

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Química y Textil



TESIS

Proceso de cationizado por agotamiento en tejidos de algodón como alternativa de proceso de tintura reactiva sostenible

Para obtener el título profesional de Ingeniero Textil

Elaborado por

Ytalo Luis Guerrero Minaya

 0000-0001-9887-1629

Asesor

Mag. Carmen Luisa Uribe Valenzuela

 0000-0001-5772-6038

LIMA – PERÚ

2023

Citar/How to cite	Guerrero Minaya [1]
Referencia/Reference	[1] Y. Guerrero Minaya, " <i>Proceso de cationizado por agotamiento en tejidos de algodón como alternativa de proceso de tintura reactiva sostenible</i> " [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2023.
Estilo/Style:	
IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Guerrero, 2023)
Referencia/Reference	Guerrero, Y. (2023). <i>Proceso de cationizado por agotamiento en tejidos de algodón como alternativa de proceso de tintura reactiva sostenible</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style:	
APA (7ma. Ed.)	

Dedicatoria

A mis padres por todo el amor y apoyo brindado en estos años de vida. Todo esto es fruto de su gran esfuerzo.

Agradecimientos

En primer lugar, quisiera agradecer a Dios, por todo lo que me ha brindado hasta ahora.

Agradecer a mi asesora, Magister Carmen Luisa Uribe Valenzuela, por todas las enseñanzas y consejos en todo este largo proceso.

A la Escuela Profesional de Ingeniería de Textil de la UNI por permitirme utilizar los equipos y maquinarias del laboratorio para el desarrollo experimental de esta tesis.

Esta tesis se realizó gracias al apoyo del proyecto P-IA-2021-000659 Preparación de (nano)fibras de celulosa a partir de residuos de cáscaras de frutas para aplicación en la remoción de colorantes textiles. Ensayos en sistema batch con efluentes derivados de procesos de cationización de fibras.

Resumen

La presente investigación se enfocó en la búsqueda de una técnica amigable con el medio ambiente que pueda reemplazar el proceso de teñido reactivo convencional, el cual consume grandes cantidades de agua y productos químicos tóxicos como la sal. El proceso de cationizado del algodón se planteó como una solución, en la cual se trataron muestras de algodón utilizando el 3-cloro-2-hidroxipropiltrimetilamonio (CHPTAC) como agente cationizante a diferentes concentraciones. Luego, estas muestras tuvieron que ser teñidas sin la presencia de sal y se compararon con muestras teñidas convencionalmente con colorantes reactivos. Las muestras cationizadas obtuvieron resultados de solidez al lavado de 4-5; solidez al frote en seco de 5 y en húmedo de 4; así como solidez a la luz de 4,5. Con relación a la evaluación espectrofotométrica, se demostró que las muestras teñidas, previamente cationizadas con una concentración de 60 g/L como mínimo obtuvieron mayor variación de fuerza relativa de color. Se cationizaron más muestras de algodón a una concentración de 70 g/L de CHPTAC para luego teñirlas bajo la curva optimizada de teñido reactivo y sin presencia de sal. Esta curva optimizada presentó un proceso de un enjuague más neutralizado que se realizó posterior a la tintura, luego de esto se realizó solo un jabonado a 75°C, finalizando con un enjuague en frío. Los resultados obtenidos de este nuevo proceso optimizado fue el ahorro de agua en un 39,47% y un ahorro de tiempo de 14,71%.

Palabras clave – Algodón, cationizado, sostenible, tintura.

Abstract

The present research focused on the search for an environmentally friendly technique that could replace the conventional reactive dyeing process, which consumes large amounts of water and toxic chemicals such as salt. The cotton cationization process was approached as a solution, in which cotton samples were treated using 3-chloro-2-hydroxypropyltrimethylammonium (CHPTAC) as the cationizing agent at different concentrations. Then, these samples had to be dyed without the presence of salt and were compared with samples conventionally dyed with reactive dyes. The cationized samples obtained wash fastness results of 4-5; dry rub fastness of 5 and wet rub fastness of 4; as well as light fastness of 4,5. In relation to spectrophotometric evaluation, it was demonstrated that the dyed samples previously cationized with a concentration of at least 60 g/L, obtained a greater variation in relative color strength. More cotton samples were cationized at a concentration of 70 g/L of CHPTAC and then dyed under the optimized reactive dyeing curve without the presence of salt. This optimized curve presented a rinsing process plus a neutralizing process that was performed after dyeing, followed by a single soaping at 75°C, ending with a cold rinse. The results obtained from this new optimized process were water savings of 39.47% and time savings of 14.71%.

Keywords – cationization, dyeing, cotton, sustainable.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen.....	v
Abstract.....	vi
Capítulo I. Introducción	1
1.1 Antecedentes referenciales	1
1.2 Planteamiento de la realidad problemática	3
1.3 Objetivos	5
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	5
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	5
1.4 Hipótesis	5
1.4.1 <i>Hipótesis general</i>	5
1.4.2 <i>Hipótesis específicas</i>	5
Capítulo II. Marco teórico	7
2.1 El algodón	7
2.1.1 <i>Composición química del algodón</i>	9
2.1.2 <i>Estructura molecular de la celulosa</i>	12
2.2 Colorantes reactivos.....	14
2.3 Método tintura reactiva por agotamiento	16
2.3.1 <i>Tintura por agotamiento</i>	16
2.3.2 <i>Mecanismo de teñido</i>	18
2.3.3 <i>Parámetros que influyen en el proceso de teñido</i>	20
2.4 Cationización del algodón	23
2.5 Proceso de Tintura Sostenible	25
2.6 Evaluaciones de calidad en los teñidos	26
2.6.1 <i>Solidez al lavado</i>	27
2.6.2 <i>Solidez al frote</i>	27
2.6.3 <i>Solidez a la luz</i>	28
Capítulo III. Procedimiento experimental	30
3.1 Obtención de los tejidos de algodón cationizados	30
3.1.1 <i>Caracterización del sustrato textil</i>	30
3.1.2 <i>Método de cationizado del algodón</i>	31
3.2 Método del teñido con colorantes reactivos.....	33
3.3 Método del teñido con colorantes reactivos utilizando curva optimizada	37
3.4 Evaluación del color	42
3.4.1 <i>Calibración del espectrofotómetro</i>	43
3.4.2 <i>Medición de color de muestras</i>	44

