas tropicales, subtropicales y templados, aunque es muy susceptible a las temperaturas extremas. La planta es particularmente sensible a las heladas y requiere al menos 200 días sin heladas para su desarrollo. El periodo de crecimiento total del algodón varía entre 150 y 180 días. Dependiendo de la temperatura y la variedad, se necesitan entre 50 y 85 días para la formación de los primeros botones florales, de 25 a 30 días para que aparezcan las primeras flores, y de 50 a 60 días para la floración completa [26].

Aunque el algodón puede crecer en una variedad de suelos, los mejores rendimientos se obtienen en suelos aluviales, fértiles, arcillosos, bien drenados, profundos y pesados. Los subsuelos ácidos o densos pueden limitar la penetración de las raíces. El rango aceptable de pH para el cultivo del algodón es de 5.5 a 8, siendo el óptimo de 7 a 8. Además, la planta de algodón tolera suelos salinos y se propaga mediante semillas.

La cosecha de algodón se realiza de manera mecánica utilizando máquinas recolectoras especializadas que extraen el algodón en cápsulas sin dañar la planta, como una cosechadora selectiva. Existen dos tipos principales de maquinaria empleada en este proceso: las máquinas desmotadoras que eliminan las semillas y otras impurezas del algodón crudo dejando solo la

fibra limpia y las despepitadoras que arrancan la cápsula de algodón completa y separan el algodón de las semillas mediante un proceso de desmotado [26].



Figura 10. Cosecha del algodón Desgomado [27]

Una vez cosechado, el algodón crudo pasa por el desgomado, un proceso esencial en la preparación de las fibras antes de su procesamiento. El objetivo es eliminar impurezas como tierra, semillas y hojas que puedan haber quedado adheridas a las fibras durante la cosecha y el almacenamiento.

Para llevar a cabo esta fase de desgomado, es crucial mantener ciertos parámetros controlados. La humedad del algodón debe estar alrededor del 5%, ya que un contenido de humedad más alto puede dificultar el proceso y afectar a la calidad del algodón. Además, la temperatura durante el secado debe ser cuidadosamente controlada y mantenerse por debajo de los 177 °C para evitar dañar las fibras y garantizar que mantengan su estructura compacta.

Durante el desgomado, el algodón se transporta a través de cilindros equipados con púas que lo agitan continuamente. Este movimiento ayuda a separar mecánicamente las impurezas como las hojas, suciedad o ramas que puedan estar presentes en el algodón. A medida que el algodón es arrastrado por el aire a través de estos cilindros, las impurezas más grandes son removidas, preparando las fibras para la siguiente etapa del proceso.

Después de la separación de las impurezas, el algodón pasa por una etapa adicional de limpieza y secado. En esta fase, las fibras se hacen pasar por una cinta transportadora donde se eliminan las partículas restantes y se asegura que la humedad residual sea mínima. Esta limpieza

adicional es importante para garantizar que el algodón esté completamente libre de contaminantes antes de ser procesado en la siguiente fase de producción textil. Finalmente, el tejido se lava y enjuaga para eliminar cualquier residuo restante.

- Engomado

En esta fase, las fibras de algodón se tratan con una solución de goma para fortalecerlas y facilitar su manejo durante el hilado, mejorando así su resistencia y cohesión. Este procedimiento se lleva a cabo en condiciones húmedas y a temperatura controlada, donde los hilos de algodón son sumergidos en una sustancia viscosa y adherente que cubre toda su superficie. Esta capa ayuda a mantener unidos los filamentos individuales que conforman el hilo, mejorando significativamente su resistencia y cohesión [28].

- Formación de hilo

El proceso se inicia cuando el algodón llega a la planta desmontadora. En esta etapa, el algodón pasa por una secadora que reduce y elimina la humedad de las fibras.

Posteriormente, las fibras engomadas se someten al proceso de cardado. Durante el cardado, las fibras se alinean en una dirección y se separan, formando un grupo de fibras esponjosas y uniformes. Este procedimiento es esencial para eliminar cualquier enredo o restos de impurezas que aún puedan permanecer en las fibras [29].

Previo a la formación del tejido, los hilos pueden ser sometidos a un proceso adicional de engomado para mejorar su resistencia y reducir la posibilidad de roturas durante la fabricación del tejido. Este engomado adicional asegura que los hilos mantengan su integridad estructural y proporcionen una base sólida para la creación de tejidos de alta calidad.

- Formación de tejido

Los hilos resultantes se emplean en telares o tricotadoras para la confección del tejido. En el telar, los hilos se entrelazan siguiendo un patrón específico para formar una estructura estable, luego se enrollan en bobinas para su manejo y distribución posterior.

Por otro lado, el proceso de tricotado utiliza bucles de hilo para crear un tejido más flexible y elástico en comparación con el telar. Esta técnica es ideal para producir prendas que requieren cierto grado de elasticidad [29].

- Acabado

Finalmente, la tela resultante pasa por una serie de procesos de acabado que son fundamentales para mejorar su aspecto final, textura y color. Estos procesos incluyen el lavado para eliminar cualquier residuo o impureza remanente, el blanqueado para conseguir un tono más claro y uniforme si es necesario, el teñido para añadir color según el diseño deseado, y el estampado para aplicar patrones decorativos o diseños específicos sobre la tela.

- Coloración

La tela preparada se tinte o estampa con el color deseado en una amplia gama de tonalidades para hacerlos atractivos, dependiendo de los requisitos del diseño y del mercado.

- Acabado Final

El tejido terminado se corta en secciones que luego se cosen para confeccionar prendas y otros productos textiles. En esta fase, participan artesanos expertos que emplean sus habilidades para garantizar la precisión y calidad de cada pieza. Asimismo, se utilizan técnicas de fabricación modernas, que incluyen maquinaria avanzada y tecnología automatizada, para optimizar la eficiencia y mantener altos estándares de producción.

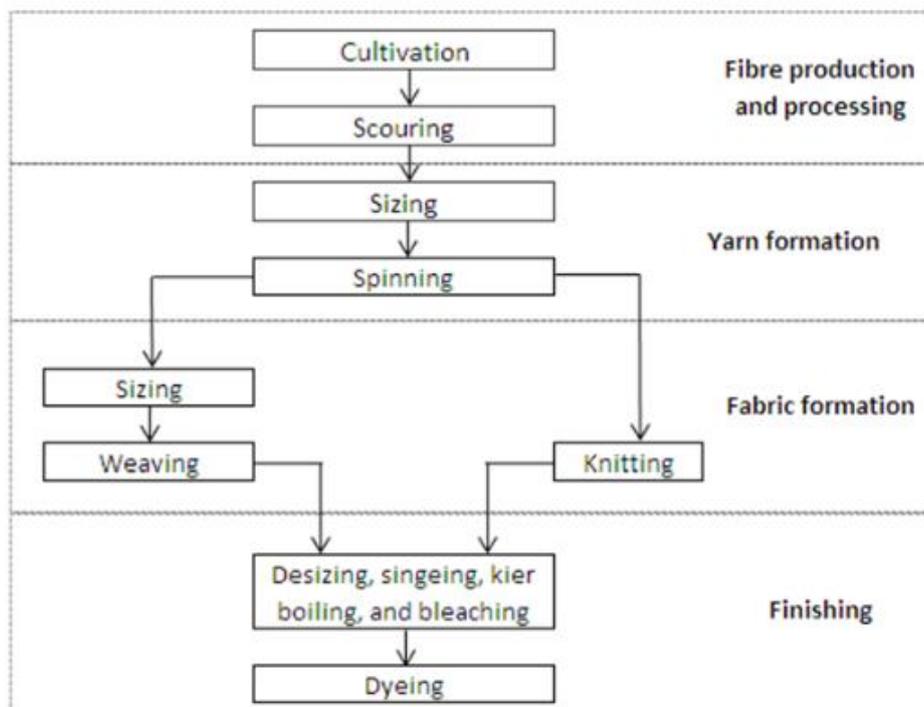


Figura 11. Diagrama de producción de textiles de algodón [18]

1.7 Colorantes sintéticos

Los colorantes son un factor imprescindible en la industria textil, permitiendo ofrecer una gran variedad de alternativas de textiles de distintos colores. Actualmente, hay una enorme diversidad de camisetas, textiles de hogar, tejanos y otros productos textiles, y una manera de destacar y diferenciar estos productos es mediante la coloración. Esto requiere disponer de una gran tipología de colores para innovar y mantener el interés de los consumidores en las nuevas modas.

La amplia gama de colorantes disponibles permite la creación de una gran variedad de productos distintos, facilitando así la innovación en el diseño textil. Los fabricantes pueden experimentar con nuevos colores y combinaciones, lo cual es esencial para mantenerse al día con las tendencias de la moda, que cambian constantemente. Los colores tienen un impacto significativo en la percepción visual y el atractivo de un producto. Un color vibrante o una combinación de colores bien seleccionada puede hacer que un producto destaque en el mercado, atrayendo la atención de los consumidores y aumentando las ventas.

La industria textil demanda una enorme cantidad de colorantes sintéticos para satisfacer las necesidades de fabricación de textiles. Esta alta demanda está impulsada por la moda rápida y la creciente diversificación de productos textiles, lo que requiere una amplia paleta de colores. Actualmente, la industria textil es la mayor consumidora de colorantes sintéticos a nivel global, existen 10 000 colorantes diferentes disponibles en el mercado actual, y con esto se estima una producción anual aproximada de 700 000 toneladas de estos compuestos sintéticos [18].

Para el proceso de tintura de los tejidos textiles, la mayoría de los colorantes utilizados son de origen sintético, los cuales poseen una alta solubilidad en el agua, lo que facilita su aplicación en los procesos de teñido. Estas sustancias, derivadas del petróleo, han transformado la industria textil al proporcionar una amplia gama de colores atractivos y duraderos. Sin embargo, su uso también provoca un impacto medioambiental elevado, ya que al proceder de recursos no renovables contribuye a la explotación de recursos fósiles y a las emisiones de gases de efecto invernadero. La alta solubilidad de estos colorantes facilita su dispersión en cuerpos de agua, contribuyendo a la contaminación hídrica. Además, su resistencia a la biodegradación implica que pueden persistir en el medio ambiente durante largos periodos, superando la capacidad de los sistemas de tratamiento de aguas residuales para eliminarlos completamente.

Además, algunos de ellos tienen una elevada toxicidad, suponiendo un riesgo incluso para la salud de los seres vivos. La exposición prolongada a ciertos colorantes puede causar problemas de salud que van desde irritaciones cutáneas hasta enfermedades más graves como el cáncer [30].

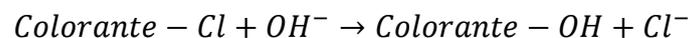
Dentro de la gama de colorantes sintéticos podemos encontrar varios tipos, a continuación, se enumeran los colorantes más utilizados en el tintado de la fibra de algodón:

- Colorantes reactivos

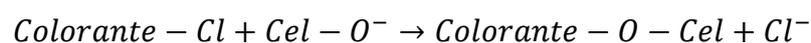
Los colorantes reactivos destacan por su uso predominante en la industria textil, representando aproximadamente el 60% de los colorantes empleados. Estos colorantes se caracterizan por su capacidad para formar una unión éter con las fibras textiles, lo que garantiza un color duradero y resistente [31]. Se aplican en la tintura de fibras celulósicas mediante tres etapas.

La primera etapa del proceso de tintura consiste en la absorción del colorante por la fibra mediante difusión, donde el colorante es capturado por las cadenas moleculares de celulosa. Esta fase se realiza en un baño con pH neutro. Si el pH del baño es demasiado alto, una mayor cantidad de colorante reaccionaría con el agua, reduciendo la cantidad de colorante absorbido por la fibra, por la propia hidrólisis del colorante. Además, se añade un electrolito al baño, ya que estos influyen en el agotamiento de los colorantes. La cantidad de sal utilizada se ajusta en relación con la concentración del colorante en el baño para optimizar la absorción y lograr una tintura uniforme.

En la segunda etapa se produce la reacción del colorante con los hidroxilos de la celulosa y del agua en el medio alcalino. La reacción se puede expresar de la siguiente manera:



Por otro lado, la celulosa contiene grupos hidroxilo que pueden reaccionar con el colorante en presencia de un medio alcalino. La reacción entre el colorante y la fibra de celulosa es:



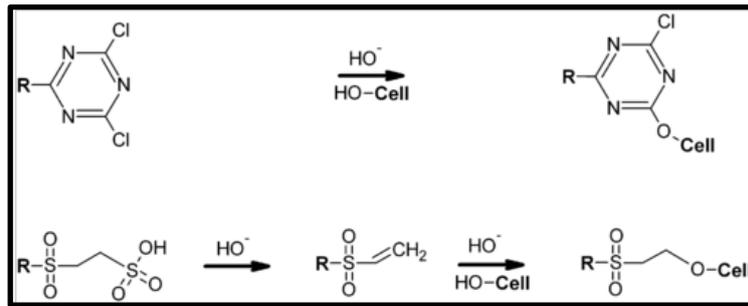


Figura 12. Reacción para la fijación de colorantes reactivos con las fibras [32]

En esta reacción, el ion cloruro Cl^- se libera, y el colorante se une covalentemente a la celulosa, formando un enlace fuerte y estable, lo que resulta en un tñido duradero y resistente al lavado.

El colorante reacciona mucho más rápidamente con la fibra que con el agua. La velocidad de reacción del colorante con la fibra es mucho mayor que con el agua. Esta diferencia se incrementa a medida que la concentración de colorante en el agua aumenta.

Por último, en la tercera etapa se produce la eliminación del colorante hidrolizado, ya que en el proceso de tñido puede ocurrir que parte del colorante no se fije covalentemente a las fibras de celulosa y quede hidrolizado en el baño de tñido. Una vez finalizado el proceso de tñido, el baño que contiene el colorante hidrolizado se desecha simplemente vaciando la máquina. Por otro lado, el colorante hidrolizado que ha quedado en la fibra se elimina mediante un lavado en caliente [1].

- Colorantes directos

Este tipo de colorantes son muy comunes para el tñido de fibras de algodón. Destacan por su gran facilidad de aplicación, lo que reduce el tiempo de procesado y disminuye los costes, convirtiéndolos en una opción económica. Puesto que la fijación a la fibra es relativamente débil, la solidez al lavado y al frote no es muy elevada. Por lo tanto, se requiere de postratamientos para mejorar sus características. Además, se dispone de una elevada variedad de colores disponibles.

- Colorantes tina

Este tipo de colorantes se caracterizan por ser insolubles en agua. Sin embargo, destacan por ofrecer una elevada solidez del color al lavado y al frote, así como un elevado factor de protección ultravioleta.

Para asegurar la fijación del colorante a la fibra, se hace mediante una reducción del colorante en medio alcalino hasta transformarse en leucoderivados hidrosolubles. Posteriormente, se le añade un oxidante para que el colorante tenga carácter hidrófobo [18].

- Colorantes sulfurosos

Estos colorantes contienen azufre en su estructura, lo cual les confiere un carácter oxidante. Este carácter oxidante permite la formación de enlaces con las fibras celulósicas, permitiendo la unión del colorante a las fibras.

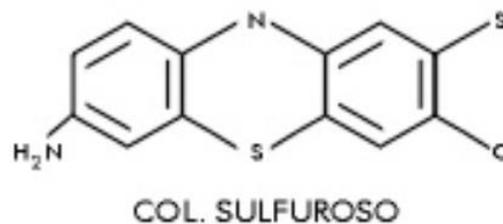


Figura 13. Colorante sulfuroso

Presentan una gran similitud con los colorantes tina, ya que se aplican a las fibras en estado reducido y se combinan con otros colorantes básicos para que sean insolubles.

1.8 Alternativas a colorantes sintéticos

Como se ha explicado en apartados anteriores, la utilización de colorantes sintéticos afecta directamente a la contaminación de aguas, por lo que actualmente la utilización de colorantes naturales en este tipo de industria está surgiendo como una alternativa sostenible y respetuosa con el medio ambiente para sustituir a los colorantes sintéticos. Cabe destacar que los colorantes naturales provienen de fuentes vegetales, animales o minerales, y se obtienen de manera más sostenible, además de ser biodegradables y menos tóxicos.

La alternativa de emplear colorantes naturales en el proceso de tintura de los tejidos textiles ofrece una serie de beneficios ambientales y sociales. En primer lugar, la producción de colorantes naturales puede reducir la dependencia de los recursos no renovables y disminuir la contaminación del agua y del suelo asociada a los colorantes sintéticos. Por otro lado, la utilización de materias primas naturales puede promover prácticas agrícolas sostenibles y apoyar a las comunidades locales que se dedican a la producción de plantas tintóreas [33].

Los consumidores también muestran un creciente interés en productos textiles que utilicen colorantes naturales, ya que perciben que son más saludables y respetuosos con el medio ambiente. El interés por los productos textiles teñidos con colorantes naturales también refleja una creciente conciencia ambiental entre los consumidores. Muchas personas son cada vez más conscientes del impacto negativo que la industria textil puede tener en el medio ambiente, y prefieren productos que minimicen este impacto.

A pesar de sus ventajas, la utilización de estos colorantes presenta algunos desafíos, como la estandarización de los procesos de teñido y la disponibilidad constante de materias primas naturales. Sin embargo, con el avance de la investigación y la tecnología, se espera que estos obstáculos se superen y que la utilización de colorantes naturales en la industria textil continúe creciendo en los próximos años, impulsando la transición hacia una industria más sostenible y responsable con el medio ambiente.

1.9 Sustancias húmicas

Las sustancias húmicas son productos orgánicos que se forman a partir de la transformación de residuos orgánicos por la actividad microbiana en el suelo. Representan una parte significativa de la materia orgánica del suelo, comprendiendo entre el 60% y el 80%. Se tratan de moléculas complejas que se estructuran en redes supramoleculares, formadas por mezclas heterogéneas de moléculas de tamaño pequeño [34].

En cuanto a la composición química, estas sustancias se caracterizan por contener diversos grupos funcionales, como núcleos aromáticos nitrogenados y bencénicos, así como grupos reactivos como hidroxilos, carboxilos, aminos y metoxilos. Los puentes de unión presentes en las sustancias húmicas, como los nitrilos, aminos y cetónicos, son esenciales para su estructura tridimensional y para la formación de complejos estables [34].

Las sustancias húmicas desempeñan un papel importante en la fertilidad del suelo y en el crecimiento de los cultivos. Tienen la capacidad de formar complejos con metales y otros nutrientes esenciales, facilitando su disponibilidad para las plantas. Contribuyen a la mejora de la fertilidad del suelo y de sus atributos físicos, químicos y biológicos. Por otro lado, regulan el crecimiento y desarrollo de los cultivos [35].

Los residuos orgánicos, ya sean de origen vegetal o animal, cuando se depositan en los suelos experimentan un proceso de transformación dominado principalmente por la actividad

microbiana. Los microorganismos, como bacterias, hongos y actinomicetos, descomponen la materia orgánica mediante la secreción de enzimas. Estas enzimas degradan los compuestos orgánicos complejos en componentes más simples. La descomposición de los residuos orgánicos puede ocurrir en condiciones aeróbicas (presencia de oxígeno) o anaeróbicas (ausencia de oxígeno), lo que da lugar a diferentes procesos de transformación.

En condiciones aeróbicas, la descomposición es más rápida y conduce principalmente a la mineralización. Durante este proceso, los microorganismos descomponen la materia orgánica en elementos básicos como dióxido de carbono, agua y amoníaco. Estos productos inorgánicos son esenciales para la nutrición de las plantas, ya que las plantas los absorben fácilmente y los utilizan para su crecimiento y desarrollo.

En cambio, en condiciones anaeróbicas, como en pantanos o biodigestores, la descomposición es más lenta y favorece la formación de sustancias húmicas. Durante este proceso, los residuos orgánicos son descompuestos parcialmente por microorganismos, formando moléculas más grandes y resistentes a la degradación.