3.5	Evaluación de solidez de las muestras	45
3.5.1	<i>Evaluación de solidez al lavado</i>	45
3.5.2	<i>Evaluación de solidez al frote</i>	47
3.5.3	<i>Evaluación de solidez a la luz</i>	49
	Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados.....	50
4.1	Evaluación espectrofotométrica de las muestras.....	50
4.2	Análisis de solidez al lavado.....	58
4.3	Análisis de solidez al frote	60
4.4	Análisis de solidez a la luz.....	61
4.5	Resultados de tintura con concentraciones óptimas de cationizado	62
4.5.1	<i>Evaluación de fuerza de color en las muestras</i>	63
4.5.2	<i>Análisis de solidez al lavado</i>	66
4.5.3	<i>Análisis de solidez al frote</i>	69
4.6	Ahorro de recursos en el proceso de teñido reactivo con la curva optimizada.....	70
4.6.1	<i>Ahorro de tiempo</i>	70
4.6.2	<i>Ahorro de agua</i>	71
4.6.3	<i>Costo del cationizado</i>	72
	Conclusiones	73
	Recomendaciones	75
	Referencias bibliográficas	76
	Anexos.....	80

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: <i>Composición química del algodón</i>	12
Tabla 2: <i>Caracterización del tejido jersey 100% algodón</i>	31
Tabla 3: <i>Receta de teñido reactivo para el color negro en algodón sin cationizar</i>	36
Tabla 4: <i>Receta de teñido reactivo para el color negro en algodón cationizado</i>	36
Tabla 5: <i>Receta de teñido reactivo para el color rojo al 2% en algodón sin cationizar</i>	40
Tabla 6: <i>Receta de teñido reactivo para el color rojo al 2% en algodón cationizado</i>	40
Tabla 7: <i>Receta de teñido reactivo para el color rojo al 4% en algodón sin cationizar</i>	41
Tabla 8: <i>Receta de teñido reactivo para el color rojo al 4% en algodón cationizado</i>	41
Tabla 9: <i>Receta de teñido reactivo para el color rojo al 6% en algodón sin cationizar</i>	42
Tabla 10: <i>Receta de teñido reactivo para el color rojo al 6% en algodón cationizado</i>	42
Tabla 11: <i>Condiciones de operación para la evaluación de solidez a la luz</i>	49
Tabla 12: <i>Fuerza relativa de color de las muestras cationizadas a diferentes concentraciones y teñidas con 6% de Corafix Black SD</i>	57
Tabla 13: <i>Resultados de solidez al lavado: evaluación de cambio de color</i>	58
Tabla 14: <i>Resultados de solidez al lavado: evaluación de transferencia de color</i>	59
Tabla 15: <i>Resultados de solidez al frote de las muestras teñidas a negro</i>	60
Tabla 16: <i>Resultados de solidez a la luz de las telas teñidas a negro</i>	62
Tabla 17: <i>Fuerza relativa de color de las muestras cationizadas al 2% Corafix Red ME4B 150%</i>	64
Tabla 19: <i>Fuerza relativa de color de las muestras cationizadas al 6% Corafix Red ME4B 150%</i>	65
Tabla 20: <i>Resultados de solidez al lavado: evaluación de cambio de color a las muestras teñidas a rojo</i>	67
Tabla 21: <i>Resultados de solidez al lavado: evaluación de transferencia de color a las muestras teñidas a rojo</i>	68
Tabla 22: <i>Resultados de solidez al frote de las muestras teñidas a rojo</i>	69
Tabla 23: <i>Cálculo del tiempo de ejecución del proceso de teñido reactivo convencional vs. proceso de teñido reactivo de muestra cationizada</i>	71
Tabla 24: <i>Comparativa de consumo de agua: proceso de teñido reactivo convencional vs. proceso de teñido reactivo de muestra cationizada</i>	72
Tabla 25: <i>Costo de la receta de cationizado de algodón</i>	72

Lista de Figuras

Pág.

Figura 1: <i>Sección longitudinal de la fibra de algodón</i>	8
Figura 2: <i>Estructura molecular de la glucosa, celobiosa y celulosa</i>	13
Figura 3: <i>La celulosa y su interacción con el colorante</i>	14
Figura 4: <i>Principales grupos cromóforos</i>	15
Figura 5: <i>Principales grupos auxocromos</i>	16
Figura 6: <i>Tintura por agotamiento</i>	17
Figura 7: <i>Reacción de adición nucleofílica</i>	19
Figura 8: <i>Reacción de sustitución nucleofílica</i>	19
Figura 9: <i>Mecanismo de teñido de fibras celulósicas con colorantes reactivos</i>	20
Figura 10: <i>Teñido tradicional del algodón</i>	22
Figura 11: <i>Diagrama conceptual de la cationización de tejidos de punto de algodón</i>	24
Figura 12: <i>Máquina de teñido infrarrojo</i>	31
Figura 13: <i>Curva del método de cationizado de los tejidos de algodón</i>	32
Figura 14: <i>Curva del método de teñido con colorantes reactivos de los tejidos de algodón</i> . .	35
Figura 15: <i>Curva optimizada del método de teñido de los tejidos de algodón con colorantes reactivos</i>	39
Figura 16: <i>Espectrofotómetro y accesorios</i>	44
Figura 17: <i>Presentación de muestras para la lectura en el espectrofotómetro</i>	45
Figura 18: <i>Tipos de escalas de grises</i>	47
Figura 19: <i>Curva de reflectancia de las telas negras cationizadas con 20 g/L vs. Tela sin cationizar</i>	50
Figura 20: <i>Curva de reflectancia de las telas negras cationizadas con 30 g/L vs. Tela sin cationizar</i>	51
Figura 21: <i>Curva de reflectancia de las telas negras cationizadas con 40 g/L vs. Tela sin cationizar</i>	52
Figura 22: <i>Curva de reflectancia de las telas negras cationizadas con 50 g/L vs. Tela sin cationizar</i>	53
Figura 23: <i>Curva de reflectancia de las telas negras cationizadas con 60 g/L vs. Tela sin cationizar</i>	54
Figura 24: <i>Curva de reflectancia de las telas negras cationizadas con 70 g/L vs. Tela sin cationizar</i>	55

Figura 25: <i>Curva de reflectancia de las telas negras cationizadas con 80 g/L vs. Tela sin cationizar.</i>	56
Figura 26: <i>Baños luego del teñido con colorante Corafix Red ME4B 150% a diferentes concentraciones.</i>	63
Figura 27: <i>Baños luego del enjuague obtenidos al teñir con Corafix Red ME4B 150% a diferentes concentraciones.</i>	63

Capítulo I. Introducción

1.1 Antecedentes referenciales

Arivithamani y Giri Dev (2018) en su estudio acerca de la caracterización y comparación de algodón cationizado teñido sin sal con el algodón teñido convencionalmente con colorantes reactivos; después de haber realizado sus pruebas a escala industrial, determinaron que la fijación total del colorante del tejido teñido de algodón cationizado fue del 58,2%, mientras que la de la del tejido teñido convencionalmente fue del 51,7%. Adicionalmente, precisaron que ambas muestras teñidas tenían similar fuerza relativa de color, la muestra teñida sin sal obtuvo 101%, mientras que la muestra teñida de manera convencional obtuvo 100%. Los parámetros de teñido utilizados en este estudio fueron los siguientes: porcentaje de fijación total del colorante (T), la intensidad de color (K/S), porcentaje de intensidad relativa del color (RCS), valores de las coordenadas del color (CIE L*, a*, b*) y diferencia de color (ΔE). Además, al analizar los efluentes, precisaron que el total de sólidos disueltos (TDS) en el algodón cationizado teñido era 4 veces menor que en algodón teñido convencionalmente. El agente cationizante que utilizaron fue el 3-cloro-2-hidroxipropiltrimetilamonio (CHPTAC).

Ma et al. (2017) en su artículo publicado, mostraron los resultados del estudio de la influencia de los siguientes parámetros en la cationización del algodón con cloruro de glicidiltrimetilamonio (GTA): concentración del agente cationizante, concentración del álcali (NaOH), temperatura y el tiempo de la cationización. Con los resultados obtenidos definieron las siguientes condiciones óptimas para la cationización en el pretratamiento combinado: la concentración de GTA es de 30 g/L, la concentración de NaOH es de 3 g/L, la temperatura de reacción es de 90°C y el tiempo es de 15 minutos.

Farrell y Hauser (2013) realizaron un estudio en el cual compararon el proceso de teñido convencional con colorantes reactivos versus el proceso de teñido con colorantes

reactivos de la muestra cationizada previamente, bajo dos métodos de teñido: por agotamiento y por impregnación. Los resultados arrojaron un ahorro en el consumo de agua, por agotamiento fue aproximadamente 33% en comparación con el teñido convencional; mientras que por impregnación fue cerca del 25% de ahorro. El ahorro de energía en el teñido por impregnación de la muestra cationizada fue aproximadamente del 25%, en cambio en el teñido por agotamiento de la muestra cationizada se utilizó cerca de 16% más de energía que en el teñido convencional. El costo del proceso de teñido por impregnación de la muestra cationizada fue aproximadamente 20% más económico que el proceso de teñido convencional, este ahorro no se presentó en el costo del proceso de teñido por agotamiento de la muestra cationizada, que resultó cerca de 10% más caro que el teñido convencional. Por otro lado, los resultados obtenidos de los tests de control de calidad sobre las muestras cationizadas teñidas fueron similares y en algunos casos hasta mejores que de la muestra teñida convencionalmente. Adicionalmente, demostraron que el 3-cloro-2-hidroxiopropiltrimetilamonio (CHPTAC) posee una toxicidad relativamente baja y puede seguir utilizándose como agente catiónico.

Ristic y Ristic (2012) evaluaron el análisis SEM y el valor de retención de agua, con esto determinaron que el grado de carga superficial se reduce significativamente al cationizar el sustrato, teniendo en consideración la medición de la potencial zeta. A pesar de esto, se observó que el algodón tiene carga negativa en condiciones alcalinas a la hora de adicionar el colorante. La estructura física de la fibra no se alteró debido a la cationización, así como la retención del agua disminuyó mínimamente, esto no influye en el hinchamiento de la fibra de algodón al momento de teñir. El teñido reactivo de las muestras cationizadas sin presencia de sal, aumenta la intensidad de color aproximadamente en un 30% con el incremento paulatino de la concentración del agente catiónico.

Montazer et al. (2007) realizaron un estudio en el cual tomaron el 3-cloro-2-hidroxipropiltrimetilamonio como agente catiónico para realizar un pretratamiento a las muestras de algodón, las cuales fueron teñidas con colorantes de diferentes grupos reactivos. Sus resultados indicaron que el tipo de grupos reactivos de los colorantes no influyeron en las propiedades de teñido del algodón cationizado. La intensidad de color, así como la solidez a la luz de las muestras cationizadas fueron mejores que de las muestras de algodón sin cationizado previo.

1.2 Planteamiento de la realidad problemática

En el transcurso de la historia, el hombre ha ido evolucionando debido al gran desarrollo industrial y tecnológico que nos ha brindado muchos beneficios, pero a la par nos ha traído muchos perjuicios como los graves problemas medioambientales.