Uno de los procesos que se forma a causa de la actividad microbiana es la mineralización. Se trata de un proceso mediante el cual los componentes orgánicos complejos son descompuestos por microorganismos en compuestos inorgánicos más simples. Durante este proceso, los microorganismos descomponen la materia orgánica en elementos básicos como dióxido de carbono, agua o amoníaco. Estos productos inorgánicos son esenciales para la nutrición de las plantas, ya que los absorben fácilmente y los emplean para su crecimiento y desarrollo.

Por otro lado, la humificación es el proceso por el cual la materia orgánica es transformada en sustancias húmicas, que se tratan de compuestos orgánicos que se encuentran en suelos y aguas, y se forman a partir de la descomposición de materia vegetal. Durante la humificación, los residuos orgánicos son descompuestos parcialmente por microorganismos, formando moléculas más grandes y resistentes a la degradación. Estas sustancias se clasifican en tres categorías principales: humina, ácidos húmicos y ácidos fúlvicos. La humina se trata de los compuestos más grandes y menos solubles, mientras que los ácidos húmicos y fúlvicos son más pequeños y solubles en agua.

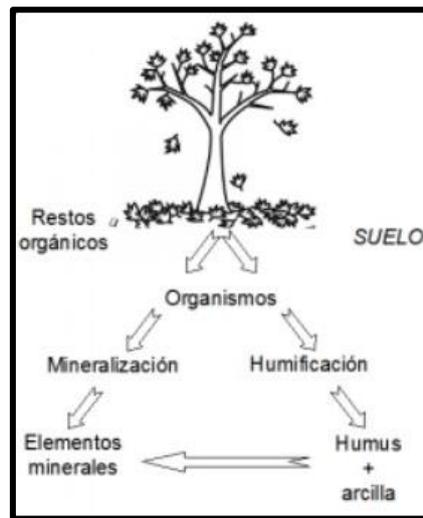


Figura 14. Descomposición de los restos orgánicos [36]

Los ácidos húmicos son moléculas grandes y complejas que se generan durante el proceso de descomposición de la materia orgánica en el suelo. Estas moléculas son de color oscuro y tienen una carga negativa, lo que les permite interactuar con los minerales presentes en el suelo. Estos mejoran la estructura del suelo, aumentan su capacidad de retención de agua y nutrientes, y además provocan la formación de agregados del suelo.

Por otro lado, los ácidos fúlvicos son moléculas más pequeñas y solubles en agua. Al igual que los ácidos húmicos, también interactúan con los minerales del suelo y tienen una carga negativa similar. Los ácidos fúlvicos son excelentes transportadores de nutrientes, ya que pueden formar complejos con minerales y metales, facilitando su absorción por parte de las plantas. El tamaño reducido de estas moléculas presenta como ventaja el rápido acceso a las raíces de las plantas, transportando minerales directamente a las células de la planta [37].

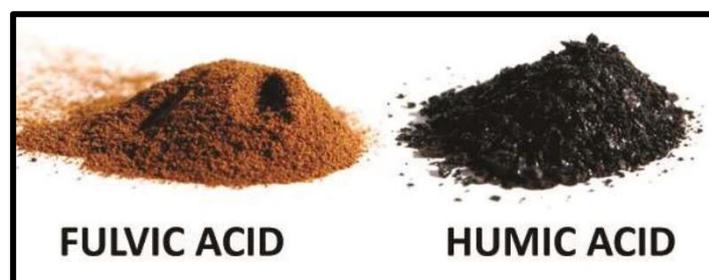


Figura 15. Ácidos húmicos y fúlvicos [38]

La humina, siendo la fracción más insoluble de las sustancias húmicas, está compuesta principalmente por polímeros de carbono y es rica en compuestos aromáticos. Aunque es menos

soluble que los ácidos húmicos y fúlvicos, la humina juega un papel crucial en la retención de agua y nutrientes en el suelo, así como en la estabilización de la materia orgánica.

1.10 Emplear extractos húmicos como colorantes textiles

El uso de extractos húmicos como colorantes de fibras textiles es una alternativa natural y sostenible para la industria textil, ya que se trata de productos biodegradables, lo que minimiza el impacto ambiental de los residuos generados en el proceso de tintura. Los extractos húmicos se obtienen a partir de la descomposición de materia orgánica y son ricos en ácidos húmicos y fúlvicos. Al provenir de fuentes naturales, los extractos húmicos son una alternativa ecológica frente a los colorantes sintéticos, reduciendo la huella ambiental de la industria textil.

Además de su contribución ambiental, los extractos húmicos presentan menos riesgos para la salud de los seres humanos, ya que no contienen sustancias tóxicas que a menudo se encuentran en algunos colorantes sintéticos. Esto los convierte en una opción más segura para el uso generalizado en la industria textil.

Los extractos húmicos pueden proporcionar una gama de colores que varían desde tonos marrones y negros hasta verdes y amarillos, dependiendo de su origen y procesamiento. Aunque los colores obtenidos pueden ser menos brillantes que los de algunos colorantes sintéticos, los extractos húmicos proporcionan una buena solidez al lavado y a la luz, asegurando la durabilidad de los textiles teñidos.

El proceso de teñido con extractos húmicos sigue métodos tradicionales de inmersión en un baño de teñido, donde la fibra absorbe los colorantes presentes en el extracto. Este proceso puede ajustarse mediante el control del pH y la temperatura para optimizar la fijación del color.

El uso de extractos húmicos en la tintura textil no solo contribuye a una reducción de los residuos tóxicos, sino que también fomenta la utilización de recursos renovables y la promoción de una economía circular en la industria. La integración de estos colorantes naturales apoya las investigaciones hacia una producción más sostenible y responsable, alineándose con las crecientes demandas de los consumidores por productos eco-amigables.

1.11 Factor de protección ultravioleta en los tejidos textiles

La radiación ultravioleta (UV) forma parte del espectro electromagnético y se sitúa entre la luz visible y los rayos X. Esta forma de energía se caracteriza por su capacidad para interactuar de

intensamente con la materia, especialmente con los tejidos biológicos. Se divide en varios tipos, siendo los más relevantes para la salud humana el UVB y el UVA. También existe el UVC, con longitudes de onda entre 100 y 280 nm, este es casi completamente absorbido por la atmósfera terrestre y no llega a la superficie en cantidades significativas.

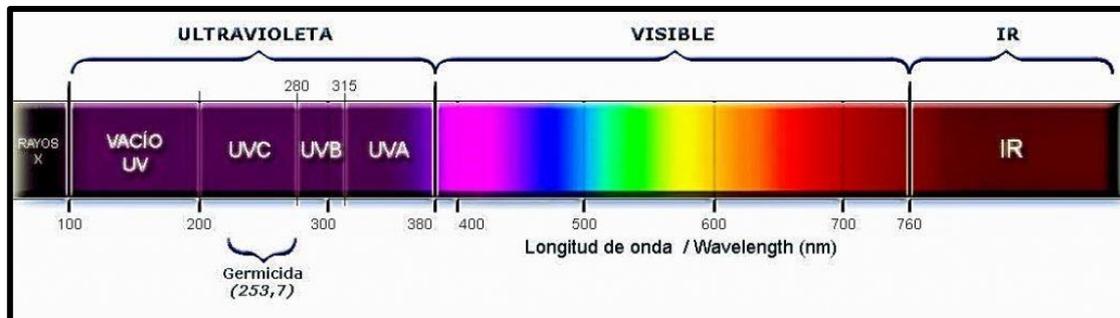


Figura 16. Espectro electromagnético [39]

- Radiación UVB (280-320 nm)

La radiación UVB abarca longitudes de onda entre 280 y 320 nanómetros. Aunque solo una pequeña fracción de esta radiación alcanza la superficie terrestre debido a la absorción por la capa de ozono, su impacto es significativo. En fotobiología, el UVB es de particular interés porque puede causar daños en el ADN de los organismos vivos, lo que lleva a mutaciones y a problemas de salud como el cáncer de piel. La capacidad del UVB para inducir la síntesis de vitamina D en la piel también es notable, aunque se debe tener cuidado con la exposición excesiva.

- Radiación UVA (320-400 nm)

La radiación UVA, que comprende longitudes de onda entre 320 y 400 nanómetros, es la más cercana a la luz visible. Esta radiación llega en gran medida a la superficie terrestre y es responsable de numerosos procesos fotoquímicos naturales. El UVA penetra más profundamente en la piel en comparación con el UVB y contribuye al envejecimiento prematuro de la piel y a la formación de algunos tipos de cáncer. Además, el UVA se utiliza en aplicaciones industriales y médicas, como en la curación de resinas y en ciertos tratamientos dermatológicos. A menudo se le denomina "luz negra" debido a su capacidad para hacer brillar ciertos materiales en la oscuridad.

El cáncer de piel se ha convertido en uno de los tipos de cáncer más frecuentes en la actualidad, afectando a un número significativo de personas en todo el mundo. Según la Asociación

Española de Dermatología y Venereología (AEDV), los casos de este tipo de cáncer han aumentado considerablemente, con un incremento de aproximadamente un 40% en los últimos cuatro años. Este dato muestra la urgente necesidad de implementar soluciones efectivas para prevenir y disminuir los casos asociados a este tipo de enfermedad [40].

Es conocido que uno de los principales factores de riesgo es la exposición excesiva de la piel frente a la radiación ultravioleta emitida por el sol. Este riesgo se ve incrementado en personas que pasan mucho tiempo al aire libre sin la protección adecuada, especialmente durante las horas del día en que la radiación solar es más intensa.

Para disminuir este riesgo, es importante adoptar medidas preventivas para proteger la piel. Una de las formas más efectivas de hacerlo es usando de cremas fotoprotectoras, que absorben la radiación UV, reduciendo así su impacto sobre la piel. Además, se recomienda el uso de ropa adecuada que cubra la piel durante la exposición solar.

El UVB, que tiene longitudes de onda entre 280 y 320 nanómetros (nm), es conocido por su capacidad de penetrar las capas externas de la piel y causar daños directos en el ADN celular. Esto puede desencadenar una serie de respuestas celulares, como la apoptosis (muerte celular programada), la mutación genética y la supresión del sistema inmunológico. Estos efectos pueden aumentar el riesgo de desarrollar cáncer de piel, ya que las mutaciones en el ADN pueden llevar al crecimiento descontrolado de células cancerosas.

Por otro lado, el UVA, con longitudes de onda entre 320 y 400 nm, tiene una capacidad de penetración más profunda en la piel. Aunque no causa daños directos en el ADN como el UVB, puede inducir la formación de radicales libres en las células, lo que puede contribuir al envejecimiento prematuro de la piel y aumentar el riesgo de cáncer de piel a largo plazo. Además, el UVA es responsable de activar procesos fotoquímicos naturales en la piel, como la producción de vitamina D y la síntesis de melanina.

Es importante protegerse de ambos tipos de radiación ultravioleta para evitar daños en la piel y otros tejidos biológicos. La exposición excesiva a la radiación UV puede tener efectos adversos, como quemaduras solares, envejecimiento prematuro de la piel, supresión del sistema inmunológico y aumento del riesgo de cáncer de piel. Por lo tanto, se recomienda utilizar protector solar con un amplio espectro de protección que proteja contra tanto el UVB como el UVA, así como adoptar medidas adicionales de protección, como usar ropa protectora y evitar la exposición al sol durante las horas de máxima intensidad.

Para garantizar que los textiles proporcionen una protección adecuada, es fundamental seguir la regulación australiana/neozelandesa, la cual establece un sistema de clasificación de los tejidos en función de sus características de protección solar [41]. Este sistema permite determinar la eficacia de los tejidos para bloquear la radiación UV, asegurando que cumplan con los estándares necesarios para proteger contra los efectos dañinos de la radiación ultravioleta. La clasificación específica de los tejidos según sus propiedades de protección solar se puede observar en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Clasificación de tejidos en función de su UPF (Norma AS/NZ 4399: 1996)

Rango UPF de la muestra	Categoría de protección UVR	Transmisión UVR efectiva (%)	Índice UPF
15 a 24	Buena protección	6,7 a 4,2	15, 20
25 a 39	Muy buena protección	4,1 a 2,6	25, 30, 35
40 a 50, 50+	Protección excelente	$\leq 2,5$	40, 45, 50, 50+

Este sistema de clasificación asegura que los consumidores puedan seleccionar tejidos que ofrezcan la protección adecuada contra la radiación UV, ayudando así a prevenir el daño solar y reducir el riesgo de desarrollar cáncer de piel.

La educación y la concienciación sobre la importancia de proteger la piel del sol son cruciales para reducir la incidencia del cáncer de piel. Las campañas de salud pública pueden desempeñar un papel vital en la difusión de esta información y en la promoción de hábitos saludables que protejan la piel.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

El objetivo de este proyecto es desarrollar colorantes textiles naturales utilizando fertilizantes basados en sustancias húmicas, los cuales se aplicarán en tejidos de algodón. Para ello, se ha llevado a cabo un diseño experimental que incluye una serie de ensayos donde se varía el pH, la temperatura y la concentración, con el fin de estudiar y evaluar la eficacia de los colorantes desarrollados para alcanzar las condiciones óptimas.

Además, el proyecto pretende encontrar una alternativa sostenible a los colorantes sintéticos utilizados en la industria textil. El objetivo es reducir el impacto ambiental de la producción textil empleando colorantes naturales y procesos más respetuosos con el medio ambiente. Este enfoque no solo busca innovar en la producción de colorantes textiles, sino también promover un cambio positivo hacia prácticas más sostenibles dentro del sector textil.

2.2 Objetivos específicos

Para cumplir el objetivo principal, se deberán alcanzar los siguientes objetivos específicos:

- Adquirir conocimientos sobre los procesos de tintura, colorantes naturales y técnicas de tintura, lo que permitirá obtener una comprensión total del proyecto.
- Hacer pruebas previas para comprobar que el producto se puede utilizar como colorante en muestras textiles, seleccionando el tipo de tejido.
- Seleccionar el tipo de mordentado que mejor resultados obtiene, para ello se realizarán unas pruebas preliminares con diferentes mordientes.
- Realizar un diseño experimental para estudiar el efecto de tres variables clave: el pH, la temperatura y la concentración del producto comercial utilizado.
- Determinar los parámetros del índice de protección UV y el color alcanzado en las muestras de tejido de algodón.
- Garantizar que los colorantes producidos cumplan con los estándares de calidad necesarios para su aplicación en textiles de algodón, asegurando que los tejidos no pierdan sus propiedades de color, manteniendo su durabilidad y seguridad para los consumidores.

- Identificar las condiciones óptimas para suponer un proceso de escalado, a fin de evaluar la viabilidad del proceso a nivel industrial.
- Realizar una evaluación económica para determinar la posible viabilidad de este proceso respecto a los métodos tradicionales.

2.3 Objetivos de desarrollo sostenible

Este estudio contribuye directamente a varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por las Naciones Unidas. Estos objetivos fueron publicados en 2015 y están en el centro de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Según el Real Decreto 452/2020, de 10 de marzo, que desarrolla la estructura orgánica básica del Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030, se fijan las funciones de la Secretaría de Estado para la Agenda 2030, la cual es responsable de coordinar, impulsar y supervisar la implementación de los ODS en España.



Figura 17. Objetivos de desarrollo sostenible

En primer lugar, en cuanto al ODS 6, que se centra en garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos, este proyecto tiene un impacto positivo al reducir la contaminación del agua. Los colorantes sintéticos utilizados en la industria textil contribuyen a gran escala a la contaminación del agua debido a los químicos tóxicos que liberan. Al sustituir estos colorantes por alternativas naturales como son los fertilizantes basados en sustancias húmicas, se disminuye la carga de contaminantes presentes en el agua, promoviendo una gestión más sostenible de los recursos hídricos.

En el ámbito del ODS 9, relacionado con la industria, la innovación y la infraestructura, se impulsa el desarrollo de tecnologías más sostenibles en la industria textil. El uso de sustancias húmicas como colorantes textiles no solo representa una alternativa ecológica, sino que también fomenta la investigación y el desarrollo de prácticas más respetuosas con el medio ambiente.

Por otro lado, el ODS 12, que busca promover patrones de producción y consumo responsables, se enfoca en la reducción de desechos. Al aprovechar los subproductos de la producción de fertilizantes basados en sustancias húmicas para la tintura de textiles, se contribuye a reducir la generación de residuos y promover un ciclo de vida más sostenible para los materiales textiles.

Finalmente, en lo cuanto al ODS 13, centrado en la acción por el clima, este estudio tiene un impacto significativo en el medio ambiente. La posibilidad de sustituir los colorantes sintéticos por naturales no solo contribuye a reducir la huella de carbono de la cadena del sector textil, sino que también disminuye la contaminación del agua y del suelo, asociada a la producción y el uso de colorantes sintéticos. Estos colorantes sintéticos, representan una preocupación ambiental significativa debido a sus efectos tóxicos y persistentes en el medio ambiente. Al optar por el empleo de colorantes naturales, se promueve una producción más sostenible.

3 Metodología empleada

3.1 Materiales y reactivos

El producto comercial utilizado como colorante en el presente estudio es el LOMBRICO 24% A.H., un bioestimulante adquirido del proveedor Alfredo Iñesta. El producto se caracteriza por contener en su fórmula una elevada concentración de ácidos fúlvicos, con una densidad de 1.2 mg/L y un pH de 5 medido al 100% debido a su base acuosa.

Según el Real Decreto 506/2013, se clasifica como abono órgano-mineral NK líquido. De acuerdo con la normativa, un abono órgano-mineral es aquel cuya función principal es aportar nutrientes para las plantas, los cuales son de origen orgánico y mineral, y se obtiene por mezcla o combinación química de abonos inorgánicos con materiales carbonados de origen animal, vegetal o abonos orgánicos.

En la **Tabla 3**, podemos observar que al analizar el contenido de nutrientes de este producto cumple con las especificaciones establecidas en el RD 506/2013.

Tabla 3. Contenido declarado producto comercial

Nutrientes	Contenido mínimo (%)	Contenido declarado (%)
N + K ₂ O	6	7
N total	2	2
N orgánico	1	2
K ₂ O	2	5
C orgánico	4	24.4

Por otro lado, se ha empleado un tejido de calada 100% de algodón, el cual presenta una estructura de sarga y un peso de 210 g/m².

Para mejorar la afinidad entre el colorante y la fibra celulósica, se ha empleado quitosano de medio peso molecular (Sigma Aldrich) como mordente para tratar los tejidos. El quitosano es un polímero natural derivado de la quitina, que contiene grupos amino positivos (NH_2^+). Al aplicar quitosano a las muestras de fibras celulósicas, se facilita la unión entre los grupos hidroxilo de la fibra y los grupos amino del quitosano, creando así un puente molecular que mejora la adherencia del colorante al textil [42].

A su vez, el quitosano se ha utilizado en medio ácido para mejorar la protonación de sus múltiples grupos amino en su estructura polimérica. Este proceso de protonación aumenta la polaridad de la molécula y genera repulsiones electrostáticas que facilitan su dispersión en el medio. Para ello se ha preparado una solución acuosa de ácido acético para disolver el quitosano. Esto permite que el quitosano se disperse de manera homogénea, garantizando así una aplicación uniforme sobre las fibras textiles.



Figura 18. Mordente

Por otro lado, para el ajuste del pH se ha utilizado hidróxido de sodio (NaOH) 0.1 M como base para poder regular la muestra cuando se necesitaba corregir su acidez. Por el contrario, para corregir el carácter básico se ha utilizado ácido sulfúrico (H_2SO_4) 0.1 M. En la **Figura 19** y en la **Figura 20** se observan los productos utilizados.