La industria textil, la segunda más contaminante del mundo (Sanchez, 2016), no es ajena a esta problemática y se caracteriza por ser una de las industrias que tiene altos consumos de agua, energía y sustancias químicas (Brañez et al., 2018). Asimismo, utiliza de seis a nueve mil billones de litros de agua cada año solo para el teñido de telas (Cole, 2019).

Gran parte del consumo de agua está ligado a los procesos húmedos del sector textil tales como el blanqueo, teñido, estampado y acabado; que más allá de incrementar la escasez de agua, contamina los suministros locales de agua (Xicota, 2020).

Las características de las aguas residuales provenientes de una planta textil dependerán de los procesos que se ejecuten, principalmente de la fibra tratada y de la maquinaria utilizada. Los efluentes de fibras naturales presentan una gran variabilidad de caudal y de carga contaminante. Poseen un bajo contenido de materias en suspensión y coloidales; y generalmente son coloreadas (Lopez-Grimau & Crespi, 2015).

Algunas causas de la toxicidad existente en los efluentes textiles son las sales como NaCl o Na₂SO₄, provenientes del teñido; agentes surfactantes como fenoles, metales pesados que están presentes en los colorantes; compuestos orgánicos como solventes clorados, provenientes del lavado y la limpieza de máquinas; biocidas como el pentaclorofenol, proveniente de fibra de lana contaminada; y aniones tóxicos como el sulfuro, presente en algunos colorantes, entre otros (Bae et al., 2005, como se citó en Cortazar et al., 2014).

La escasa fijación del colorante ha sido un problema de larga data con los colorantes reactivos, en particular en el teñido de fibras celulósicas, donde normalmente se añade una cantidad significativa de sal para mejorar el agotamiento del colorante y, por tanto, también la fijación del colorante. Además del uso de la sal como insumo, la neutralización de los ácidos y álcalis produce sales como subproductos. De esta manera, el color y la sal en el efluente son los principales problemas medioambientales de los teñidos reactivos. Dado que tanto el colorante reactivo no fijado como su forma hidrolizada son solubles en agua, son difíciles de eliminar en las plantas de tratamiento de aguas residuales (Clark, 2011).

Según Clark (2011), en un teñido por agotamiento con una relación de baño de 1:10 necesitará aproximadamente de 30 - 80 g/L de sal. Esto corresponde entre 300 - 800 gramos de sal por kilogramo de algodón teñido. Durante el tratamiento del efluente, sólo se elimina una pequeña cantidad de sal. Por lo tanto, una gran cantidad de sal entra en el medio ambiente cuando se vierte el agua tratada. La alta concentración de sal en el efluente acarrea los siguientes perjuicios: Los ríos y lagos se contaminan con efluentes que contienen una alta concentración de sal, los organismos de agua dulce sufren efectos tóxicos, en regiones con escasos recursos de agua dulce, este tipo de agua tiene que utilizarse para el riego; y si la concentración de sal es demasiado alta, el suelo puede sobrecargarse de sal, haciendo que la tierra se vuelva infértil.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo general*

Proponer un proceso de cationizado de algodón optimizado para su posterior teñido con colorantes reactivos con disminución del consumo de agua y tiempo.

1.3.2 *Objetivos específicos*

- Determinar la influencia de los parámetros que intervienen en la cationización del algodón (tiempo, temperatura, concentración del NaOH y concentración del agente cationizante).
- Definir el método óptimo de tintura reactiva para algodón cationizado.
- Comparar los resultados de color y solidez de las tinturas convencionales y las tinturas reactivas con algodón cationizado.
- Realizar el análisis costo-beneficio de la tintura convencional y la tintura reactiva con algodón cationizado.

1.4 Hipótesis

1.4.1 *Hipótesis general*

La propuesta de optimización del proceso de cationizado de algodón para su posterior teñido con colorantes reactivos logrará disminuir el consumo de recursos tales como agua y tiempo.

1.4.2 *Hipótesis específicas*

- La concentración del NaOH y la concentración del agente cationizante serán los parámetros más influyentes en el proceso del cationizado.
- Al unificar los procesos de enjuague y neutralizado en el teñido reactivo de algodón cationizado se disminuirá el consumo de agua y el teñido se realizará en menor tiempo.

- La performance del teñido reactivo de la muestra cationizada previamente, será similar o mejor que de la muestra teñida convencionalmente.
- La tintura reactiva del algodón cationizado será un proceso viable, teniendo en consideración los resultados del análisis costo-beneficio.

Capítulo II. Marco teórico

2.1 El algodón

El algodón es la fibra natural más importante de todas y posee muchas propiedades, tales como: durabilidad, bajo costo, facilidad de lavado y comodidad, las cuales han convertido al algodón en la fibra más popular a nivel mundial (Hollen et al., 1999).

La planta de algodón pertenece a la familia malvaceae cultivada desde civilizaciones muy antiguas, como los egipcios o el hombre de la cultura Caral, debido a su importancia en el uso textil. Esta planta es perenne, pues produce semillas año tras año; aunque después de algún tiempo este algodón pierde su valor tanto en calidad como cantidad.

La planta del algodón crece en climas moderadamente cálidos y está distribuida por todo el mundo. Las diversas variedades de algodón se diferencian por las propiedades físicas que poseen. El algodón egipcio es el de mayor finura, pero es cultivado en menores cantidades; en países como China, India y Pakistán se siembra una calidad de longitud ligeramente menor. El algodón mayoritariamente se cultiva en 35 países y la producción total asciende aproximadamente a 900 millones de toneladas métricas. Los países con mayor producción de algodón son India, China, Estados Unidos, Pakistán y Brasil (Sreenivasa, 2015).

La calidad del algodón depende de su longitud, del número de convoluciones y su brillantez; las fibras de algodón varían de longitud, dependiendo de su variedad (Hollen et al., 1999). India es el único país que siembra algodón de todas las longitudes, desde el más bajo hasta el más alto, pero la mayoría posee una longitud de fibra que no suele exceder los 25,4 mm, mientras que los algodones egipcios y americanos crecen hasta 63,5 mm de largo (Sreenivasa, 2015).

Las convoluciones o dobleces en forma de cinta es una característica física muy representativa de la fibra de algodón. Una vez que las fibras maduran, el capullo se abre, las

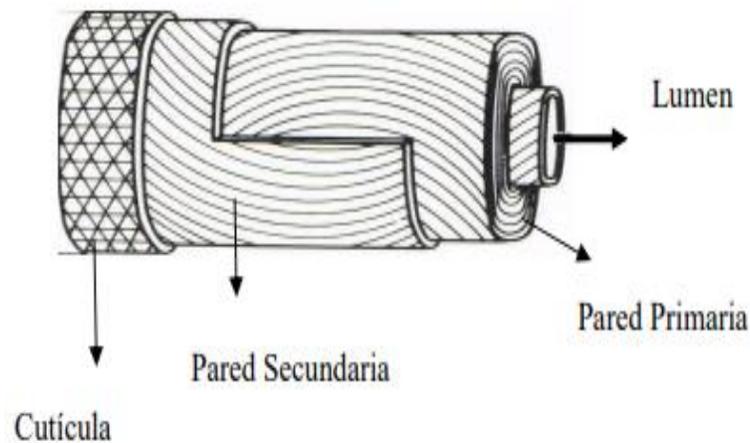
fibras se secan en el exterior y el canal central se colapsa; las espirales inversas logran que las fibras se tuerzan formando una ondulación natural. Esta ondulación brinda cohesión entre las fibras permitiendo al algodón que, a pesar de su corta longitud, sea una de las fibras que se hila con gran facilidad (Hollen et al., 1999).

Un algodón Sea Island posee en promedio 300 convoluciones por pulgada; el algodón egipcio, unas 230; el algodón brasileño, unas 210; el algodón americano, unas 190; y el algodón indio, unas 150 (Gordon, 2001).

La fibra de algodón está formada por una pared primaria, una pared secundaria, una cutícula y un lumen, tal como aparece en la Figura 1. La fibra crece casi a su longitud completa pareciéndose a un tubo hueco, todo esto antes que se empiece a formar la pared secundaria.

Figura 1

Sección longitudinal de la fibra de algodón



Nota. Tomado de Peñafiel (2011).

La cutícula es una película cerosa que cubre la pared primaria, mientras que la pared secundaria está constituida por varias capas de celulosa. Las capas que se depositan durante

el día se diferencian con las que se depositan en la noche por la densidad, lo que genera la aparición de anillos de crecimiento. Estos anillos se pueden observar en la sección transversal.

Las capas de celulosa están compuestas de fibrillas, las cuales son haces de cadenas distribuidos en forma de espiral y su dirección no es constante en todo su sentido, sino que se invierten en ciertos tramos. Estas espirales invertidas son responsables de la torsión, el alargamiento y la recuperación elástica de la fibra, y a su vez, son puntos débiles que poseen una menor resistencia que el resto de la fibra.

El lumen es el canal central por donde se transportan los nutrientes durante el crecimiento de la fibra. Cuando los nutrientes se secan en el lumen se observan zonas oscuras en el algodón que pueden verse con la ayuda del microscopio. Esto nos indica que la fibra ya se encuentra madura (Hollen et al., 1999).

2.1.1 *Composición química del algodón*

La fibra de algodón tras el desmotado y su respectiva limpieza contiene aproximadamente un 95% de celulosa.

Los componentes no celulósicos del algodón. Se localizan principalmente en la cutícula, en la pared primaria y en el lumen. Las fibras de algodón que tienen una alta relación entre la superficie y la densidad lineal generalmente presentan un contenido no celulósico relativamente más alto. Los componentes no celulósicos incluyen proteínas, aminoácidos, otros compuestos que contienen nitrógeno, cera, sustancias pécticas, ácidos orgánicos, azúcares, sales inorgánicas y una cantidad muy pequeña de pigmentos. Las variaciones en estos componentes se deben a las diferencias en la madurez de la fibra, la variedad de algodón y las condiciones ambientales tales como el suelo, clima, prácticas agrícolas, entre otros. Después de los tratamientos para eliminar los materiales no celulósicos naturales, el contenido de celulosa en la fibra es superior al 99%.

De todos los componentes no celulósicos, los compuestos que contienen nitrógeno constituyen el mayor porcentaje cuando se expresan como porcentaje de proteína, aproximadamente entre 1,1 y 1,9%. El contenido de nitrógeno de la fibra descascarillada es de aproximadamente 0,035%, alrededor del 0,22% de proteína. La mayor parte del material nitrogenado se encuentra en el lumen de la fibra, muy probablemente como residuo protoplásmico, aunque una pequeña parte también se extrae de la pared primaria. Los compuestos que contienen nitrógeno localizados en el lumen pueden ser removidos usando agua, mientras que los localizados en la pared primaria se eliminan mediante el calentamiento en hidróxido de sodio al 1%. La fibra de algodón y su pared primaria contienen proteínas y péptidos, aminoácidos libres y, muy probablemente, nitrógeno no proteico. Los aminoácidos libres que se han detectado son el ácido glutámico, el ácido aspártico, valina, serina y treonina (Menachem, 2006).

Cera. Está presente en alrededor del 0,4 al 1,0% del peso seco de la fibra y comprende la cutícula de la superficie externa del algodón. La cantidad de cera aumenta con la superficie del algodón, y los algodones más finos tienden a tener un mayor porcentaje de cera. El contenido de cera natural sirve como barrera protectora tanto para la penetración del agua como para la degradación microbiana de los polisacáridos subyacentes. La cera es un lubricante esencial para el correcto hilado de la fibra de algodón. Sin embargo, una vez hilado el hilo, la cera reduce la resistencia a la tracción del hilo y dificulta el teñido y el acabado de la fibra (Menachem, 2006).