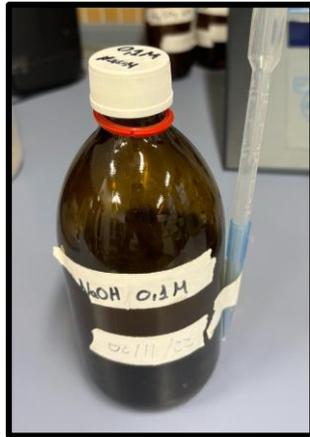


Figura 19. NaOH 0.1 M

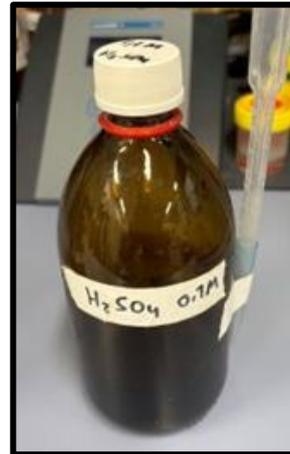


Figura 20. H₂SO₄ 0.1 M

Por último, para el ensayo de solidez del color al lavado se ha utilizado como detergente el producto Kieralon de ECO, de la empresa BASF S.A:



Figura 21. Detergente

3.2 Equipos

En esta sección se describirán los equipos empleados para llevar a cabo el proceso de tintura de las muestras textiles en el laboratorio y para caracterizar los resultados obtenidos.

3.2.1 Sistema de purificación de agua

Se ha utilizado un sistema de purificación del agua de la empresa Millipore Ibérica, S.A. (**Figura 22**), está diseñado para suministrar agua purificada de alta calidad a partir de agua de red. Este equipo consta de varias etapas clave para asegurar la pureza del agua.



Figura 22. Sistema de purificación de agua

En primer lugar, el agua del grifo es sometida a un proceso de pretratamiento en un módulo especializado. Aquí, se eliminan de manera efectiva las partículas, coloides, cloro libre y dureza presentes en el agua inicial.

Posteriormente, el agua pretratada pasa a través de una membrana de ósmosis inversa. Esta membrana es altamente eficiente y tiene la capacidad de eliminar hasta el 99% de todos los contaminantes iónicos y orgánicos, así como microorganismos y partículas presentes en el agua. Este proceso asegura que el agua purificada cumpla con los estándares más exigentes de calidad y pureza requeridos para diversos usos industriales y científicos.

3.2.2 Termorreactor

Se ha empleado el termorreactor modelo TR 620 Spectroquant (**Figura 23**), el cual cuenta con 2 zonas calefactoras que permiten ajustar la temperatura.



Figura 23. Termorreactor

3.2.3 Fotómetro

Se ha utilizado el fotómetro Spectroquant Nova 60 que se muestra en la **Figura 24**. Este dispositivo utiliza 12 filtros en técnica de matriz para cubrir las longitudes de onda analíticas más relevantes. Permite la medición de las absorbancias de las muestras y ofrece resultados en mgO_2/L .

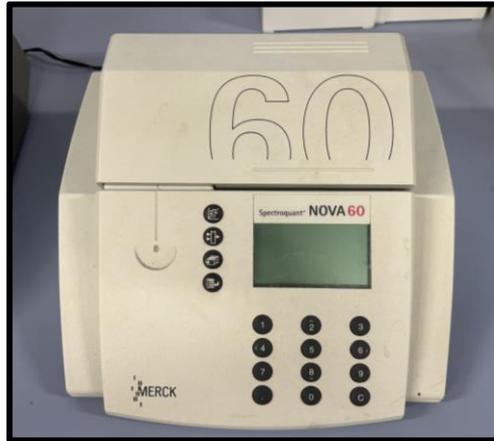


Figura 24. Fotómetro

3.2.4 Analizador de carbono orgánico total (TOC)

En la **Figura 25**, se puede observar el equipo Shimadzu modelo TOC-V CSH. Este permite analizar el carbono orgánico total presente en una muestra líquida o sólida. Está formado por una válvula de inyección automática, un horno que alcanza $950\text{ }^{\circ}\text{C}$, un catalizador de platino sobre un soporte de alúmina, y un deshumidificador. Contiene un detector de infrarrojo conectado a un registrador para medir la concentración de CO_2 producido por la combustión catalítica.



Figura 25. Analizador de TOC

Además, contiene un generador de ozono que permite medir el nitrógeno total. El ozono reacciona con los compuestos nitrogenados presentes en la muestra, y la quimioluminiscencia resultante se detecta en el rango de 1200 nm en el espectro infrarrojo.

3.2.5 Medición del pH

Para ajustar el pH de las sustancias húmicas se ha utilizado el medidor de pH Mettler Toledo. Este dispositivo permite medir la acidez o alcalinidad de una solución con alta precisión. El funcionamiento del medidor se basa en la medición de la diferencia de potencial eléctrico entre el electrodo de pH y el electrodo de referencia. Esta diferencia de potencial es proporcional a la actividad de los iones H^+ en la solución, la cual se mide en una escala de pH de 0 a 14.



Figura 26. pHmetro

Además, la medición de pH puede verse afectada por la temperatura de la solución, ya que un incremento en la temperatura se traduce en una disminución del pH. Esto se debe a que la actividad de los iones se ve afectada, provocando que el agua se disocie en iones H^+ y OH^- . Este modelo dispone de un sensor de temperatura incorporado que ajusta automáticamente las lecturas para compensar los efectos de la temperatura, garantizando así mediciones más precisas.

3.2.6 Espectrofotómetro

Un espectrofotómetro es un instrumento utilizado en análisis químicos diseñado para medir la intensidad de la luz absorbida al atravesar una solución a diferentes longitudes de onda. El equipo proyecta un haz de luz a través de la muestra y mide la cantidad de luz absorbida en cada longitud de onda.

Para la medición de la absorbancia de la muestra comercial de sustancias húmicas, se ha utilizado el espectrofotómetro UH5300 de la marca Hitachi, como se muestra en la **Figura 27**.



Figura 27. Espectrofotómetro

3.2.7 Conductímetro

La conductividad eléctrica es una medida de la capacidad de una solución para conducir electricidad. Esta propiedad depende de la presencia de iones en la solución; cuanto mayor sea la concentración de iones, mayor será la conductividad.

Para medir la conductividad eléctrica del producto comercial se ha utilizado el conductímetro Crison CM 35, se trata de un instrumento diseñado para medir la conductividad eléctrica de una solución. Su display LCD retroiluminado permite la lectura de la conductividad específica a la temperatura de referencia seleccionada, la temperatura real de la muestra, así como la duración de la medida. Tiene un error de medida de $\leq 0.5\%$.



Figura 28. Conductímetro

3.2.8 *Agitador magnético*

En la **Figura 29** se muestra el agitador magnético utilizado, se trata de un dispositivo esencial en laboratorios para mezclar líquidos de manera continua y uniforme. Este utiliza una mosca como barra magnética que se introduce en el interior de la muestra para crear interacciones con la placa donde se coloca el recipiente y generar un movimiento rotacional.

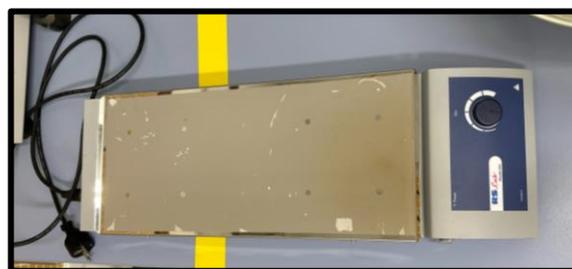


Figura 29. Agitador magnético

3.2.9 *Rodillos exprimidores*

Una vez que la muestra ha sido completamente sumergida en el mordiente, se procede a utilizar los rodillos exprimidores que se muestran en la **Figura 30** para eliminar el exceso de baño. Estos rodillos ejercen una presión controlada sobre la muestra, extrayendo el sobrante de quitosano y garantizando que la cantidad residual sea la adecuada para los siguientes pasos del proceso



Figura 30. Rodillos exprimidores

3.2.10 Estufa

Para eliminar el exceso de agua de las muestras tratadas que no se puede eliminar en los rodillos exprimidores, se ha utilizado una estufa como se muestra en la **Figura 31**. Este paso asegura una preparación adecuada para etapas posteriores del proceso.



Figura 31. Estufa

3.2.11 Sistema de tintura

Los tejidos han sido sometidos a un proceso de tintura mediante agotamiento en un entorno cerrado utilizando el equipo Testtherm tipo 9S (Talcatex, SA) que se muestra en la **Figura 32**.

La tintura se realiza en un baño térmico contenido dentro del equipo, a temperaturas controladas.



Figura 32. Equipo de tintura

Su interior está formado por un baño de polietilenglicol, donde se introducen los cilindros que contienen las muestras textiles con el tinte como se muestra en la **Figura 33**:

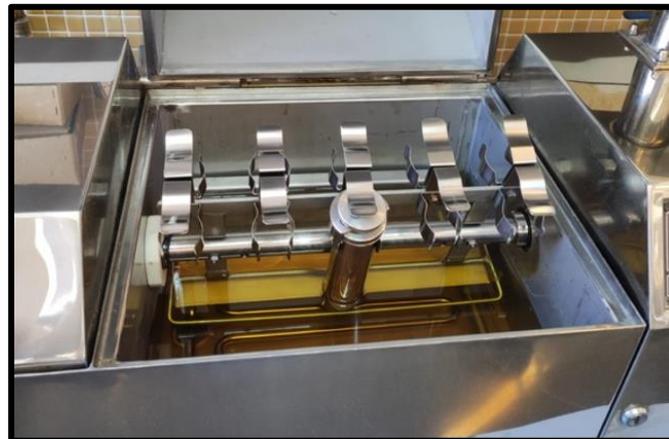


Figura 33. Interior baño de tintura

La fijación del colorante en las fibras ocurre debido a las fuerzas de afinidad entre el colorante y la fibra, lo que permite que el colorante pase a la fibra hasta saturarla y quedar fijada en ella.

3.2.12 Espectrofotómetro de reflexión

El espectrofotómetro de reflexión es un instrumento utilizado para medir la cantidad de luz reflejada por una superficie en relación con diferentes longitudes de onda. En este estudio, se ha utilizado el modelo CM-3600 d de la empresa Minolta, ilustrado en la **Figura 34**.



Figura 34. Espectrofotómetro de reflexión

Este tipo de espectrofotómetro se utiliza para analizar y determinar el color de muestras que pueden ser opacas, transparentes o translúcidas, abarcando una amplia gama de materiales como textiles, plásticos, pinturas y más.

El funcionamiento del equipo consiste en emitir un haz de luz sobre la superficie de la muestra y a través de un detector, mide y registra la intensidad de la luz reflejada en cada longitud de onda específica.

3.2.13 Lámpara emisión UV

Para determinar el factor de protección ultravioleta, se ha utilizado el modelo VL-6C de Vilber Lourmat, una lámpara de emisión UV diseñada para irradiar a diferentes longitudes de onda.



Figura 35. Lámpara emisión UV

Esta lámpara está diseñada para proporcionar irradiación luz a longitudes de onda específicas. Sin embargo, existe la posibilidad de cambiar los tubos y de esta manera puede irradiar a 254 nm, 312 nm (UVB) y 365 nm (UVA). Además, cuenta con un filtro que reduce la interferencia de la luz blanca, mejorando la detección de fluorescencias débiles y asegurando mediciones más precisas.

3.2.14 Medidor de irradiación

Para llevar a cabo la medición de la irradiación en los tejidos, se ha utilizado el equipo Delta OHM HD2102.2, el cual se muestra en la **Figura 36**. Este equipo está equipado con una sonda que es capaz de registrar varios parámetros: la iluminación, la luminancia, el PAR y la irradiación (en las zonas de espectro VIS-NIR, UVA, UVB y UVC).



Figura 36. Medidor de irradiación

En este caso, solamente se va a realizar la medición de la irradiación en las zonas del espectro UVA y UVB. Para asegurar la precisión de las mediciones, se empleará una caja de cartón para evitar interferencias de la luz externa en la medición.

3.2.15 Crockmeter

Para llevar a cabo el ensayo de solidez del color al frote, se ha utilizado el Crockmeter según la norma UNE-EN ISO 105-X12=2016. Este equipo está diseñado para ensayar la solidez del color al frote. El testigo de algodón se ajusta a la NORMA ISO-F09, siendo un tejido de algodón desengomado, blanqueado y sin apresto, cortado en piezas cuadradas de $50 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ de lado.

El Crockmeter utiliza una clavija con un cilindro de (16 ± 0.1) mm de diámetro, que realiza un movimiento de vaivén en línea recta a lo largo de una longitud de (104 ± 3) mm sobre la muestra, aplicando una fuerza de (9 ± 0.2) N.

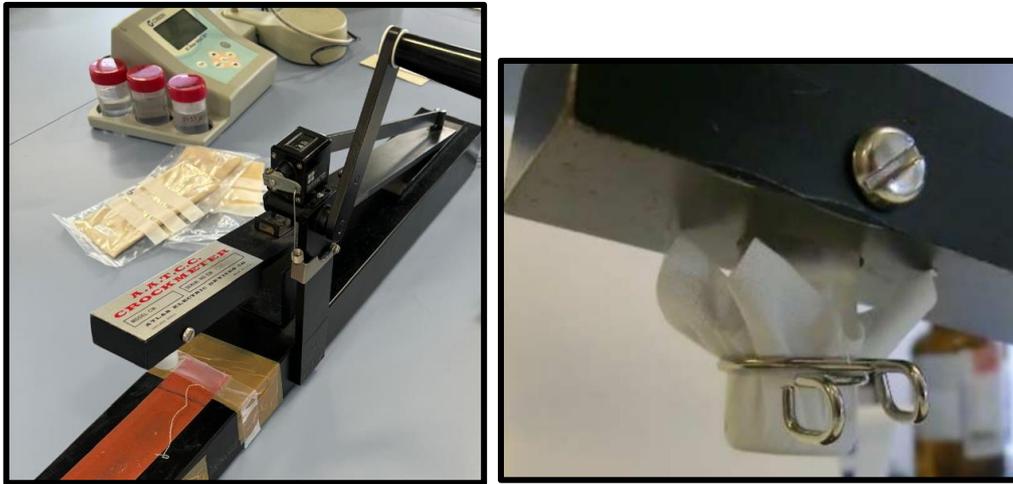


Figura 37. Crockmeter

3.2.16 Solidez del color al lavado

Para llevar a cabo el ensayo de solidez del color al lavado se ha utilizado el equipo de teñido de la marca FONG'S. Este equipo simula el proceso de lavado de textil, tanto a nivel doméstico como comercial. Para realizar este ensayo se ha seguido la norma UNE-EN ISO 105-C06:2010, en concreto la parte C06: Solidez del color al lavado doméstico y comercial.



Figura 38. Lavadora FONG's

3.3 Diseño experimental

Este trabajo abarca una gran variedad de ensayos, por lo que para determinar cuáles son los óptimos se ha utilizado una matriz de Döehlert. La matriz de Döehlert se trata de una herramienta muy útil en el diseño de experimentos, la cual permite distribuir de manera óptima los puntos experimentales dentro de un espacio de diseño establecido [42].

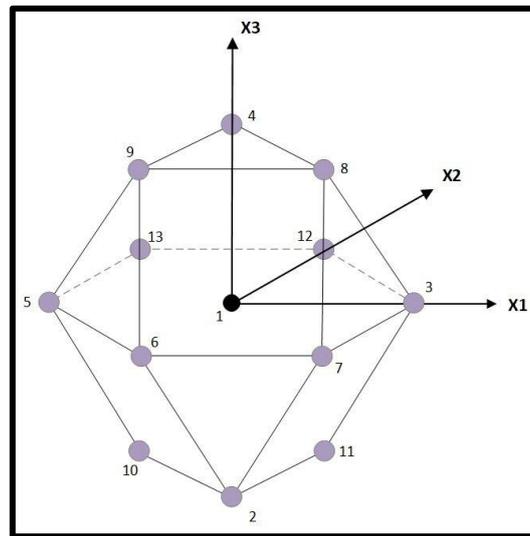


Figura 39. Diseño de Döehlert para la optimización de tres variables [43]

Esta matriz, permite identificar los ensayos que proporcionan los resultados más relevantes y significativos distribuyendo los puntos de manera equitativa para maximizar la información obtenida de cada experimento.

En este caso, se han considerado tres variables influyentes para maximizar la eficiencia de las técnicas analíticas. Por lo tanto, se ha optado por un diseño experimental multivariante, utilizando dicha matriz para investigar las interacciones entre las múltiples variables. En concreto, se han evaluado las variables del pH, las concentraciones de sustancias húmicas [SH] y la temperatura para el proceso de tintura, las cuales son las más relevantes en el desarrollo de este estudio.

La distribución de las variables se realizó según la matriz Döehlert de códigos para un diseño de 3 variables, en la **Tabla 4** se puede observar la matriz utilizada.

Tabla 4. Matriz Döehlert de códigos para un diseño de 3 variables

Experimentos	A	B	C
1	0	0	0
2	1	0	0
3	0.5	0.866	0
4	0.5	0.289	0.817
5	-1	0	0
6	-0.5	-0.866	0
7	-0.5	-0.289	-0.817
8	0.5	-0.866	0
9	0.5	-0.289	-0.817
10	-0.5	0.866	0
11	0	0.577	-0.817
12	-0.5	0.289	0.817
13	0	-0.577	0.817

Para la medición del pH se ha establecido un rango de trabajo de 5 a 9. La concentración de sustancias húmicas se ha estudiado en valores que oscilan entre 500 y 3500 mg/L. Por último, la temperatura del equipo de tintura se ha establecido en un intervalo de 65 a 95 °C.

Las tres variables independientes del objetivo de estudio se han codificado como se muestra en la **Tabla 5**. A partir de esta codificación, se han obtenido los valores a ensayar a partir de la siguiente ecuación:

$$C_i = \left\{ \frac{X_i - X_i^0}{\Delta X_i} \right\} \alpha \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde C_i es el valor codificado, α es el valor límite de cada codificado, ΔX_i es el incremento en el valor real, X_i^0 es el valor central real y X_i es el valor experimental

La **Tabla 5** muestra los códigos asignados a las variables estudiadas en la optimización del proceso de tintura de tejidos de algodón. Cada variable ha sido estudiada a diferentes niveles con el objetivo de determinar los valores óptimos. En concreto, se han definido 5 niveles para la variable del pH, 7 niveles para la concentración de las sustancias húmicas y 3 niveles para la temperatura.

Tabla 5. Codificación de los factores estudiados en la optimización del proceso de tintura

pH	-	(-1)	(-0.5)	(0)	(0.5)	(1)	-
	-	5	6	7	8	9	-
[SH]	(-0.866)	(-0.577)	(-0.289)	0	0.289	0.577	0.866
	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500
T	-	-	(-0.817)	0	0.817	-	-
	-	-	65	80	95	-	-

A modo de resumen, se adjuntan en la **Tabla 6** los ensayos que finalmente se van a llevar a cabo a lo largo de este estudio:

Tabla 6. Diseño experimental

Experimento	X1 (5 niveles)	X1 (7 niveles)	X3 (3 niveles)
	pH	[SH]	T
1	7	2000	80
2	9	2000	80
3	8	3500	80
4	8	2500	95
5	5	2000	80
6	6	500	80
7	6	1500	65
8	8	500	80
9	8	1500	65
10	6	3500	80
11	7	3000	65

12	6	2500	95
13	7	1000	95
14	7	2000	80
15	7	2000	80

3.4 Procedimiento experimental

3.4.1 Caracterización del producto comercial

La caracterización del producto comercial incluye el análisis de varios parámetros importantes. Estos parámetros permiten entender mejor la composición y el comportamiento del producto en determinadas condiciones de uso.