Los azúcares solubles. Proceden de dos fuentes: los residuos metabólicos o azúcares vegetales que se encuentran en el lumen seco y en la superficie exterior de la fibra, así como los azúcares de los insectos que se encuentran en la superficie exterior de la fibra. Los azúcares vegetales o residuos metabólicos se producen como resultado del proceso normal de crecimiento y están compuestos principalmente por los monosacáridos, glucosa y

fructosa, y en menor grado por el disacárido, sacarosa. Pueden oscilar entre el 0,1 y el 1,0% del peso de la fibra seca y su concentración varía en función de la madurez de la fibra de algodón y de los factores ambientales (Menachem, 2006).

Los ácidos orgánicos. Están presentes en alrededor del 0,5 al 1,0% del peso seco de la fibra, excluyendo el ácido péctico, son principalmente el ácido 1-málico y el ácido cítrico, están presentes en el lumen como residuos metabólicos y se eliminan durante el descrudado y el blanqueo debido a su alta solubilidad en agua. Los análisis indican que también están presentes otros ácidos, que suman un 0,3%, pero no se han identificado. Los ácidos orgánicos se eliminan durante el lavado normal.

Los cationes inorgánicos. Están presentes como residuos metabólicos, principalmente en el lumen, como sales de ácidos orgánicos o aniones inorgánicos. Las sales inorgánicas como los fosfatos, carbonatos y óxidos, y las sales de los ácidos orgánicos presentes en la fibra cruda se reportan como porcentaje de cenizas, aproximadamente 1,2% del peso seco de la fibra, y se expresan como los óxidos de los elementos presentes, excluyendo el cloro, que se expresa como tal. Las cantidades de estos cationes presentes en la fibra de algodón varían considerablemente debido a las diferencias de madurez, los factores ambientales; por ejemplo, la lluvia, y las prácticas agrícolas, así como el campo y los procedimientos de manipulación que afectan a la deposición de material en la fibra (Menachem, 2006).

En la Tabla 1, se puede observar los componentes del algodón y su presencia en porcentaje.

Tabla 1*Composición química del algodón.*

Componentes	Composición (% del peso seco)	
	Porcentaje (%)	Rango (%)
Celulosa	95,0	88,0 – 96,0
Proteína (%N x 6,25) ^a	1,3	1,1 – 1,9
Sustancia pécticas	0,9	0,7 – 1,2
Ceniza	1,2	0,7 – 1,6
Cera	0,6	0,4 – 1,0
Azúcares totales	0,3	0,1 – 1,0
Ácidos orgánicos	0,8	0,5 – 1,0
Pigmento	Trazas	-
Otros	1,4	-

Nota. Tomado y traducido de Menachem (2006). ^a: Método estándar de estimación del porcentaje de proteínas a partir del contenido de nitrógeno (% N).

2.1.2 Estructura molecular de la celulosa

La molécula de celulosa está estrechamente relacionada con el de la glucosa. La glucosa forma una estructura anular compuesta de cinco átomos de carbono y uno de oxígeno, como puede observarse en la Figura 2, ítem (a).

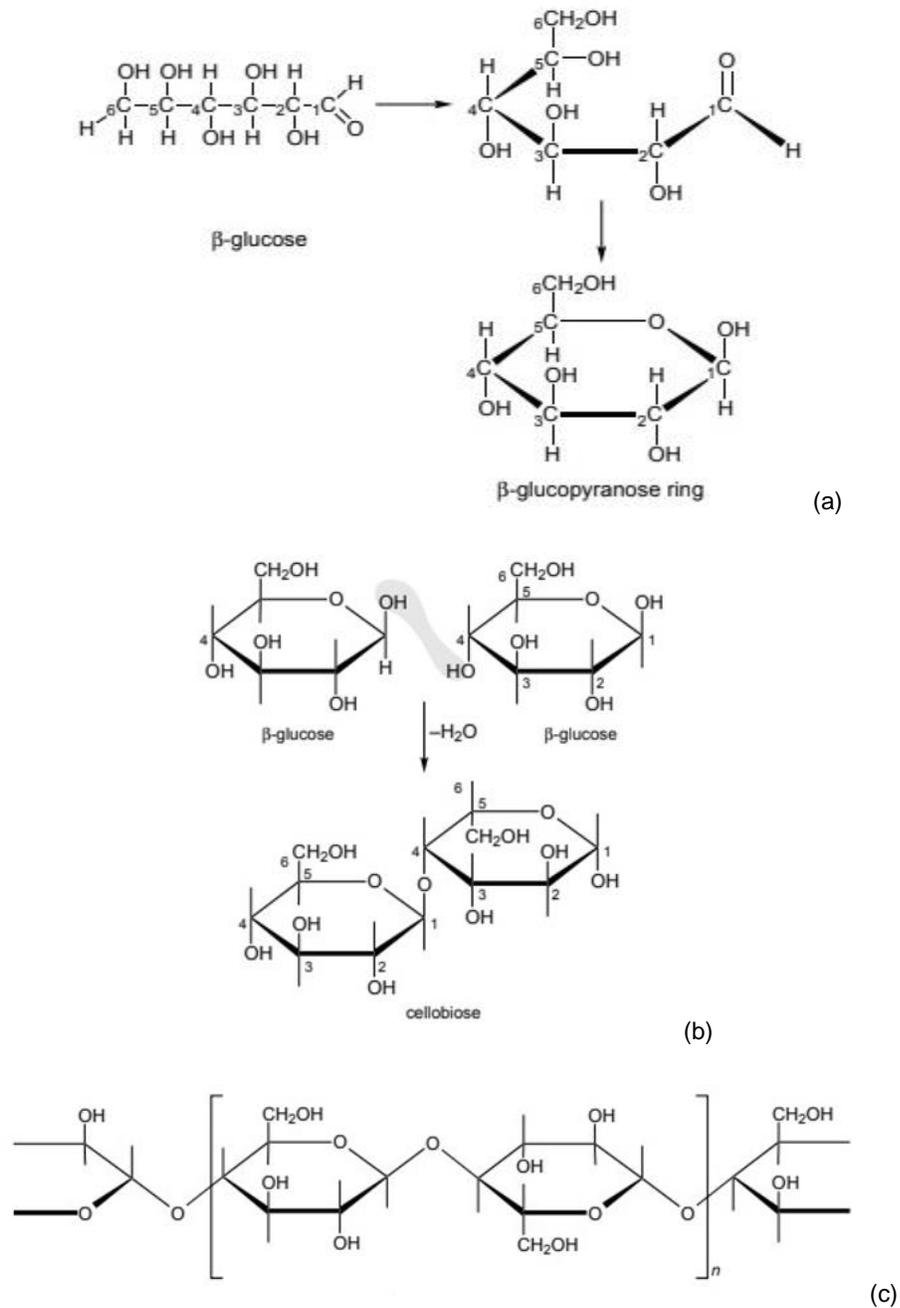
La glucosa es la unidad monomérica del polímero de celulosa, mientras que la unidad de repetición es la celobiosa, un azúcar formado por la unión de dos unidades de glucosa en los grupos hidroxilos terminales unidos a los átomos de carbono 1 y 4 con la pérdida de una molécula de agua, tal como se observa en la Figura 2, ítem (b).

La Figura 2, ítem (c) representa la estructura de la cadena de celulosa; la unidad de repetición se muestra entre paréntesis y se marca con un subíndice *n*, para indicar que hay muchas unidades de este tipo en la cadena. En el caso de la celulosa, este número, a menudo llamado grado de polimerización, depende del origen de la muestra: en el caso de la celulosa

aislada, n es del orden de 3000, es decir, 6000 unidades de glucosa; pero en el caso de la celulosa en las fibras puede ser el doble de este valor, o incluso más.

Figura 2

Estructura molecular de la glucosa, celobiosa y celulosa.



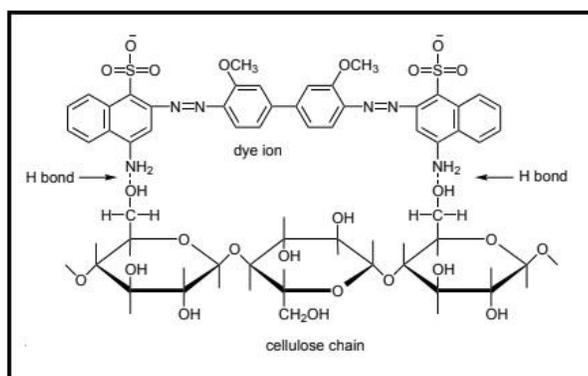
Nota. Adaptado de Ingamells (1993). El significado es el siguiente: (a) La glucosa y β-glucopiranos, (b) La formación de la celobiosa, y (c) La estructura de la cadena de celulosa.

Cada anillo de glucosa de la cadena contiene tres grupos hidroxilos y es su presencia la que permite al algodón absorber la humedad y formar enlaces de hidrógeno, en particular con ciertos colorantes, como se observa en la Figura 3. La formación de enlaces de hidrógeno entre cadenas de celulosa adyacentes tiene un efecto especialmente importante, ya que sin ellos una molécula de agua se uniría a cada grupo hidroxilo de las cadenas de celulosa y la fibra se disolvería. Sin embargo, la celulosa no se disuelve en agua y, de hecho, es insoluble en casi todos los disolventes orgánicos.

Además, la interacción entre las cadenas de polímeros es tan fuerte que la celulosa no se funde al calentarse; las cadenas se rompen y se degradan antes de que la temperatura se eleve a un nivel en el que puedan romperse para formar un líquido.

Figura 3

La celulosa y su interacción con el colorante.



Nota. Tomado de Ingamells (1993).

2.2 Colorantes reactivos

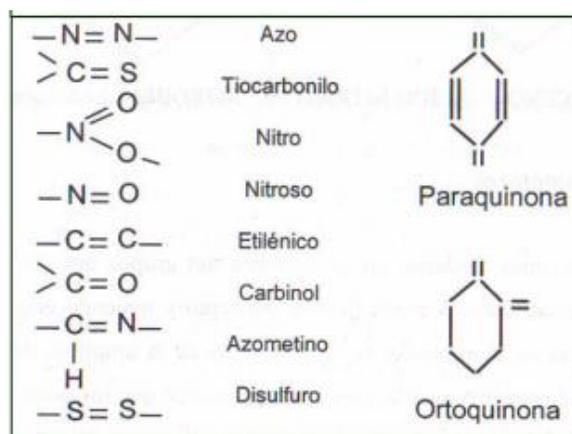
Los colorantes reactivos han sido muy populares para el teñido y el estampado de la fibra celulósica durante muchos años. Estos aparecieron por primera vez debido a la producción de colores brillantes en materiales celulósicos mediante métodos de tintura continua, elaborados por Imperial Chemical Industries (ICI) en 1956.

Los colorantes reactivos resultaron inmediatamente atractivos para los tintoreros debido a los colores brillantes y a las excelentes propiedades de solidez que poseían. Este interés aumentó cuando se desarrollaron métodos de teñido por agotamiento para estos colorantes. Se trata de colorantes aniónicos solubles en agua y existen diversas formas físicas de estos, como gránulos vertibles, en polvo y soluciones acuosas altamente concentradas, mientras que en el pasado los colorantes se comercializaban principalmente solo en forma de polvo. También se comercializan colorantes reactivos para fibras proteínicas y fibras poliamídicas (Chattopadhyay, 2011).