Por un lado, se ha determinado la demanda química de oxígeno (DQO) que mide la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar completamente la materia orgánica presente en el agua. Para ello, primero se ha colocado el producto comercial en tubos Corning, los cuales se han introducido en un termorreactor modelo TR 620 Spectroquant. Este proceso se realiza para oxidar las sustancias orgánicas presentes, permitiendo así una medición precisa de la DQO. Después del tratamiento térmico de la muestra, se han analizado los resultados utilizando el fotómetro Spectroquant Nova 60.

Por otro lado, se ha determinado el carbono orgánico total (TOC), este indica la cantidad de carbono presente en compuestos orgánicos en una muestra, que se convierte en CO₂ mediante pirólisis de la muestra. Para ello, se ha empleado el equipo Shimadzu modelo TOC-V CSH. Se introduce la muestra mediante la válvula de inyección y el equipo detecta la cantidad de CO₂, a partir de la cual calcula la concentración de carbono orgánico total presente en la muestra.

El pH es una medida de la acidez o alcalinidad de una solución acuosa. La escala de pH va de 0 a 14, donde 7 corresponde a una medida de pH neutro. Valores por debajo de 7 indican acidez, y valores por encima de 7 indican alcalinidad. Para medir el pH de la muestra comercial se ha utilizado el medidor de pH Mettler Toledo. Es importante asegurarse de que el electrodo esté

limpio y en buenas condiciones. Si es necesario, se debe limpiar con una solución adecuada. A continuación, se calibra el medidor utilizando soluciones buffer estándar de pH conocido. Para ello, se sumerge el electrodo en una solución buffer y se ajusta el medidor para que coincida con el valor del buffer. Este proceso se repite con otras soluciones buffer de distinto pH para asegurar una calibración precisa en todo el rango de medición. Una vez calibrado el equipo, se procede a la medición del pH de la muestra. Se vierte una cantidad de la muestra de sustancias húmicas en un vaso de precipitado y se introduce el electrodo en la muestra, asegurándose de que esté completamente sumergido en la solución. Se coloca el vaso de precipitado con un agitador magnético para evitar burbujas de aire y asegurar una lectura estable. Se espera a que la lectura se estabilice y posteriormente se registra el valor de pH mostrado en la pantalla digital.

Si el pH de la muestra no está dentro del rango deseado, se ajusta añadiendo pequeñas cantidades de ácido o base hasta obtener el resultado adecuado. Si el pH es inferior a 7 (ácido), se añade una base para aumentarlo; si el pH es superior a 7 (básico), se añade un ácido para disminuirlo.

También se ha realizado la medición de la conductividad de la muestra comercial, para ello se ha utilizado el conductímetro Crison CM 35. Para su correcto funcionamiento, se debe calibrar manualmente con uno, dos o tres patrones a elegir entre 147 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 12.88 mS/cm y 111.8 mS/cm , todos a 25 °C.

Por otro lado, se ha realizado el espectro de las sustancias húmicas registrando la absorbancia desde 200 a 800 nm mediante el espectrofotómetro UH5300. El primer paso es ajustar la longitud de onda, y calibrar el espectrofotómetro utilizando un blanco de referencia, que en este caso se ha utilizado agua destilada. Posteriormente, se coloca la muestra de sustancias húmicas en una cubeta limpia y se coloca en el porta-muestras del espectrofotómetro.

3.4.2 Preparación del colorante

La realización de estos ensayos nos permite identificar los parámetros óptimos del proceso de tintura con extractos húmicos en los tejidos de algodón. El primer paso es preparar las muestras de las sustancias húmicas que se utilizarán como colorantes, ajustando la concentración y el pH a los valores que se indican en la **Tabla 6**.

Sabiendo que en una relación 1:100 la concentración de la muestra comercial tiene un valor de 2867 mg/L, se puede determinar el volumen de la solución inicial que hay que añadir para

preparar las muestras de acuerdo con la concentración de cada ensayo, como se indica en la **Tabla 7**.

Para cada experimento, se usa la fórmula de dilución:

$$C_1 \cdot V_1 = C_2 \cdot V_2 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

- $C_1=2867\text{mg/L}$ (concentración inicial)
- C_2 es la concentración deseada para cada experimento
- V_2 es el volumen final de la muestra en mL
- V_1 es el volumen de la solución inicial que necesitamos calcular

A continuación, se especifica el volumen de la muestra inicial que se ha utilizado para preparar las muestras de cada ensayo:

Tabla 7. Preparación de muestras

Experimento	Relación	Concentración inicial	Volumen inicial (mL)
1	1:100	2867	139.52
2	1:100	2867	139.52
3	1:50	5734	122.08
4	1:50	5734	87.19
5	1:100	2867	139.52
6	1:100	2867	34.87

7	1:100	2867	104.64
8	1:100	2867	34.87
9	1:100	2867	104.64
10	1:50	5734	122.07
11	2:100	5734	104.64
12	1:50	5734	87.19
13	1:100	2867	69.75
14	1:100	2867	139.52
15	1:100	2867	139.52

3.4.3 Preparación de las muestras textiles

Para la preparación de las muestras textiles que se van a utilizar en los ensayos, primero se toman muestras del tejido de algodón de 3 g.

Una vez preparados los recortes de algodón, se procede a realizar un pretratamiento sumergiéndolos en un baño de quitosano disuelto en ácido acético. El quitosano es un biopolímero natural que se emplea como mordiente para facilitar la adherencia del colorante a las fibras textiles. El baño se ha preparado disolviendo quitosano, 5 g/L de quitosano de medio peso molecular en una disolución acuosa con 3 mL/L de ácido acético.



Figura 40. Tejido sumergido en la disolución de quitosano

Una vez que la muestra ha sido completamente sumergida con quitosano, las muestras se someten a un proceso de fulardado. Este procedimiento garantiza una impregnación homogénea y controlada del quitosano en las fibras de algodón. Las muestras pasan a través de un fular, un equipo con rodillos exprimidores para eliminar el exceso de baño. Estos rodillos ejercen una presión sobre la muestra, eliminando el sobrante de quitosano. Pudiendo controlar la cantidad de disolución depositada en el tejido, calculada como el pick-up (g de disolución por cada 100 g de tejido) al ejercer mayor o menos presión en los cilindros. El pick-up obtenido después del tratamiento es de alrededor de 80%.

Para eliminar el exceso de agua y fijar el quitosano en las fibras de algodón, se somete a las muestras a un proceso de secado en dos etapas. En la primera etapa de secado, las muestras se introducen en una estufa a 90 °C durante 15 minutos, eliminando el exceso del agua contenida en las muestras. Después del primer secado, las muestras se introducen nuevamente en la estufa a 150 °C durante 3 minutos para que reaccione el quitosano con las fibras de algodón, fijándolo de manera permanente.

3.4.4 Proceso de tintura

La relación de baño se calcula mediante la siguiente ecuación, que expresa la relación entre la masa del tejido a teñir y el volumen de baño utilizado:

$$RB = \frac{m}{V} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Esta relación indica que por cada gramo de tejido se deben utilizar 30 mL de baño. Por lo tanto, si se emplean 3 g de tejido, se deben añadir 90 mL de baño. Esta relación asegura que el volumen de baño sea suficiente para que el colorante se transfiera adecuadamente al tejido, permitiendo una tintura uniforme y completa.

Se introduce la muestra textil en el cilindro y posteriormente se introduce el colorante. Una vez introducido hay que taponar el cilindro y asegurar su correcto taponamiento.

Una vez preparados el colorante y las muestras textiles, se procede al proceso de tintura. La muestra textil se introduce en el cilindro, seguido de la adición del colorante. Luego, se cierra el cilindro, asegurando que esté correctamente sellado.



Figura 41. Preparación del proceso de tintura

Los cilindros se colocan en el interior del equipo de tintura. El proceso de tintura se realiza mediante el método de agotamiento en un entorno cerrado ya que minimiza las pérdidas de colorante y asegura una aplicación uniforme por toda la muestra.

Se trabaja en un rango de temperatura de 60 a 90 °C. Las temperaturas seleccionadas para la realización de la tintura están justificadas por la posible degradación de los polifenoles o cualquier activo que presente la sustancia húmica que pueda empeorar el resultado de la protección UV del tejido tintado, teniendo en cuenta que los tintes en el proceso de coloración por tintura de los colorantes sintéticos convencionalmente se llevan a cabo a 90 °C.

Cada ensayo se realiza a una temperatura específica, la cual se ajusta según los requisitos del experimento. Las muestras textiles se mantienen a la temperatura de ensayo durante 45 minutos. Este tiempo es controlado para permitir una absorción completa y uniforme del colorante en las fibras textiles. La duración del proceso de tintura es crítica para asegurar que el colorante penetre adecuadamente en las fibras de algodón y se fije de manera duradera.

3.4.5 Determinación del UPF

Para determinar el factor de protección ultravioleta (UPF) se ha utilizado la lámpara de emisión de luz UV para emitir radiación en las longitudes de onda UVA y UVB. Para ello se sigue la norma UNE-EN 13758-1:2002.

La muestra textil se coloca bajo la lámpara UV, asegurando una exposición uniforme a la radiación. Para registrar la radiación recibida por la muestra se utiliza un detector de radiación UV. Para garantizar la fiabilidad de los resultados y poder detectar posibles errores, se registran tres medidas independientes de cada muestra.

Para evitar que se produzcan interferencias de la luz del exterior utilizamos una caja opaca. Se realizan tres medidas de cada muestra para evitar errores.

En primer lugar, se tomaron medidas en el espectro UVB, donde se utiliza una bombilla específicamente diseñada para emitir radiación en esta longitud de onda, proporcionando una radiancia de 8 w/m². Los resultados permiten evaluar la capacidad de protección de las muestras contra la radiación UVB, que está asociada con quemaduras solares y otros daños cutáneos.

Posteriormente, se sustituyó la bombilla por otra diseñada para emitir radiación específica en el espectro UVA, emitiendo una radiancia de 5,6 w/m². De esta manera, con los datos registrados se puede evaluar la capacidad de protección contra la radiación UVA, que penetra más profundamente en la piel y está asociada con el envejecimiento prematuro y el riesgo de cáncer de piel. A partir de los resultados registrados, podemos determinar el UPF.

3.4.6 Medición del color

Los ensayos de colorimetría se realizan en el espectrofotómetro de reflexión Minolta CM-3600d UV-visible. Este dispositivo permite analizar el color que ha adquirido el tejido mediante

la medición de la cantidad de luz reflejada a diferentes longitudes de onda. Se coloca la muestra textil en el espectrofotómetro, donde es expuesta a la luz emitida por el equipo.

Se evalúan los valores de K/S, los valores de color según el iluminante D65/10 y los valores de diferencia de color. La diferencia de color se calcula según la Ecuación 4, como una suma vectorial de los vectores del espacio CIELab, como se indica en la norma ISO 105-J03:2009.

Los valores de K/S fueron obtenidos mediante la reflectancia en el mismo equipo, utilizando la ecuación de Kubelka-Munk:

$$\frac{K}{S} = \frac{(1 - R)^2}{2R} - \frac{(1 - R_0)^2}{2R_0} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde K es el coeficiente de absorción, S es el coeficiente de dispersión y R es la reflectancia a la longitud de onda de máxima absorción.

Para garantizar la precisión de nuestras mediciones y reducir la posibilidad de errores, se llevan a cabo tres mediciones de color para cada muestra. Estas mediciones se realizaron en distintas ubicaciones de la muestra, lo que permite evaluar la uniformidad del color en toda su superficie. Al tomar múltiples mediciones, se pueden detectar posibles variaciones de color dentro de una misma muestra.

3.4.7 Ensayo de solidez de color al frote

Para llevar a cabo la evaluación de la solidez del color al frote según la norma ISO 105-X12:2016, se ha llevado a cabo un procedimiento experimental estandarizado. Para ello, se ha seleccionado la muestra textil más representativa, asegurándose de que tuvieran dimensiones suficientes para realizar las pruebas de frote.

El ensayo se realizó utilizando el Crockmeter, un equipo estandarizado específico para este tipo de pruebas, y piezas de tela blanca de algodón estandarizadas como tela de frote. Para el montaje del aparato de frote, la muestra textil se fijó firmemente en el soporte del aparato y la tela de frote se colocó en el dedo de frote del aparato.

En primer lugar, se llevó a cabo el frote en seco. En esta fase, se coloca el tejido para su ensayo sobre la lija de la zona de frote y se fija mediante el dispositivo o pinzas dispuestas para ello. Posteriormente se frota la muestra a una velocidad de un ciclo por segundo, con un movimiento

de vaivén en línea recta 20 veces (10 veces en cada sentido) sobre la probeta seca, a lo largo de una longitud de (104 ± 3) mm.

Por otra parte, se realizó el frote en mojado, donde previamente se prepara el tejido para el frote mediante el pesado de una pieza de tejido acondicionado, sumergiéndola en agua destilada y volviéndola a pesar para asegurar una impregnación del 95% al 100%. Una vez preparada, se llevan a cabo los mismos pasos que en el frote en seco.

Después de completar los ciclos de frote, en ambos casos se retiró la muestra textil. La muestra que había sido humedecida para realizar el frote húmedo se colocó en la estufa a 90°C durante 15 minutos para secarla. Posteriormente, la tela de frote se comparó visualmente contra una escala de grises estandarizada para evaluar la cantidad de color transferido desde la muestra textil. Se asignó una calificación de solidez del color que varía de 1 (pobre) a 5 (excelente) según la cantidad de transferencia de color observada.

Para asegurar la precisión de los resultados, se realizaron múltiples pruebas en diferentes áreas de la muestra textil. Los resultados individuales se promediaron para obtener una calificación final de la solidez del color al frote.

3.4.8 Ensayo de solidez de color al lavado

Para llevar a cabo la evaluación de la solidez del color al lavado doméstico y comercial según la norma ISO 105-C06:2010, se ha seguido un procedimiento experimental estandarizado. En este ensayo también se ha seleccionado la muestra más representativa para asegurar que los resultados obtenidos fueran significativos.

El ensayo se realizó utilizando una lavadora de laboratorio de la marca FONG'S, diseñada para simular las condiciones de lavado doméstico y comercial. Se utilizó el detergente Kieralon de ECO, definido en la norma para asegurar la consistencia de los resultados. También se emplearon tiras de tela multifibra que incluyen varios tipos de fibras para evaluar la transferencia de color a diferentes materiales y recipientes adecuados para contener las muestras y la solución de lavado durante el ensayo. Por otro lado, se utilizaron 10 bolas de acero de aproximadamente 6 mm de diámetro para la acción abrasiva.

El ensayo se llevó a cabo a una temperatura de 40 °C, con un volumen de baño de lavado de 150 mL, y un tiempo de ciclo de lavado de 45 minutos según lo especificado en la norma. La disolución de lavado se preparó disolviendo 4 g de detergente por litro de agua.

Después del ciclo de lavado, las muestras textiles y las tiras de multifibra se examinaron visualmente y se compararon contra una escala de grises estandarizada para evaluar tanto la pérdida de color como la transferencia de color. Se asignó una calificación a la solidez del color basada en la escala de grises, que varía de 1 (pobre) a 5 (excelente).

4 Resultados experimentales

Para llevar a cabo este estudio, se han llevado a cabo un total de 15 experimentos utilizando un proceso de tintura con fertilizantes basados en sustancias húmicas en tejidos de algodón. La finalidad es evaluar la intensidad de color absorbida por las muestras, así como el factor de protección ultravioleta que ofrecen.

Durante los experimentos, se han variado varias variables para estudiar su efecto en los resultados. Específicamente, se han manipulado el pH de la solución de tintura, la temperatura (T) durante el proceso de tintura y la concentración de las sustancias húmicas utilizadas.

El pH, la temperatura y la concentración son factores conocidos por influir significativamente en el proceso de tintura y en las propiedades finales del tejido, incluyendo su capacidad para absorber luz ultravioleta. La variación sistemática de estas variables permitirá obtener datos precisos sobre cómo optimizar el proceso de tintura para mejorar tanto el color como la protección UV de los tejidos de algodón.

4.1 Caracterización del producto comercial

La caracterización del producto comercial incluye el análisis de varios parámetros importantes. Estos parámetros permiten entender mejor la composición y el comportamiento del producto en determinadas condiciones de uso.

4.1.1 Demanda química de oxígeno

La demanda química de oxígeno (DQO) mide la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar completamente la materia orgánica presente en el agua mediante el uso de un oxidante fuerte. Este parámetro es crucial para determinar la carga contaminante de la muestra. Se han obtenido los siguientes valores:

- DQO con dilución 1:2000: 458 mg O₂/L
- DQO sin dilución 1:2000: 916000 mg O₂/L

4.1.2 *Carbono orgánico total*

El carbono orgánico total (TOC) mide la cantidad de carbono presente en compuestos orgánicos en una muestra, que se convierte en CO₂ mediante pirólisis de la muestra. Se han obtenido los siguientes valores:

- TOC con dilución 1:2000: 143.35 mg C/L
- TOC sin dilución 1:2000: 286700 mg C/L

4.1.3 *Estado de oxidación del carbono*

El estado de oxidación del carbono (EOC) indica el nivel de oxidación del carbono presente en una muestra. Este parámetro se calcula utilizando la relación entre DQO y TOC:

$$EOC = 4 - 1.5 \cdot \left(\frac{DQO}{TOC} \right) \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde 1.5 es aproximadamente la relación que hay entre el peso molecular del carbono y el peso molecular del oxígeno. Por lo tanto, sustituyendo los valores obtenidos anteriormente, se obtiene el siguiente resultado:

$$EOC = 4 - 1.5 \cdot \left(\frac{458}{143.35} \right) \approx -0.79$$

El EOC puede ir desde -4 (como es el caso del CH₄) hasta +4 (caso del CO₂). El resultado obtenido indica un estado de oxidación medio del carbono en el producto. Cuanto más reducido es el EOC, es que el carbono está unido a muchos hidrógenos. Por el contrario, si una molécula está muy oxidada, es decir, tiene pocos hidrógenos y muchos oxígenos y nitrógenos, grupos OH-, carboxilo COOH-, aminas..., su estado de oxidación se desplaza hacia +4. Si se compara el valor que se ha obtenido con otros compuestos comunes, se asemeja bastante al EOC del formaldehído (CH₂O) con un valor de 0. Entre otros ejemplos, se encuentra el EOC del etanol (C₂H₅OH), que tiene un EOC de -2, y el del ácido acético (CH₃COOH) con un valor de +3.

4.1.4 *pH*

El pH es una medida de la acidez o alcalinidad de una solución acuosa. La escala de pH va de 0 a 14, donde 7 corresponde a una medida de pH neutro. Valores por debajo de 7 indican acidez,

y valores por encima de 7 indican alcalinidad. En este caso, la muestra comercial tiene un pH de 4,95 indicando que la muestra es ácida.

4.1.5 Conductividad

También se ha realizado la medición la conductividad de la muestra comercial, obteniendo un resultado de 1557 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a una temperatura de 22 °C. Es importante destacar que los conductímetros habitualmente realizan esta medición a una temperatura de referencia de 25 °C. El resultado obtenido mostró un valor ligeramente elevado, lo que indica la presencia de sales en la muestra debido a su naturaleza como producto comercial.

4.1.6 Espectro

Sin embargo, el rango relevante es de 280 nm a 400 nm, ya que es la zona en la que nos interesa que el producto tenga absorción de luz y por lo tanto proteja de los rayos UV que llegan del sol.

En la **Figura 42** se puede observar que la absorbancia disminuye a medida que aumenta la longitud de onda. Las sustancias húmicas muestran una mayor absorbancia en el espectro UV-A. En el rango del UV-A (320-400 nm), estas sustancias muestran una notable absorbancia debido a la presencia de diversos grupos funcionales como los anillos aromáticos y los enlaces conjugados.

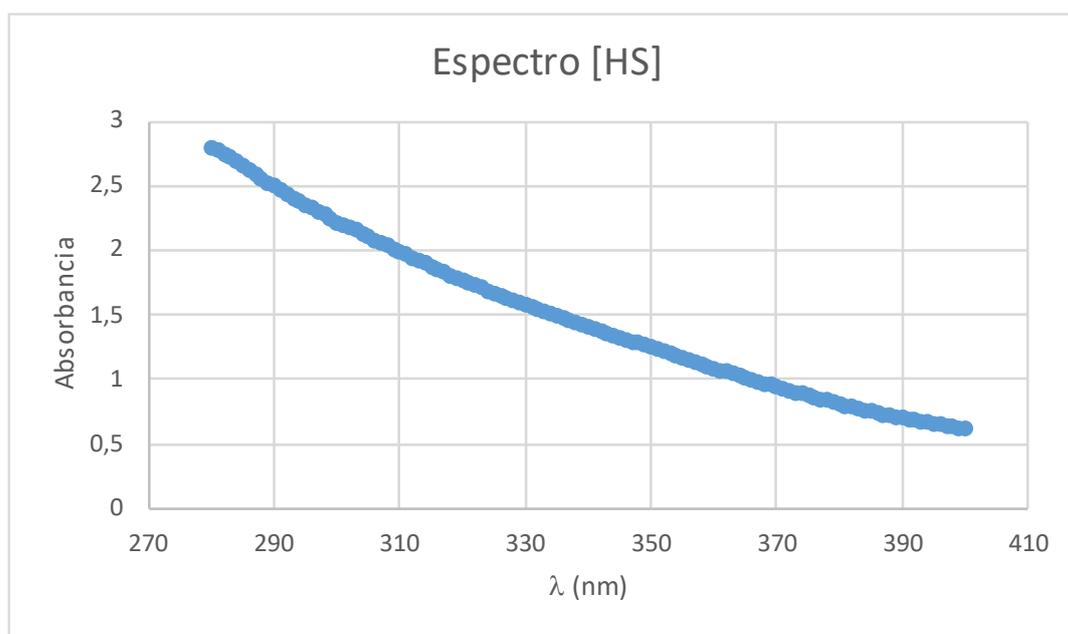


Figura 42. Espectro del producto comercial

4.2 Resumen de resultados obtenidos

Tras realizar los ensayos de tintura de las diferentes muestras textiles, se han obtenido los siguientes resultados, que se presentan en la **Tabla 8**. Se observa que la muestra del ensayo 12 es la que presenta el factor de protección UV más elevado entre todas las muestras evaluadas, así como la mayor diferencia de color frente a la muestra sin tratar.

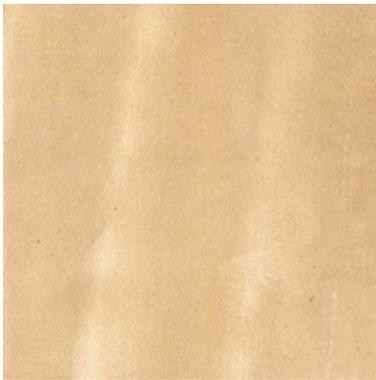
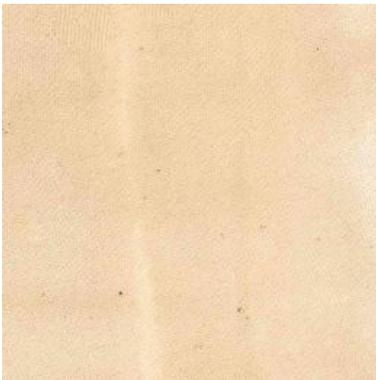
Tabla 8. Resumen resultados obtenidos

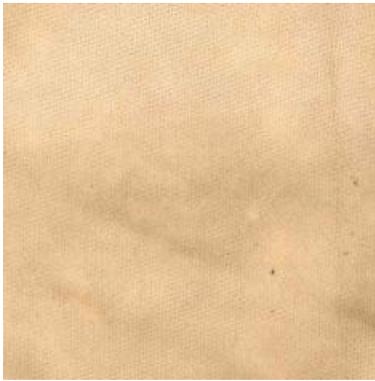
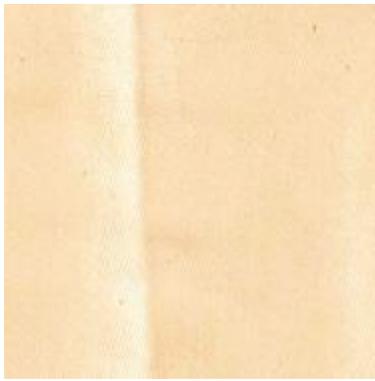
Experimento	pH	[SH]	T	UPF	DE*ab
Sin tratar	-	-	-	3.31	
1	7	2000	80	12.25	18.14
2	9	2000	80	9.32	13.51
3	8	3500	80	15.62	17.58
4	8	2500	95	20.68	24.01
5	5	2000	80	13.40	19.76
6	6	500	80	6.74	10.35
7	6	1500	65	16.28	9.35
8	8	500	80	6.95	6.51
9	8	1500	65	10.21	17.29
10	6	3500	80	30.64	22.85

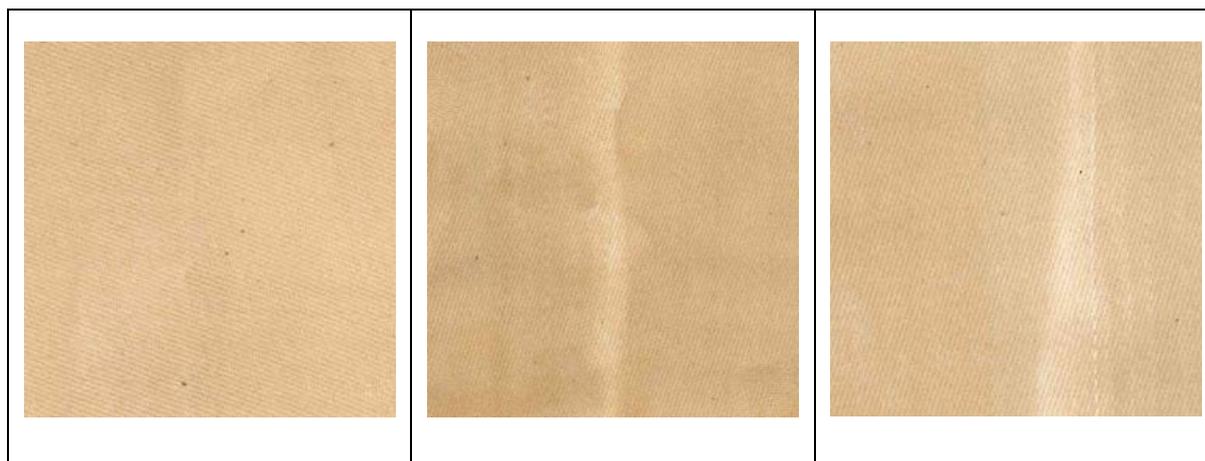
11	7	3000	65	12.73	20.26
12	6	2500	95	58.31	26.35
13	7	1000	95	19.86	18.95
14	7	2000	80	27.6	22.22
15	7	2000	80	12.05	19.64

A continuación, en la **Tabla 9** se muestran los tejidos obtenidos con sus respectivos colores. Se puede observar que la muestra 12 es la que presenta la mayor intensidad de color.

Tabla 9. Muestras obtenidas

Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
		
Ensayo 4	Ensayo 5	Ensayo 6

		
Ensayo 7	Ensayo 8	Ensayo 9
		
Ensayo 10	Ensayo 11	Ensayo 12
		
Ensayo 13	Ensayo 14	Ensayo 15



4.3 Ensayo de solidez del color al frote

En este ensayo se define la resistencia del color de un tejido a desprenderse cuando se frota en seco y en húmedo. A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 10. Resultados obtenidos en el ensayo de solidez del color al frote

	Frote seco	Frote húmedo
Índice de degradación	5	3/4
Índice de descarga	4/5	4

Los índices de degradación y descarga se miden en una escala del 1 al 5, donde el valor 1 indica una solidez muy baja y el 5 una solidez muy alta. Los resultados muestran que, en condiciones de frote seco, el tejido tiene una excelente resistencia a la degradación del color (índice 5) y muy buena resistencia a la descarga del color (índice 4/5). Por otro lado, en condiciones de frote húmedo, la resistencia a la degradación del color es menor frente a la del frote seco, pero sigue siendo buena (índice 3/4), mientras que la resistencia a la descarga del color es muy buena (índice 4).

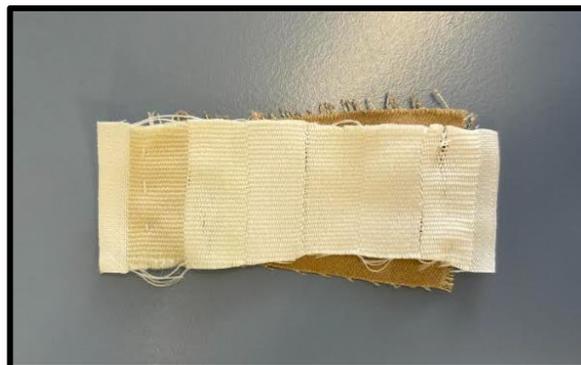
4.4 Ensayo de solidez del color al lavado

En este ensayo se evalúa la resistencia del color de un tejido a desprenderse durante el proceso de lavado. A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 11. Resultados obtenidos en el ensayo de solidez del color al lavado

Índice de degradación	Índice de descarga sobre tejido multifibra					
	Diacetato	Algodón	Poliamida	Poliéster	Acrílico	Lana
5	5	5	5	5	5	5

Ambos resultados muestran una excelente solidez del color al lavado, con una resistencia máxima tanto a la degradación como a la descarga del color. En una escala del 1 al 5, donde el valor 1 indica una solidez muy baja y el 5 una solidez muy alta, los resultados obtenidos reflejan una excelente calidad del color del tejido incluso después de múltiples ciclos de lavado. En la **Figura 43** se puede observar la muestra que fue sometida al ensayo.

**Figura 43.** Tela multifibra vs muestra textil

4.5 Medida de color

El espacio de color CIELAB es un modelo cromático compuesto por tres ejes perpendiculares entre sí. En este estudio se han determinado las coordenadas cromáticas L^* , a^* y b^* , así como la diferencia de color respecto a la muestra estándar [44].

El eje a^* indica la oposición entre los colores rojo y verde, donde valores positivos de a^* representan el rojo, mientras que valores negativos representan el verde. Por otro lado, el eje b^* refleja la oposición entre el amarillo y el azul, con valores positivos de b^* indicando el amarillo y valores negativos que indican el azul. Finalmente, el eje L^* representa la luminosidad y muestra la oposición entre el blanco y el negro, extendiéndose de 0 (negro) a 100 (blanco) [44].

Las coordenadas de color L^* , a^* y b^* son resultados numéricos obtenidos a partir de fórmulas establecidas, y determinan la posición de un color específico en el espacio de color CIELAB.

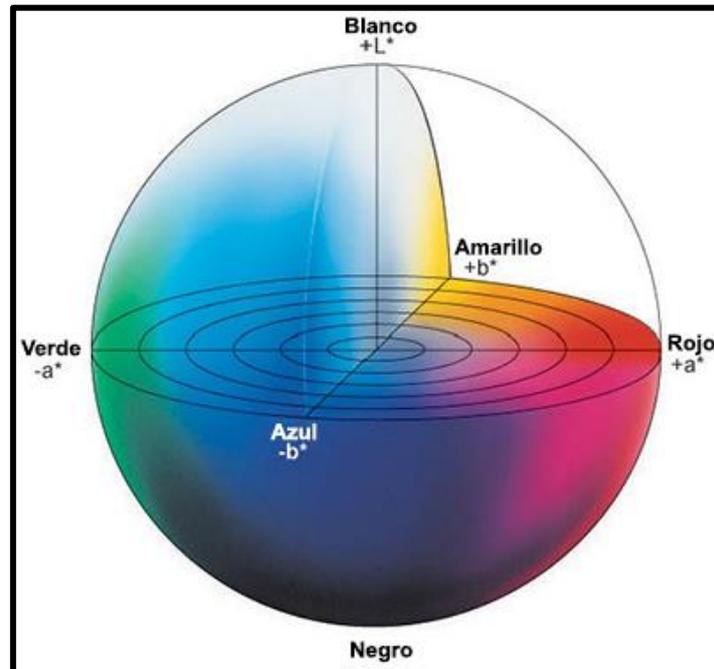


Figura 44. Coordenadas CIELAB [66]

Para reducir errores en las mediciones de reflectancia, se realizaron tres mediciones de color por muestra en distintas ubicaciones y se ha calculado el promedio, obteniendo los valores que se muestran en la **Tabla 12**:

Tabla 12. Resultados obtenidos de las coordenadas CIELAB

MUESTRA	L^*	a^*	b^*	DE^*ab
Estándar	87.22	0.56	10.35	
1	71.33	4.95	17.86	18.14
2	74.96	3.55	15.15	13.51
3	70.24	2.86	14.25	17.58

4	64.36	5.48	15.75	24.01
5	69.89	5.26	18.55	19.76
6	77.65	0.76	14.19	10.35
7	78.42	2.55	12.70	9.35
8	81.73	2.20	13.38	6.51
9	72.57	5.09	18.32	17.29
10	65.83	4.75	17.19	22.85
11	68.76	5.8	16.79	20.26
12	62.22	6.15	16.47	26.35
13	70.77	5.63	18.27	18.95
14	67.03	5.16	18.39	22.22
15	69.64	4.60	18.05	19.64

La muestra textil tintada con sustancias húmicas que presenta la mayor diferencia de color frente a la muestra estándar es la número 12, la cual ha sido tintada a una temperatura de 95°C con un pH modificado a 6. Además, presenta el valor más elevado del parámetro colorimétrico b^* , indicando éste un tono amarillento.

La teoría de Kubelka-Munk es fundamental para entender la intensidad del color (K/S) en relación con la reflectancia de las muestras. Según esta teoría, la muestra estándar no tratada muestra los valores más bajos de K/S en todo el espectro visible, indicando la menor intensidad de color al no haber sido sometida al proceso de tintura. Por el contrario, todas las muestras

tratadas muestran valores más altos de K/S, reflejando una mayor intensidad de color debido al proceso de tintura.

El diagrama del espectro de K/S indica la intensidad de color de cada una de las muestras estudiadas a partir de los espectros de reflectancia R (%) utilizando la ecuación de Kubelka-Munk:

$$\frac{K}{S} = \frac{(1 - R)^2}{2R} - \frac{(1 - R_0)^2}{2R_0} \quad (\text{Ecuación 6})$$

donde R es la reflectancia de la muestra tratada y R_0 es la reflectancia de la muestra estándar no tratada [45].

En la siguiente figura se muestra el diagrama del espectro de K/S de 400 a 700 nm en intervalos de 10 nm, el cual indica la intensidad de color de cada una de las muestras estudiadas. Este espectro se ha obtenido a partir de los espectros de reflectancia R (%) utilizando la Ecuación 6.

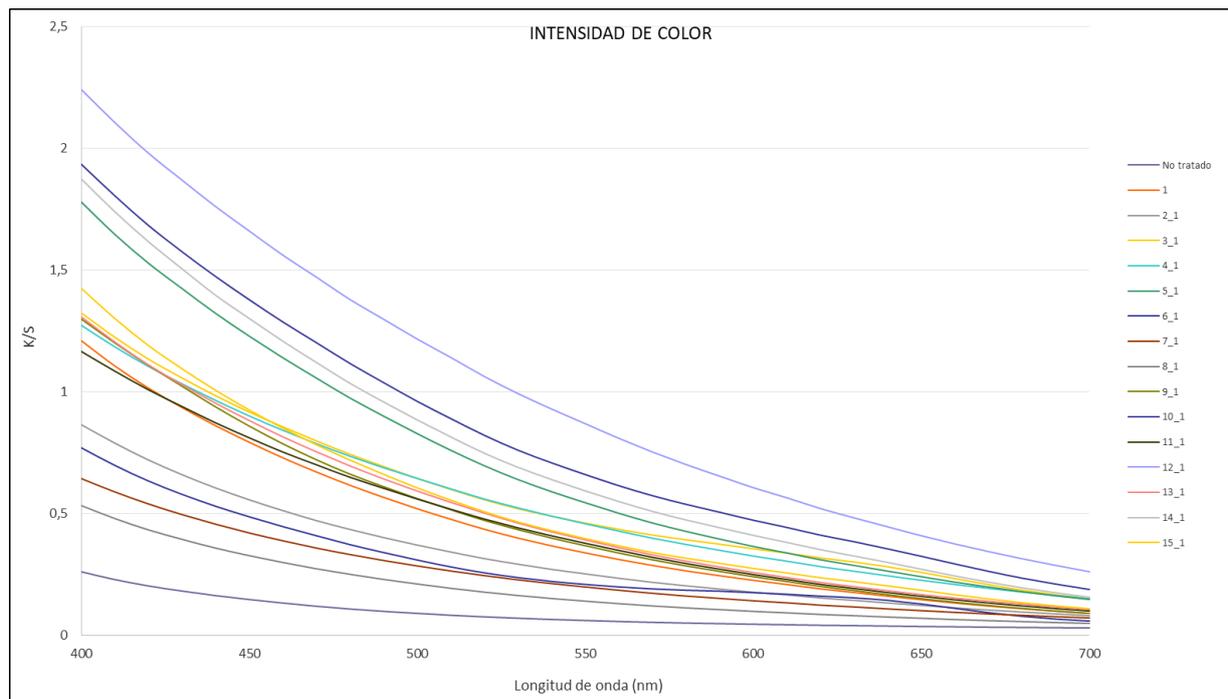


Figura 45. K/S vs. Longitud de onda

La muestra no tratada es la que presenta los valores más bajos de K/S en todo el espectro visible, esto indica que es la muestra con la menor intensidad de color ya que no ha sido sometida al proceso de tintura. En cambio, todas las muestras que han sido sometidas al proceso de tintura

presentan valores más altos de K/S que la muestra no tratada, indicando una mayor intensidad de color.

Las curvas muestran una tendencia descendente a medida que aumenta la longitud de onda, lo que es típico en muchos materiales colorantes donde la absorción disminuye en la región visible del espectro, reduciendo así la intensidad del color a mayores longitudes de onda.

La muestra 12 es la que tiene el valor más alto de K/S (2.2416) a 400 nm, lo que indica la mayor absorción del colorante en esta longitud de onda. Por otro lado, las muestras 10 y 14 también presentan valores altos de K/S (1.9352 y 1.8738 respectivamente), indicando una absorción significativa. Sin embargo, las muestras 7 y 8 presentan los valores más bajos de K/S (0.644 y 0.5323 respectivamente), lo que indica una menor absorción en comparación con otras muestras tratadas.

A continuación, en la **Figura 46**, se puede observar una gran diferencia en la absorción del colorante entre las muestras sometidas al proceso de tintura y la que no ha sido tratada. La muestra no tratada presenta el valor más bajo. En contraste, la muestra 12 que se ha tintado a una temperatura de 95 °C, el pH se ha ajustado a 6 y la [SH] es de 2500 mg/L, presenta el valor más alto de absorción del colorante a esta longitud de onda.

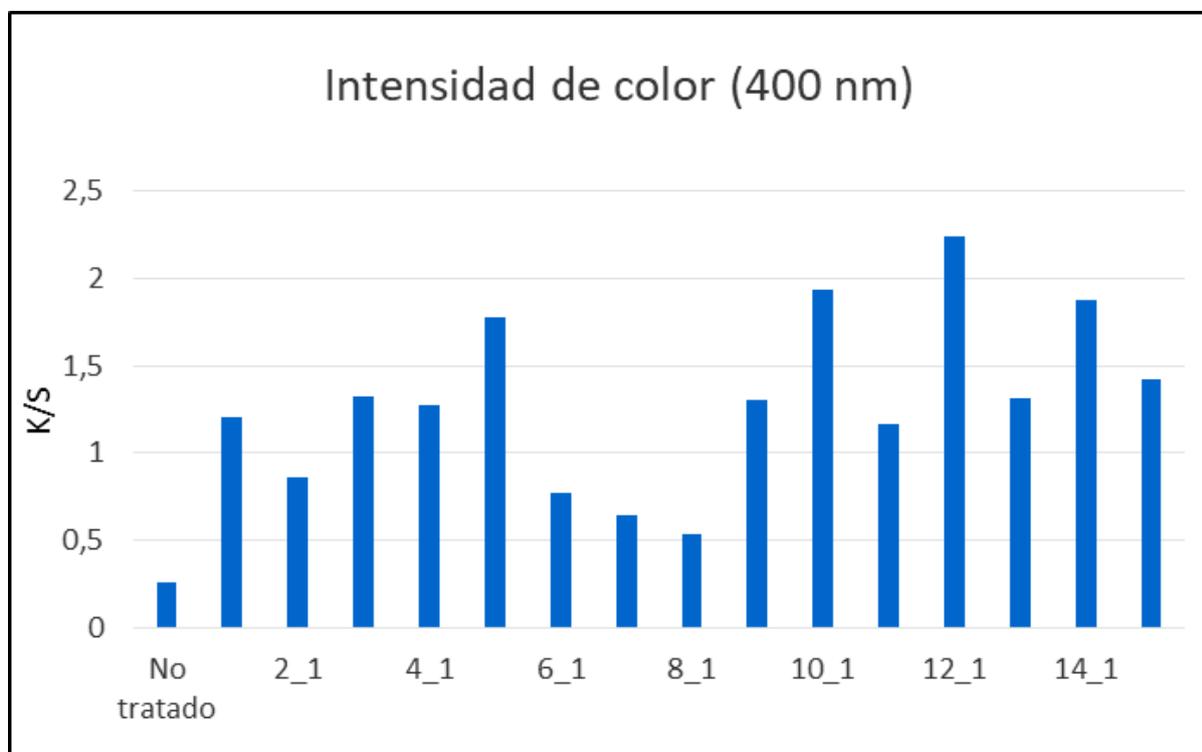


Figura 46. K/S a 400 nm

4.6 Protección UV

El factor de protección ultravioleta (UPF) es una medida que permite determinar la eficacia de los tejidos en bloquear la radiación UV. Este factor cuantifica la transmisión de la radiación UV a través de un tejido, utilizando técnicas de espectrofotometría [46].

Para la determinación del UPF se sigue la Norma UNE-EN 13758-1, donde se describe que el UPF de cada espécimen se calcula según la fórmula que en este caso quedará modificada ligeramente ya que no se realiza un barrido desde 290 a 400 nm sino que se realizan dos mediciones puntuales a 312 nm que corresponde al ultravioleta B y 365 nm que corresponde al ultravioleta A, de modo que la fórmula del factor de protección ultravioleta queda del siguiente modo:

$$UPF = \frac{E(312) \cdot \varepsilon(312) \cdot \Delta(\lambda) + E(365) \cdot \varepsilon(365) \cdot \Delta}{E(312) \cdot \varepsilon(312) \cdot T(312) \cdot \Delta(\lambda) + E(365) \cdot \varepsilon(365) \cdot T} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Tanto la Irradiancia solar ($E(\lambda)$), como el espectro de la acción eritemal según CIE ($\varepsilon(\lambda)$) se obtienen de la Norma UNE-EN 13758-1 donde vienen tabulados los valores para cada longitud de onda.

La transmitancia se determina mediante relación de la irradiancia que es medida mediante el detector y la irradiancia inicial en cada longitud de onda:

$$UPF = \frac{I}{I_0} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Se ha considerado como irradiancia inicial la correspondiente a la irradiancia medida en verano en Albuquerque y que se denomina irradiancia solar, y se encuentra tabulada en la norma UNE-EN 13758-1.

A continuación, en la **Tabla 13**, se muestran los resultados obtenidos de UVA y UVB, junto con el valor que se ha calculado de UPF:

Tabla 13. Resultados obtenidos del UPF

MUESTRA	UVA	UVB	UPF	Características
---------	-----	-----	-----	-----------------

Estándar	0.05455	0.009	3.31	UPF bajo
1	0.01476	0	12.25	UPF medio
2	0.01939	0	9.32	UPF bajo
3	0.01157	0	15.62	UPF medio
4	0.00874	0	20.68	UPF medio
5	0.01349	0	13.40	UPF bajo
6	0.026815	0	6.74	UPF bajo
7	0.0111	0	16.28	UPF medio
8	0.026	0	6.95	UPF bajo
9	0.0177	0	10.21	UPF bajo
10	0.0059	0	30.64	UPF medio
11	0.0142	0	12.73	UPF bajo
12	0.0031	0	58.31	UPF alto
13	0.0091	0	19.86	UPF medio
14	0.00655	0	27.6	UPF medio

15	0.015	0	12.05	UPF bajo
----	-------	---	-------	----------

Se observa que experimentos con valores extremos de pH (como el 5 y el 9) tienden a tener UPF más bajos, lo que sugiere que un pH moderado puede ser más beneficioso para obtener un elevado factor de protección UV. Las concentraciones más altas de sustancias húmicas parecen mejorar la protección UV en general, mientras que la temperatura más elevada es necesaria para alcanzar valores de UPF elevados.

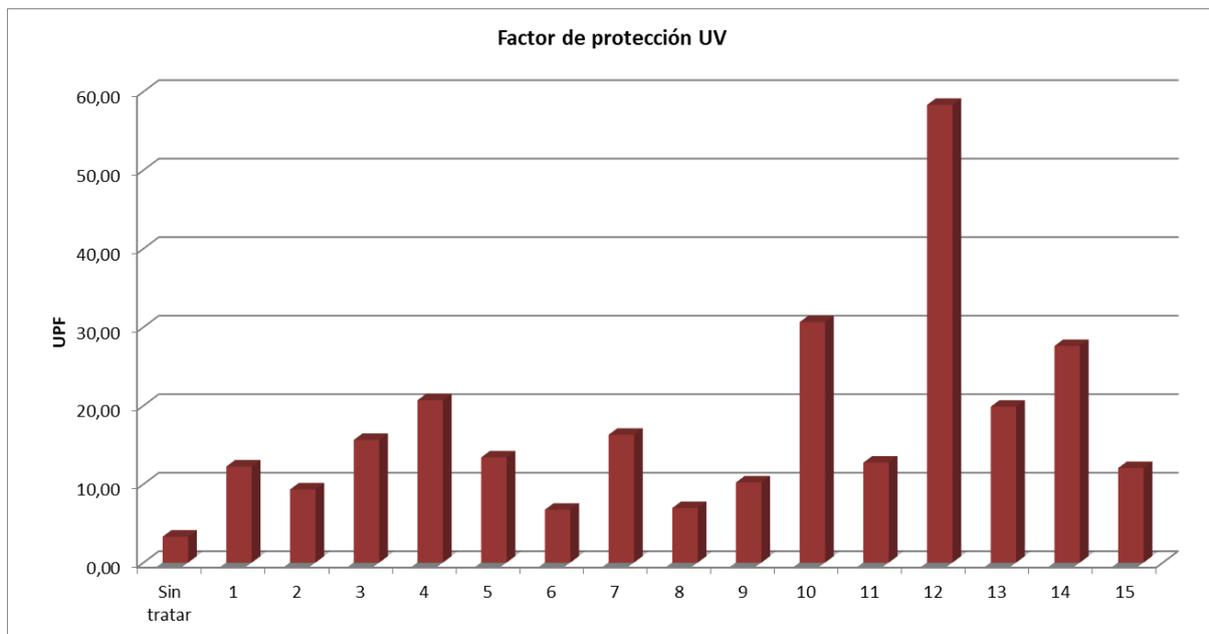


Figura 47. Resultados obtenidos UPF

4.7 Análisis de superficie de respuesta estimada

Hasta ahora se han analizado resultados concretos que ofrecen información detallada sobre las muestras individuales que se han estudiado a partir de la matriz de Döehlert. Sin embargo, existe la posibilidad de obtener una visión más completa de toda la zona de estudio, incluyendo puntos que no se han realizado de manera experimental.

Este enfoque nos permite comprender la respuesta general de las muestras en lugar de centrarnos únicamente en los resultados obtenidos. A continuación, los datos serán sometidos a un análisis estadístico. Este proceso nos permitirá construir superficies de respuesta que representan una solución integrada a lo largo de todo el rango de condiciones que existen en nuestro estudio.

Para ello, se lleva a cabo una metodología de superficies de respuesta, que se trata de un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas que se emplean para analizar la relación entre una o más respuestas que dependen de diferentes variables independientes. Se ha utilizado el software Statgraphics, se trata de una herramienta de análisis estadístico que ofrece la posibilidad de optimizar las respuestas determinando las condiciones óptimas de operación.

Para maximizar los valores de UPF (Factor de Protección Ultravioleta) del tejido, se ha ajustado una ecuación de regresión a los datos experimentales. El valor máximo indica que el tejido tiene buenas propiedades contra la radiación UV. Esta ecuación permite determinar cómo varía el UPF en función de tres variables: el pH, la concentración de sustancias húmicas [SH], y la temperatura del proceso de tintura. A continuación, se muestra la ecuación de regresión que se ha ajustado a los datos experimentales:

$$UPF = -98,7173 + 57,0109 \cdot pH - 0,0152175 \cdot [SH] - 2,14715 \cdot T - 1,485 \cdot pH^2 - 0,00253833 \cdot pH \cdot [SH] - 0,441389 \cdot pH \cdot T - 3,67778 \cdot 10^{-7} \cdot [SH]^2 + 0,000501519 \cdot [SH] \cdot T + 0,0306025 \cdot T^2$$

La **Tabla 14** muestra los rangos de valores para cada factor y los valores óptimos que maximizan UPF:

Tabla 14. Rango de valores que influyen en el UPF

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
pH	5	9	5
[SH]	0	4000	3999,75
T	65	95	94,9948

La superficie de respuesta trata todos los valores posibles, mientras que en la representación gráfica tridimensional que se ha utilizado en el diseño experimental no aparecen todas las variables. La ecuación utilizada nos permite obtener un valor máximo del factor de protección ultravioleta que tiene el tejido, el cual se trata de un máximo optimizado para esta ecuación, siendo este valor de UPF=84,79.

En la **Figura 48** se puede observar la superficie de respuesta para el UPF cuando la temperatura se fija con un valor de 65 °C. En este caso la respuesta de UPF es relativamente baja en todos los valores de pH y [SH]. Hay un ligero aumento en UPF a medida que aumentan tanto el pH como [SH], pero la respuesta general sigue siendo poco significativa.

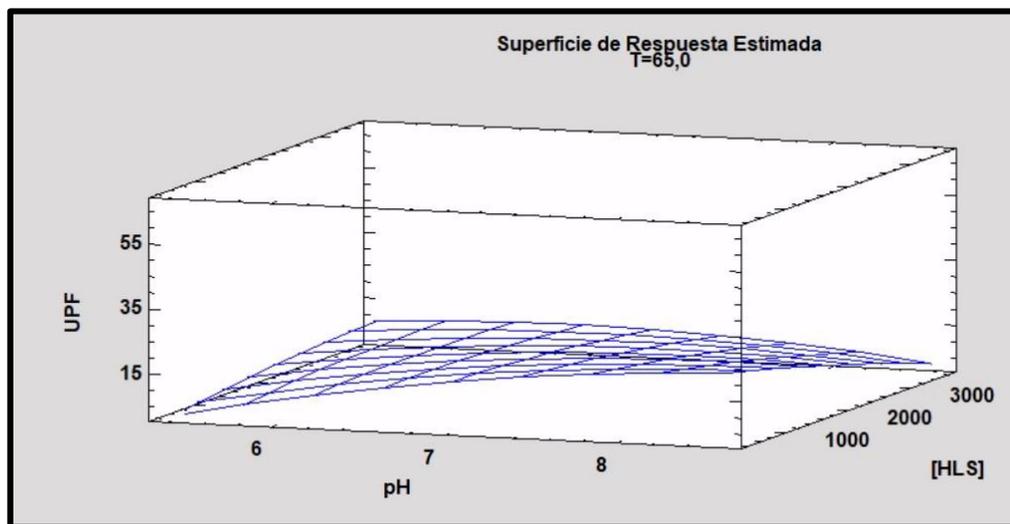


Figura 48. Superficie de respuesta estimada UPF T=65 °C

En la **Figura 49** se puede observar la superficie de respuesta para el UPF cuando la temperatura se fija con un valor de 80 °C. La respuesta de UPF aumenta de manera más significativa con los cambios en pH y [SH]. Un pH más alto combinado con un aumento en [SH] muestra un incremento más notable en el valor de UPF.

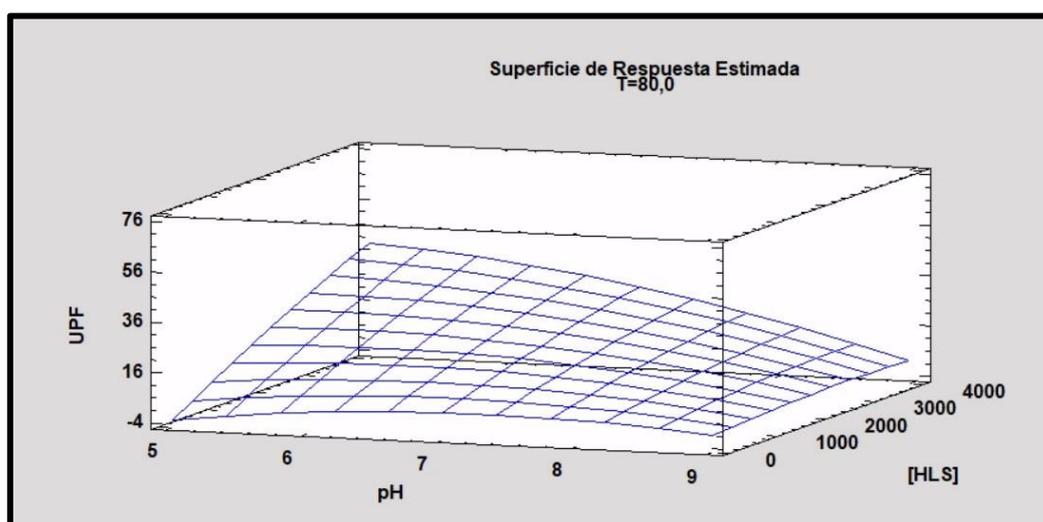


Figura 49. Superficie de respuesta estimada UPF T=80 °C

En la **Figura 50** se puede observar la superficie de respuesta cuando la temperatura se fija con un valor de 95 °C. La respuesta de UPF es la más alta entre las tres temperaturas. Existe una fuerte correlación positiva entre el pH y [SH] con UPF, especialmente en valores de pH más altos.

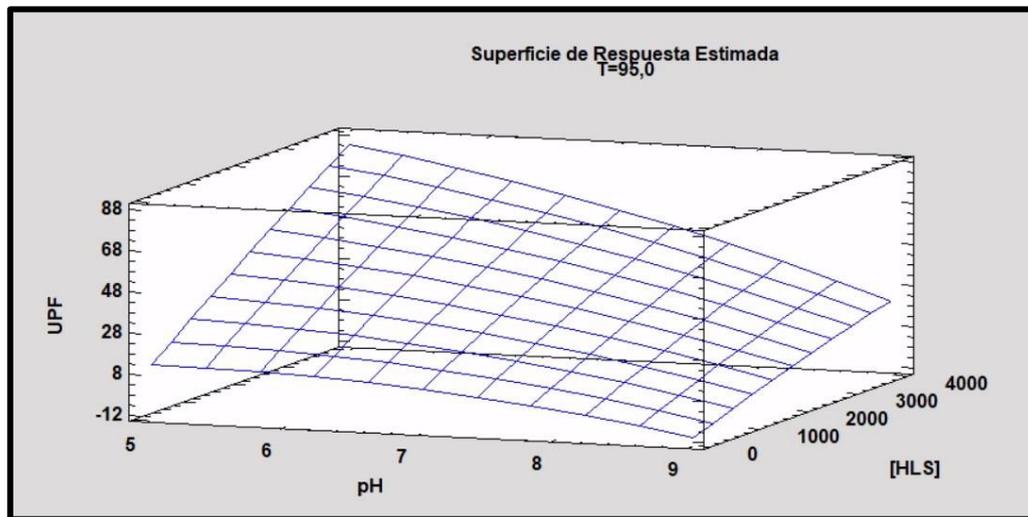


Figura 50. Superficie de respuesta estimada UPF T=95 °C

Por otro lado, se quiere minimizar la superficie de respuesta de L^* , ya que esto indicaría que el tejido ha obtenido una elevada intensidad de color. Para ello, se ha utilizado una ecuación de regresión ajustada a los datos experimentales. Esta ecuación permite determinar cómo varía la intensidad del color en función de tres variables: el pH, la concentración de sustancias húmicas [SH], y la temperatura T del proceso de tintura. A continuación, se muestra la ecuación de regresión que se ha ajustado a los datos experimentales:

$$L^* = 177,34 - 20,505 \cdot pH - 0,0115404 \cdot [SH] - 0,348074 \cdot T + 0,772917 \cdot pH^2 + 0,000055 \cdot pH \cdot [SH] + 0,131333 \cdot pH \cdot T + 0,00000166944 \cdot [SH]^2 + 0,0000047074 \cdot [SH] \cdot T - 0,00518519 \cdot T^2$$

La **Tabla 15** muestra los rangos de valores para cada factor y los valores óptimos que maximizan L^* :

*Tabla 15. Rango de valores que influyen en L^**

Factor	Bajo	Alto	Óptimo

pH	5	9	5,08037
[SH]	0	4000	3238,46
T	65	95	95

La superficie de respuesta trata todos los valores posibles, mientras que en la representación gráfica tridimensional que se ha utilizado en el diseño experimental no aparecen todas las variables. La ecuación utilizada nos permite obtener un valor máximo de la intensidad del color, el cual se trata de un máximo optimizado para esta ecuación, siendo este valor de $L^* = 59,13$.

En la **Figura 51** se puede observar la superficie de respuesta estimada para la intensidad del color L^* a una temperatura de $65\text{ }^\circ\text{C}$. La respuesta de L^* varía en este caso entre 60 y 100, donde se puede observar una ligera curvatura en la superficie. El valor de L^* disminuye ligeramente a medida que el pH aumenta, pero sobre todo disminuye a medida que la [SH] aumenta. La disminución es más notable para pH entre 6 y 8 y [SH] de 0 a 3000.

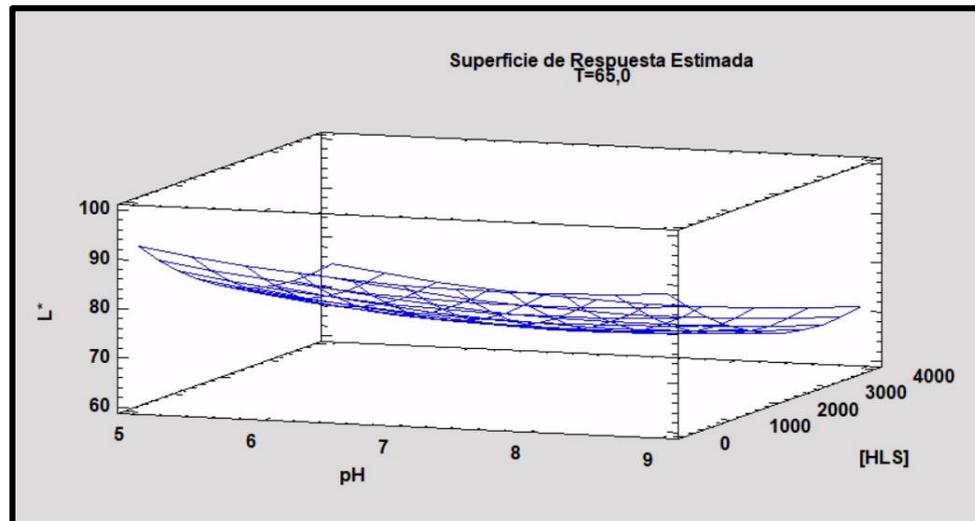


Figura 51. Superficie de respuesta estimada L^* $T=65\text{ }^\circ\text{C}$

En la **Figura 52** se muestra que la superficie de respuesta de L^* a una temperatura de $80\text{ }^\circ\text{C}$ disminuye mayormente cuando el pH aumenta en el rango de 5 a 8. En este caso ocurre algo similar a la superficie de respuesta a $65\text{ }^\circ\text{C}$, se alcanza un mínimo alrededor del valor de pH 7-8 y posteriormente empieza a aumentar, pero la curvatura de la superficie es más pronunciada

comparada con la de 65°C. Por otro lado, la [SH] afecta más a la superficie de respuesta de L*, provocando una disminución significativa.

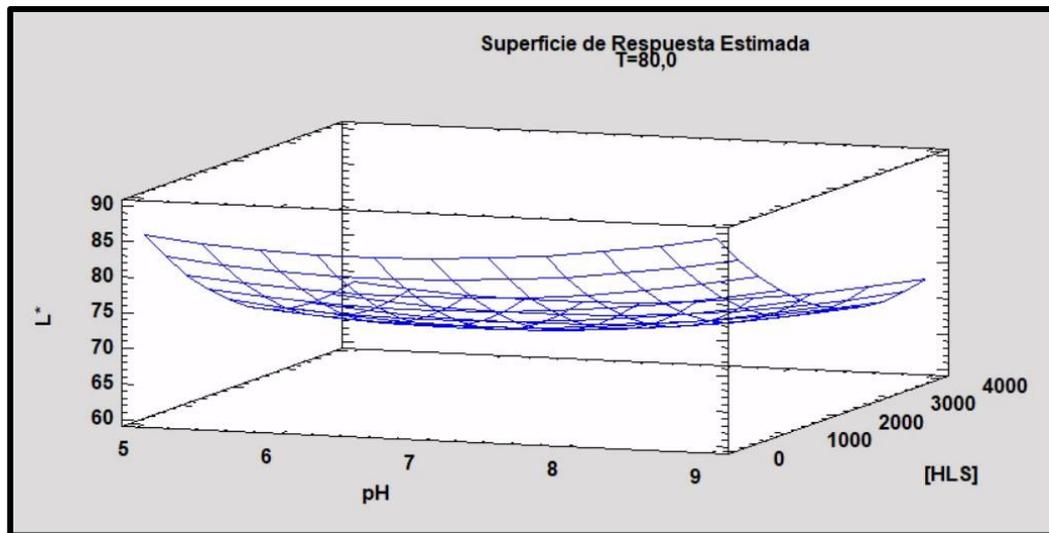


Figura 52. Superficie de respuesta L T=80 °C

En la **Figura 53**, se observa la superficie de respuesta de L* a una temperatura de 80 °C. L* disminuye significativamente con el aumento del pH hasta alrededor de 7-8. Posteriormente, la superficie de respuesta empieza a aumentar de nuevo. Sin embargo, la [SH] es más pronunciado a esta temperatura ya que se observa una notable disminución en L* a medida que aumenta la concentración. La superficie muestra una curvatura considerable, indicando que el efecto combinado de pH y [SH] es muy fuerte a esta temperatura.

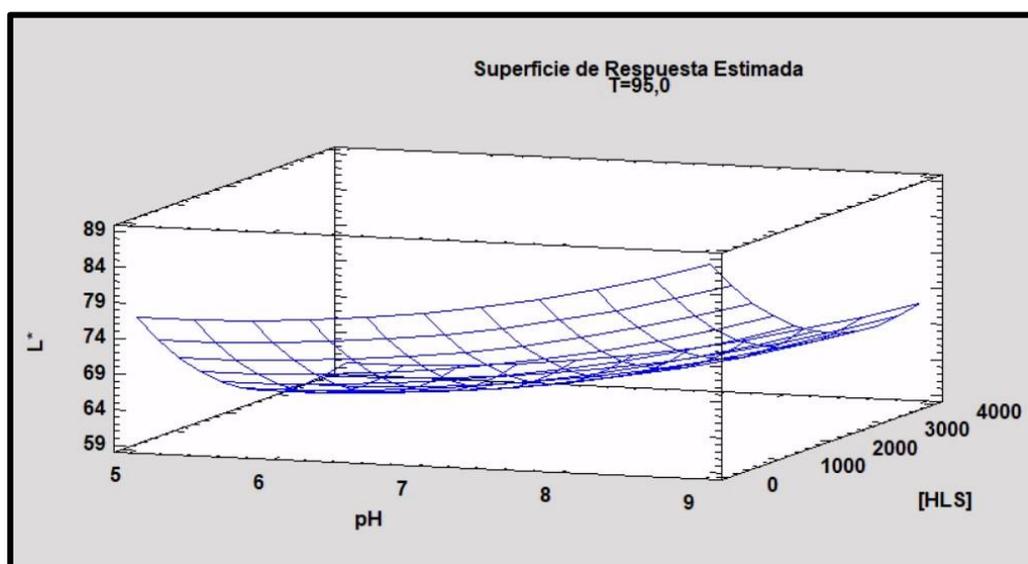


Figura 53. Superficie de respuesta L T=95 °C

Haciendo un análisis general de las respuestas de superficies obtenidas para los parámetros de UPF y L^* , se puede observar que el pH tiene un efecto positivo en la superficie de respuesta del UPF. A medida que el pH aumenta, también lo hace la respuesta del UPF. Sin embargo, en la superficie de respuesta de L^* , el pH tiene un efecto opuesto, ya que la superficie de respuesta disminuye hasta un valor de pH de 8 y posteriormente aumenta. Por lo tanto, la superficie de respuesta del UPF es menos sensible al pH en comparación con L^* .

Por otro lado, la concentración de las sustancias húmicas afecta de manera positiva a la superficie de respuesta del UPF, ya que valores más altos de [SH] resultan en una mayor respuesta del UPF. En cuanto a L^* , la concentración de las sustancias húmicas hace que la superficie de respuesta disminuya, especialmente a temperaturas más elevadas.

La temperatura hace que la superficie de respuesta del UPF aumente. Ocurre lo mismo con la superficie de respuesta de L^* , ya que, a temperaturas más altas, la superficie de respuesta es más pronunciada. La temperatura incrementa la sensibilidad de ambos parámetros al pH y [SH], pero este efecto es más pronunciado para L^* que para el UPF.

5 Escalado industrial

En este apartado se va a plantear el escalado industrial a partir del procedimiento seguido en el laboratorio. De esta manera se amplía la producción a gran escala, basándose en el ensayo que ha dado los resultados óptimos, correspondiente al ensayo número 12.

En el laboratorio, se han llevado a cabo distintos ensayos donde se ha utilizado sustancias húmicas como colorantes para textiles de algodón. Durante estos ensayos, se han ajustado diversas variables del proceso, tales como el pH, la temperatura y la concentración de las sustancias húmicas. Estas formulaciones han sido optimizadas para obtener los mejores resultados en términos de color, estabilidad y compatibilidad con diversos tipos de fibras textiles.

Para establecer la cantidad de producción de textil, se debe realizar una relación entre la cantidad de tejido de algodón tintado en el laboratorio y la cantidad producida a escala industrial. Se deben considerar varios factores, como el tiempo de ciclo, la cantidad de textil procesada por ciclo y cualquier incremento en la escala del proceso. Dado que la cantidad de textil procesada en la escala industrial es mayor debido a las diferencias en la maquinaria y la eficiencia, debemos ajustar nuestro enfoque para cuantificar la cantidad de textil producida en un ciclo industrial.

5.1 Proceso de tintura

Para obtener una aproximación de costes intentado que sea lo más aproximado, se ha basado en un equipo de la empresa Loris Bellini de autoclave. La máquina seleccionada es el modelo RBNVI, utilizada para tintura de textiles, siendo esta la técnica empleada a la utilizada en el laboratorio.



Figura 54. Máquina para teñido textil [47]

Este equipo ofrece grandes ventajas frente a otros equipos, ya que solo se llena la bomba y los paquetes donde se encuentra el textil, por lo tanto, se reduce la relación de baño (1:6), disminuyendo así los consumos de agua, vapor y energía. Este equipo utiliza un sistema de cojín de aire que mantiene la relación de baño constante, incluso cuando la máquina está cargada al 50% de su capacidad. Además, cuenta con un sistema automático de monitoreo continuo de la presión diferencial entre la parte interior y exterior, y de la temperatura del baño, garantizando condiciones óptimas para el proceso de tintura [47].

La bomba hélico-centrífuga circula el baño de tintura a través del material, ajustando la presión entre 0.2 a 2.5 bar según el tipo de fibra, para asegurar una distribución uniforme del color. Tras completar el ciclo de tintura, el baño se drena y se puede recuperar para su reutilización en el siguiente ciclo.

Para determinar el tiempo de ciclo del proceso de tintura, se debe tener en cuenta la temperatura de tintura que se quiere alcanzar, que son 95 °C para el ensayo óptimo. Para calcular cuánto

tiempo tarda en alcanzar la temperatura requerida desde una temperatura inicial de 20 °C, con un gradiente de calentamiento de 5 °C/minuto, se puede utilizar la siguiente fórmula:

$$\textit{Tiempo calentamiento} = \frac{T_F - T_I}{\textit{Gradiente de calentamiento}} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Sustituyendo los valores se obtiene el resultado que se muestra a continuación:

$$\textit{Tiempo calentamiento} = \frac{95 - 20}{5} = 15 \textit{ minutos}$$

Además, se va a suponer que el tiempo adicional que se tarda en cargar los materiales en la máquina de tintura industrial es de 10 minutos. Por lo tanto, el tiempo total del ciclo de tintura a escala industrial, considerando que el proceso de tintura completo toma 60 minutos, será de 85 minutos.

En cuanto a la cantidad de textil que se puede teñir, la capacidad de la carga de la máquina es desde 30 a 2000 kg. Con esta información, se puede determinar la cantidad de colorante que hay que añadir. Se va a hacer el escalado utilizando la carga máxima que soporta la máquina de tintura industrial y se define la relación de baño como 1:6.

Se quiere determinar la cantidad máxima de tejido y agua que se puede introducir en la máquina. Por cada kg de tejido de algodón, se deben añadir 6 litros de colorante. Definimos la variable del tejido como x y la del colorante como y , a continuación, se muestra la relación de estas variables:

$$y = 6 \cdot x \quad (\text{Ecuación 10})$$

Teniendo en cuenta que la carga máxima de la máquina son 2000 kg, la ecuación se establece como:

$$x + y = 2000 \quad (\text{Ecuación 11})$$

Relacionando las dos ecuaciones anteriores, se obtiene:

$$x + 6 \cdot x = 2000$$

$$7 \cdot x = 2000$$

$$x = 285.72 \textit{ kg}$$

Por lo tanto, la cantidad de tejido que se puede añadir por ciclo de fabricación es de 285.72 kg. Sustituyendo el valor obtenido de la cantidad de tejido en la Ecuación 10, se determina que la cantidad de agua con colorante que hay que añadir en la máquina es 1714.28 L.

A partir de los valores utilizados a escala de laboratorio, se puede proyectar los requerimientos para la producción industrial, determinando la cantidad necesaria de cada componente necesario. Para tinter 0.005 kg de algodón en el laboratorio, se emplean 0.0017 L de sustancias húmicas concentradas. Extrapolando estos datos a una producción de 285.72 kg de tejido, se necesitarán 97 L del fertilizante para su uso como colorantes, disueltos en 1617.28 L de agua.

Además, para escalar el ensayo óptimo, se debe tener en cuenta que el pH del fertilizante basado en sustancias húmicas tiene un pH de 5, y se debe ajustar a 6. Por lo tanto, se empleará el NaOH como base para aumentar el valor de pH.

5.2 Pretratamiento del tejido

Como se ha explicado anteriormente, las fibras deben de ser activadas para cambiar su polaridad y permitir la unión con el colorante. Para ello se debe realizar un proceso de pretratamiento con un mordente, el cual se encarga de adherir grupos polares de quitosano a las fibras, haciendo que estas sean polarmente compatibles con el colorante y facilitando su unión.

A escala de laboratorio, este proceso se llevó a cabo utilizando un baño que contenía una disolución de quitosano con ácido acético. Sin embargo, a nivel industrial, este proceso es difícil de escalar. La tela debe estar sumergida con el mordente durante aproximadamente 5 minutos, por lo que a escala industrial se ha decidido utilizar un proceso de mordentado en continuo. Este proceso consiste en un baño de disolución de ácido acético con quitosano, que reacciona con la tela. La tela está sujeta por dos cilindros en los extremos del baño, que la hacen pasar por el mismo.

Para entender mejor el proceso diseñado, se podría comparar con el proceso de secado mediante la maquinaria Rame. Este equipo se encarga de hacer pasar la tela por una estufa, la comprime entre dos rodillos exprimidores que eliminan el exceso de baño y posteriormente enrollar la tela en un rodillo para lograr su secado y su eliminación de humedad total como se muestra en la **Figura 55**.



Figura 55. Maquinaria Ramen [48]

En este caso, para el proceso de pretratamiento se podría utilizar una maquinaria similar utilizando la misma metodología, sustituyendo el proceso de secado de la estufa, por un baño que contiene el mordente citado anteriormente. La tela pasaría por la cubeta con dimensiones de 10 m de longitud y 2 metros de ancho, asegurando el tiempo óptimo de activación. Una vez activada, la tela saldría de la cubeta donde se encuentra el baño de tratamiento gracias a su agarre en los rodillos, los cuales contienen vapor de agua. Este vapor de agua transfiere el calor a los rodillos, que se encargan de secar la tela y eliminar el exceso de humedad.

Para realizar el pretratamiento en el laboratorio de 0.005 kg de textil, se prepara un baño que contiene 0.0005 kg de quitosano y 0.003 L de ácido acético en 1000 mL de disolución. Sin embargo, el baño de mordente no se agota por completo en cada ciclo, se debe tener en cuenta el pick up, que es la cantidad de disolución absorbida por el tejido después del tratamiento. El tejido tiene un pick up del 80%, por lo tanto, a escala de laboratorio se utilizarán 0.0004 kg de quitosano y 0.00024 L de ácido acético. Extrapolando estos datos, se obtiene que a escala industrial se necesitarán 1.14 kg de quitosano y 0.69 L de ácido acético para el proceso de tintura de 285.72 kg de tejido.

5.3 Consumo energético

Para calcular la energía requerida para calentar el baño de tintura en la máquina industrial desde una temperatura inicial de 20 °C hasta 95 °C, se emplea la Ecuación 11:

$$Q = m \cdot C \cdot \Delta T \quad (\text{Ecuación 12})$$

La máquina industrial tiene una temperatura inicial de 20 °C, y se debe calentar hasta 95 °C. Sabiendo que la capacidad calorífica del agua es 4184 J/kg·°C se obtiene un valor de transferencia de calor de:

$$Q = 1714.26 \text{ kg} \cdot 4184 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (95 - 20) ^\circ\text{C} = 5.38 \cdot 10^8 \text{ J} = 5.38 \cdot 10^5 \text{ kJ}$$

Para convertir de kilojulios (kJ) a kilovatios hora (kWh), utilizamos el factor de conversión que se muestra a continuación:

$$3600 \text{ kJ} = 1 \text{ kWh}$$

$$5.38 \cdot 10^5 \text{ kJ} \cdot \frac{1 \text{ kWh}}{3600 \text{ kJ}} = 149.44 \text{ kWh}$$

Por lo tanto, la energía requerida para calentar el agua de 20 °C a 95 °C a escala industrial es 149.44 kWh.

A escala de laboratorio, la transferencia de calor tiene un valor de:

$$Q = 0.25 \text{ kg} \cdot 4184 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (95 - 20) ^\circ\text{C} = 78450 \text{ J} = 78.45 \text{ kJ}$$

Se convierten los kilojulios (kJ) a kilovatios hora (kWh) utilizando el factor de conversión:

$$78.45 \text{ kJ} \cdot \frac{1 \text{ kWh}}{3600 \text{ kJ}} = 0.0218 \text{ kWh}$$

5.4 Comparación de consumos

En la **Tabla 16**, se muestra una comparativa de los consumos de los reactivos, la cantidad de tejido a utilizar y el consumo de energía a escala laboratorio frente a los consumos a escala industrial.

Tabla 16. Comparación de consumos entre escala de laboratorio e industrial

Consumo	Escala laboratorio	Escala industrial

Tiempo de ciclo (min)	60	85
Fertilizante (L)	0.0017	97
Quitosano (kg)	0.0004	1.14
CH ₃ COOH (L)	0.00024	0.69
Textil (kg)	0.005	285
Agua (L)	0.25	1617.28
Energía (kWh)	0.0218	149.44

6 Estudio económico

Se va a realizar una evaluación de los costes asociados con la producción a escala industrial de los colorantes basados en sustancias húmicas, incluyendo materias primas, energía, mano de obra y otros gastos operativos. Para ello, se va a partir del ensayo óptimo, sobre el cual se realizará un estudio económico para estudiar la viabilidad económica de utilizar sustancias húmicas como colorantes para textiles frente a los colorantes convencionales.

6.1 Coste tintura con colorante natural

Para realizar el proceso de tintura del tejido de algodón con colorante natural, se deben realizar varias etapas: fulardado, secado y tintura. Para llevar a cabo el proceso se requieren determinadas cantidades de materias primas.

En la **Tabla 17** se presentan los costes estimados de los reactivos necesarios para realizar el pretratamiento del tejido para teñir 285.72 kg con colorantes naturales.

Tabla 17. Costes estimados para la tintura con colorantes naturales

COLORANTE NATURAL			
Reactivo	Cantidad	Precio unitario	Costo Total (€/lote)
Quitosano	1.14 kg	1865 €/kg	2126.1
CH ₃ COOH	0.69 L	17 €/L	11.73
Agua	1617.28 L	0.570 €/m ³	921.85
NaOH	10 L	14.90 €/kg	149
Fertilizante	97 L	2.88 €/L	279.36

TOTAL	3488.03 €
--------------	------------------

El precio del fertilizante ha sido proporcionado por la empresa Alfredo Iñesta, una empresa del sector agroquímico. El ácido acético es proporcionado por la empresa Labbox. El NaOH y el quitosano es suministrado por la empresa Sigma Aldrich, empresa líder en suministros químicos a nivel mundial.

En cuanto al costo del agua, se establece según las directrices del Diario Oficial de la Generalitat Valenciana (DOGV 9247). Según esta normativa, para usos industriales con un consumo anual superior a 3000 m³, el precio por metro cúbico es de 0.570€ [49].

6.2 Coste tintura con colorante sintético

Se va a estudiar el coste que conlleva utilizar colorantes sintéticos para poder hacer una comparación con el coste de los colorantes naturales. Los colorantes sintéticos no requieren la aplicación de un mordente, ya que presentan afinidad por la fibra celulósica [50]. Esto se debe a que presentan afinidad por la fibra celulósica, lo que simplifica el proceso y reduce los costes operativos y de tiempo. No obstante, para añadir valor añadido al tejido teñido con colorantes sintéticos, se le aplica un tratamiento alternativo que proporciona protección contra los rayos ultravioleta (UV).

El tratamiento consiste en sumergir el tejido en un baño que contiene una mezcla de nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) y resina acrílica. Específicamente, la concentración de ZnO en el baño es de 30 g/L y la de resina acrílica es de 50 g/L. Las nanopartículas de ZnO actúan como un dispersante de luz, ofreciendo una protección eficaz contra la radiación UV, mientras que la resina acrílica contribuye a mejorar la durabilidad y las propiedades mecánicas del tejido. En este caso, el tejido tiene el mismo pick up que cuando se aplica el pretratamiento con quitosano, es decir un 80%.

La resina acrílica tiene un precio de 312 € cada 10 g, por otro lado, el ZnO tiene un precio de aproximadamente 33 € por 10 g de la empresa; ambos productos adquiridos de la empresa Sigma Aldrich.

Se ha encontrado un producto que contiene 20 g de colorante de la empresa La Nave, este es capaz de teñir 350 g de tejido con una tonalidad oscura. Por lo tanto, para teñir 285.7 kg de tejido se necesitarán 16325.71 g de colorante. El precio de este colorante es de 0.0825 €/g,

suponiendo un coste total del colorante sintético necesario para teñir 285.7 kg de tejido de 1347.89 €.

La **Tabla 18** muestra una comparación de los costes entre el empleo de colorantes sintéticos y naturales para un mismo proceso.

Tabla 18. Costes estimados para la tintura con colorantes sintéticos

COLORANTE SINTÉTICO			
Reactivo	Cantidad	Precio unitario	Costo Total (€/lote)
Agua	500 L	0.570 €/m ³	285
ZnO	30 g	3.3 €/g	99 · 0.8 = 79.2
Resina acrílica	50 g	31.2 €/g	1560 · 0.8 = 1248
Colorante sintético	16325.71 g	0.0825 €/g	1347.89
TOTAL			2960.09 €

6.3 Coste de energía

Para realizar un análisis del costo de energía asociado con el proceso de tintura del tejido de algodón, es necesario considerar el consumo energético de la máquina industrial utilizada y los precios de la electricidad. Para ello se ha empleado la Ecuación 12, y se ha obtenido la transferencia de calor. Mediante conversión, se ha obtenido el resultado en kWh. La máquina empleada consume 149.44 kWh por ciclo.

El precio medio de la luz del día 22 de junio es de 0.0848 €/kWh, siendo el precio más bajo 0.03629 €/kWh de 13-14h, y el precio más alto 0.14394 €/kWh de 22-23h. En la **Tabla 19**, se muestra el coste de energía asociado al proceso de tintura del tejido de algodón en la máquina industrial.

Tabla 19. Costes de energía en función de los horarios

Precio electricidad	Consumo (kWh)	Precio (€/kWh)	Costo Total (€/ciclo)
Medio	149.44	0.0848	73.90
Bajo	149.44	0.03629	31.63
Alto	149.44	0.14394	125.49

El proceso de tintura en la industria textil consume la mayor cantidad de energía, ya que es necesario alcanzar altas temperaturas. En comparación, el consumo energético de otros equipos como bombas y agitadores es mucho menor, por lo tanto, se van a considerar despreciables.

Este tipo de industrias operan las 24 h del día, por lo tanto, para calcular el coste de energía se va a tomar el precio promedio, obteniendo un valor de 77 €/ciclo.

Tabla 20. Coste promedio de energía

Consumo (kWh)	Precio promedio (€/ciclo)
149.44	77

6.4 Coste personal

En cuanto al coste de personal, se va a considerar únicamente al personal involucrado en el proceso de tintura del tejido. Para ello, se empleará un técnico tintorero encargado de cargar el tejido en la máquina, añadir el colorante y controlar la temperatura que debe alcanzar la máquina RBNVI.

Según el BOE, un técnico tintorero recibe un salario mensual de 1357.58 € para una jornada completa de 8 horas labores. Este valor corresponde al salario bruto que recibe el empleado, sin

embargo, para la empresa el coste mayor ya que a este salario hay que añadirle una serie de gastos adicionales.

La seguridad social representa un 30% de incremento partiendo del salario bruto. El desempleo para un contrato indefinido supone un 5.5% del salario bruto. Por otro lado, la formación profesional supone un 0.6% de gasto adicional. El Fondo de Garantía Salarial aumenta los gastos un 0.2%. Y las contingencias profesionales suponen 3.5% de gasto adicional.

En la **Tabla 21** se muestra el coste total que supone un empleado para la empresa mensualmente.

Tabla 21. Industria de obtención de fibras de algodón y obtención de subproductos

Concepto	Valor	Gastos empresa (€)
Salario bruto	1357.58	1357.58
Seguridad social	30%	407.27
Desempleo (contrato indefinido)	5.5%	74.67
Formación profesional	0.6%	8.15
Fondo de Garantía Salarial	0.2%	2.72
Contingencias Profesionales	3.5%	47.52
COSTE TOTAL MENSUAL		1897.91 €

El coste mensual para la empresa de emplear un técnico tintorero es de 1897.91 €. Considerando que un mes tiene 22 días hábiles y que la jornada laboral dura 8 h, obtenemos que el coste es del trabajador es de 10.78 €/h.

El tiempo de ciclo para el proceso de tintura es de 85 minutos, por lo tanto, el coste que supone el trabajador a la empresa es de 15.27 €/ciclo.

6.5 Costes totales

A continuación, se muestra una tabla con los costes globales por ciclo para cada tipo de colorante empleado.

Tabla 22. Coste total por ciclo

Concepto	Colorante natural (€/ciclo)	Colorante sintético (€/ciclo)
Reactivos	3488.03	2960.09
Energía	77	77
Personal	15.27	15.27
TOTAL	3580.3	3052.36

El proceso de tintura utilizando colorantes naturales implica un pretratamiento del tejido que requiere utilizar reactivos que encarecen significativamente el proceso, ya que el fertilizante que actúa como colorante es relativamente económico. En cambio, el colorante sintético es más costoso, pero los reactivos empleados en el pretratamiento del tejido, ZnO y resina acrílica, son altamente económicos.

Teniendo en cuenta que en cada ciclo se tintan 285.71 kg de tejido, el precio total de proceso de tintura es de 12.53 €/kg cuando se utiliza el colorante natural y de 10.68 €/kg cuando se emplean colorantes sintéticos. A continuación, se presenta una tabla resumen del coste definitivo del uso de distintos colorantes para el proceso de tintura de tejidos de algodón.

Tabla 23. Comparación de costes entre colorantes sintéticos y naturales

	Colorante natural	Colorante sintético
TOTAL	12.53 €/kg	10.68 €/kg

7 Conclusiones

En el presente proyecto se han utilizado fertilizantes basados en sustancias húmicas como colorantes textiles capaces de sustituir colorantes empleados de manera convencional en el sector. Para validar este uso se ha realizado un diseño experimental de tintura de fibras de algodón mostrando las siguientes conclusiones.

- Se ha comprobado que el colorante natural puede ser utilizado para un proceso de tintura de fibras de algodón proporcionando un elevado factor de protección UV y una diferencia significativa de color frente a la muestra no teñida.
- A partir del diseño experimental, en el que se han estudiado los efectos de tres variables siendo estas el valor de pH, la concentración de las sustancias húmicas y la temperatura, se han obtenido las condiciones óptimas en las que hay que realizar el proceso de tintura. Aunque el diseño experimental indica que la concentración de sustancias húmicas debe ser de aproximadamente 4000 mg/L para que el proceso sea óptimo, se ha decidido trabajar con las condiciones del ensayo 12, empleando una concentración de 2500 mg/L. Aunque estas condiciones no son las óptimas que nos ofrece el diseño experimental, son lo suficientemente cercanas a los valores deseados ya que la superficie de respuesta obtenida a partir de la concentración de 2500 mg/L no presenta variaciones significativas con los valores óptimos, permitiendo la optimización de los costes y del proceso.
- Se ha realizado un escalado industrial a partir de las capacidades de tratamiento de la máquina de tintura RBNVI. A partir del escalado, se ha llevado a cabo un estudio económico y se han comparado los costes obtenidos del proceso de tintura empleando colorantes naturales con los de un tratamiento alternativo utilizando colorantes sintéticos, que también ofrecen protección en el rango UV. El análisis revela que el empleo de colorantes sintéticos supone un coste de 10.68 € por kilogramo de tela, mientras que el empleo de colorantes naturales supone un coste 12.53 € por kilogramo de tela, mostrando una diferencia del precio del 14.76%. Aunque el precio final del colorante sintético es menor, es importante considerar los beneficios ambientales que proporciona la utilización de colorantes naturales en productos textiles valorando las similitudes en los resultados de tintura.

- El escalado industrial se trata de un estudio preliminar del mismo, por lo que para poder realizar un escalado industrial en la vida real del proceso estudiado, se debería hacer un estudio más detallado, teniendo en cuenta todos los aspectos necesarios para la puesta en marcha de un proceso productivo industrial.

8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] “REVOLUCIÓN INDUSTRIAL,” España, Apr. 2023. Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://cards.algoreducation.com/es/maps/revolucion-industrial>
- [2] A. Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Iztapalapa. Departamento de Filosofía, *Signos históricos.*, vol. 13, no. 25. UAM, Unidad Iztapalapa, División de Ciencias Sociales y Humanidades, 2011. Accessed: Jul. 03, 2024. [Online]. Available: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-44202011000100005&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- [3] Antonio López, “Henry Bessemer, el mago del acero que transformó las ciudades,” Nov. 2020, Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.sacyr.com/-/henry-bessemer-el-mago-del-acero-que-transformo-las-ciudades>
- [4] “El vapor y la revolución industrial,” Museo de la Minería y de la Industria. Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: Museo de la Minería y de la Industria
- [5] C. Espíndola and J. O. Valderrama, “Huella del Carbono. Parte 1: Conceptos, Métodos de Estimación y Complejidades Metodológicas,” *Información tecnológica*, vol. 23, no. 1, pp. 163–176, 2012, doi: 10.4067/S0718-07642012000100017.
- [6] Etecé. Equipo editorial, “Industria textil.” Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://concepto.de/industria-textil/>
- [7] U. Nimkar, “Sustainable chemistry: A solution to the textile industry in a developing world,” *Curr Opin Green Sustain Chem*, vol. 9, pp. 13–17, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.cogsc.2017.11.002.
- [8] FLUENCE NEWS TEAM, “Textile Industry Water Use and Treatment,” *Fluence Corporation*, Jul. 2024, Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.fluencecorp.com/textile-industry-water-use/>
- [9] Parlamento Europeo, “El impacto de la producción textil y de los residuos en el medio ambiente,” Mar. 2024, Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20201208STO93327/el-impacto-de-la-produccion-textil-y-de-los-residuos-en-el-medio-ambiente>
- [10] Montserrat Rodríguez Ogea, “FIBRAS CELULÓSICAS DE ORIGEN FORESTAL EN LA INDUSTRIA TEXTIL,” *ARTÍCULOS DE LA MATERIOTECA*, 2022, Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: https://www.materioteca.gal/wp-content/uploads/2022/08/arti%CC%81culo_fibras_celulosicas_origen_forestal_ES.pdf
- [11] C. i T. Generalitat de Catalunya Departament d’Indústria, *Ús racional de l’aigua al sector d’ennobliment del tèxtil*. Barcelona: Vikinf, S.A.
- [12] Statista Research Department, “Volumen de fibras químicas y textiles producidas a nivel mundial 1975-2022,” May 2024. Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://es.statista.com/estadisticas/635165/volumen-de-fibras-quimicas-y-textiles-producidas-a-nivel-mundial/>

- [13] Greenpeace México, “Fast fashion: de tu armario al vertedero,” *Greenpeace*, Jan. 2021, Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.greenpeace.org/mexico/blog/9514/fast-fashion/>
- [14] Parlamento Europeo, “El PE quiere medidas más duras para reducir los residuos textiles y alimenticios,” Mar. 2024, Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/news/es/press-room/20240308IPR19011/el-pe-quiere-medidas-mas-duras-para-reducir-los-residuos-textiles-y-alimenticios>
- [15] CIRCULAR INDUSTRY 2.0, “ECONOMÍA CIRCULAR Y SIMBIOSIS INDUSTRIAL ENTRE SECTORES TRACTORES DE LA COMUNITAT VALENCIANA (TRANSPORTE/AUTOMOCIÓN, CALZADO, TEXTIL Y JUGUETE),” *Aitex*, 2021, Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.aitex.es/portfolio/circular-industry-2-0-economia-circular-y-simbiosis-industrial-entre-sectores-tractores-de-la-comunitat-valenciana-transporte-automocion-calzado-textil-y-juguete/>
- [16] Mark Athletic, “Proceso de fabricación de fibras sintéticas en la industria textil.” Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.playerasmark.com/proceso-de-fabricacion-de-fibras-sinteticas-en-la-industria-textil/>
- [17] Institute for Prospective Technological Studies (Joint Research Centre), “Environmental improvement potential of textiles (IMPRO Textiles),” Jan. 2014. Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/f8d0def8-4fd5-4d84-a308-1dfa5cf2e823/language-en>
- [18] EDYM, “Materia prima textil”, Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: https://edym.net/Materia_prima_textil_gratis/2p/matprim/cap06/cap06-1.htm
- [19] A. Solé, “Hilatura del algodón,” *AITEX*, Oct. 2012, Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://asolengin.wordpress.com/wp-content/uploads/2013/12/hilatura-de-fibras-cortas.pdf>
- [20] Raquel, “Fibras Sintéticas y Especiales.” Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://fibrassinteticasyespecialesraquel.wordpress.com/2-1-caracteristicas-fisicas-y-quimicas-de-las-fibras-sinteticas/>
- [21] M. A. Quintar and M. F. Rodríguez, “Obtención de fibras de algodón con actividad antimicrobiana,” 2017. Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/6251>
- [22] S. Gordon and Y.-I. HSIEH, *Cotton: Science and technology*. Woodhead Publishing, 2006.
- [23] A. Sanz Tejedor, “Tecnología de la celulosa. La industria papelera”, Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.eii.uva.es/organica/qoi/tema-03.php>
- [24] “Glicol quitosano (hidroxietil).” Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://chitosanlab.com/es/glicol-quitosano-hidroxietil/>
- [25] G. A. Ojeda Brito, “Teñido de fibra de abacá (*Musa textilis*) utilizando colorante extraído de la cochinilla (*Dactylopius coccus* Costa),” Universidad técnica particular de Loja, Ecuador, 2012. Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available:

- <https://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/3853/3/Ojeda%20Brito%20Galo%20Antonio.pdf>
- [26] “El cultivo del algodón,” *Traxco*, Apr. 2012, Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.traxco.es/blog/produccion-agricola/algodon#:~:text=El%20algod%C3%B3n%20se%20encuentra%20a,34%2C8%20millones%20de%20hect%C3%A1reas>.
- [27] “Así se aplica el big data de la agricultura al cultivo de algodón andaluz,” *ABCdesevilla*, Sevilla. Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://sevilla.abc.es/contenidopromocionado/2020/03/06/analisis-de-datos-sensores-cultivo-algodon-agricultura-valenzuela/>
- [28] J. V. Chichizola Romero, “ENGOMADO DE URDIMBRES,” Aug. 2017, Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/engomado-de-urdimbres-julio-vittorio-chichizola-romero/>
- [29] “Cómo se hace el hilo de algodón paso a paso,” *RECOVO*, Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://recovo.co/es/blog/article/como-se-fabrica-el-algodon-paso-a-paso>
- [30] LIFE SEACOLORS, “DEMOSTRACIÓN DEL USO DE NUEVOS COLORANTES NATURALES OBTENIDOS A PARTIR DE LAS ALGAS, COMO SUSTITUTOS DE COLORANTES SINTÉTICOS UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA TEXTIL.” Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.aitex.es/life-seacolors-demostracion-del-uso-de-nuevos-colorantes-naturales-obtenidos-a-partir-de-las-algas-como-sustitutos-de-colorantes-sinteticos-utilizados-en-la-industria-textil/>
- [31] QuimiNet, “La importancia de los colorantes en la industria textil,” Nov. 2011, Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.quiminet.com/articulos/la-importancia-de-los-colorantes-en-la-industria-textil-2637578.htm>
- [32] “COLORANTES REACTIVOS.” Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://quimica-textil-fiq-unac.blogspot.com/2014/05/colorantes-reactivos.html>
- [33] S. Moldovan, “DYEING AND PRINTING NATURAL FIBERS WITH ALGAEBASED COLORANTS,” UPV, España, 2021. Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/180349/Moldovan%20-%20DYEING%20AND%20PRINTING%20NATURAL%20FIBERS%20WITH%20ALGAE-BASED%20COLORANTS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [34] “CONSTITUYENTES DEL SUELO. FASE SOLIDA.” Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <http://www.edafologia.net/introeda/tema02/susthum.htm>
- [35] “Sustancias Húmicas: Origen, Caracterización Y Uso En La Agricultura.” Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/acidos-humicos-fulvicos-nutricion-vegetal>
- [36] “De la materia orgánica a los minerales: un proceso muy vivo”, Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.edalife.es/de-la-materia-organica-a-los-minerales-un-proceso-muy-vivo/>

- [37] “Ácidos húmicos y fúlvicos: diferencias y características.” Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://bioky.es/acidos-humicos-y-fulvicos-diferencias-y-caracteristicas/>
- [38] “Funciones de las Sustancias Humicas Acidos Fulvicos.” Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.fertilab.com.mx/blog/247-funciones-de-las-sustancias-humicas-acidos-fulvicos/>
- [39] “Desinfección por UV,” *Garcia Robles*, Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://garciarobles.com/climatizacioncalefaccion/desinfeccion-por-uv/>
- [40] “Cáncer de piel,” *Asociación española contra el cáncer*, Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.contraelcancer.es/es/todo-sobre-cancer/tipos-cancer/cancer-piel>
- [41] I. M. Algaba Joaquín, M. Pepió Viñals, and A. Riva Juan, “Modelización de la influencia del tratamiento con dos blanqueadores ópticos en el UPF de tejidos celulósicos,” *Institut d’Investigació Tèxtil i Cooperació Industrial de Terrassa. Universitat Politècnica de Catalunya*, 2008, Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099/9052>
- [42] D. M. García Cruz, “Materiales macroporosos biodegradables basados en quitosano para la ingeniería tisular,” UPV, Valencia, 2008. Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/4327/tesisUPV2973.pdf;jsessionid=3605D8616A8F44870BCDBA07FDC77603?sequence=1>
- [43] “Doehlert ,” ResearchGate. Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Doehlert-designs-for-the-optimization-of-three-variables-29-The-cuboctahedron-exhibits_fig3_336086779
- [44] “Entendiendo El Espacio de Color CIE L*A*B*,” *KONICA MINOLTA*, Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://sensing.konicaminolta.us/mx/blog/entendiendo-el-espacio-de-color-cie-lab/>
- [45] M. Souissi, S. Chaouch, A. Moussa, and H. Dhaouadi, “Dyeing of advanced denim fabrics (blend of cotton/bicomponent polyester filaments) using different processes and artificial intelligence method,” *Sci Rep*, vol. 14, no. 1, p. 1952, Jan. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-52189-y.
- [46] Y. C. Ramos Torres, “PRENDAS DE VESTIR CON PROTECCIÓN DE RAYOS ULTRA VIOLETA,” Lima, 2020. Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/18556/RAMOS_TORRES_YURIKO_CECILIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [47] “Máquinas para teñido,” Loris Bellini. Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.loribellini.com/spa/index.php/productos/tintura/>
- [48] “Procesos y maquinaria en la industria textil,” FDtextil. Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://fdtextil.es/procesos-y-maquinaria-en-la-industria-textil/>
- [49] Entidad Pública de Saneamiento de Aguas Residuales (EPSAR), “Tarifes canon 2022.” Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: https://www.epsar.gva.es/sites/default/files/2022-01/tarifes%20canon%202022_val.pdf

- [50] “10 colorantes usados en los laboratorios de química,” FUJIFILM. Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.wakolatinamerica.com/blog-reactivos/noticias-wako/post/10-colorantes-usados-en-los-laboratorios-de-quimica/>