El colorante contiene un grupo reactivo, el cual forma un enlace covalente con el polímero de la fibra y actúa como parte integral de la fibra. Este enlace covalente se forma entre las moléculas del colorante y el grupo terminal $-OH$ de las fibras celulósicas. Los dos componentes más importantes de un colorante reactivo son el grupo cromóforo y el grupo reactivo (auxócromo). El grupo cromóforo brinda el color a la molécula, debido a que contiene uno o varios enlaces dobles (Peñafiel, 2011). En la Figura 4, podemos observar los principales grupos cromóforos.

Figura 4

Principales grupos cromóforos.



Nota. Tomado de Peñafiel (2011).

El grupo auxócro es responsable de la reactividad, la estabilidad de la unión de la fibra con el colorante, la eficiencia de reacción con la fibra y la afinidad. Las condiciones de teñido, especialmente el requerimiento de álcali y la temperatura, así como el uso de sal, también dependen de este grupo (Peñafiel, 2011). En la Figura 5, podemos observar los principales grupos auxóchromos.

Figura 5

Principales grupos auxocromos.

— OH	Hidróxilo
— NH ₂	Amino
— COOH	Carboxilo
— N $\begin{matrix} / R \\ \backslash H \end{matrix}$	Amino monosustituido
— N $\begin{matrix} / R \\ \backslash R \end{matrix}$	Amino disustituido
— CO — r	Ácido (r = radical de ácido graso)
— SO ₃ H	Sulfónico
— SR	Sulfuro

Nota. Tomado de Peñafiel (2011).

2.3 Método tintura reactiva por agotamiento

2.3.1 Tintura por agotamiento

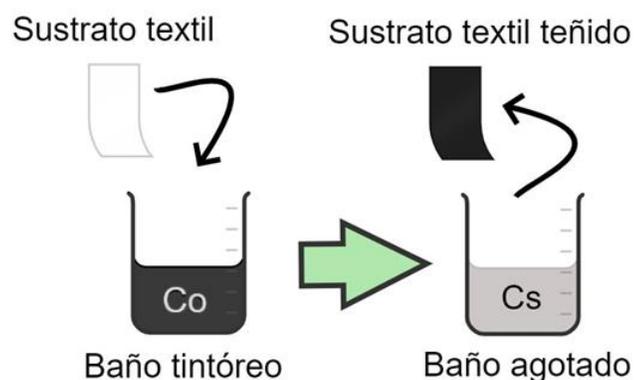
La tintura por agotamiento es un proceso en el cual el sustrato entra en contacto con el baño tintóreo, logrando que las fibras absorban el colorante. La velocidad de teñido disminuye gradualmente hasta que, si el teñido se prolonga lo suficiente, se alcanza un equilibrio en el que las fibras ya no absorben colorante. El verdadero equilibrio sólo existe cuando el colorante en solución está en equilibrio con el colorante que ha penetrado completamente en el centro de las fibras. En muy pocas oportunidades, los teñidos llegan a este punto, ya que puede llevar un tiempo relativamente largo alcanzarlo.

Cuando se tiene un solo colorante, el porcentaje de agotamiento se define como la cantidad de colorante absorbida por el sustrato textil dividida entre la cantidad inicial de colorante presente en el baño tintóreo, pero para un baño de volumen constante (Broadbent, 2001). En la Figura 6, podemos ver un ejemplo de la tintura por agotamiento.

$$\% \text{ de agotamiento} = \frac{C_o - C_s}{C_o} \times 100$$

Figura 6

Tintura por agotamiento.



Nota. C_o : Concentración inicial del baño de tintura. C_s : Concentración final del baño agotado.

El cloruro de sodio o el sulfato de sodio suelen estar presentes inicialmente, o se añaden gradualmente al baño de tintura durante esta fase, para favorecer el agotamiento. Adicionalmente, se puede aumentar gradualmente la temperatura del baño tintóreo para facilitar la penetración del colorante en las fibras y obtener una migración uniforme. La fijación del colorante se consigue añadiendo un álcali adecuado al baño tintóreo, total o gradualmente, para activar los aniones de celulosato. La fase de reacción del teñido se produce a lo largo de 30-60 minutos, con temperaturas de teñido típicas comprendidas entre 30 y 90 °C, dependiendo del tipo de grupo reactivo y de su reactividad (Khatri, 2010).

2.3.2 **Mecanismo de teñido**

Según el mecanismo de teñido del algodón con colorante reactivo se lleva a cabo en 3 etapas:

Absorción. El teñido se inicia en una solución neutra para que exista poca probabilidad de que el colorante reaccione con la celulosa. Durante esta fase del teñido, las fibras absorben una parte del colorante reactivo, cuya cantidad depende de su sustentividad. El cloruro o el sulfato de sodio suelen estar presentes inicialmente o se añaden gradualmente al baño de teñido durante esta fase para promover el agotamiento. La temperatura del baño de tintura también puede aumentarse gradualmente para facilitar la penetración del colorante en las fibras y ayudar a la migración (Broadbent, 2001).

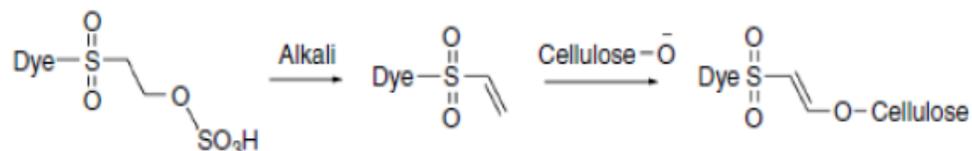
Reacción. También llamada etapa de fijación. Después de la etapa de absorción, el pH del baño de tintura aumenta mediante la adición completa o gradual del tipo y la cantidad de álcali adecuado. Esto provoca la disociación de algunos de los grupos oxhidrilos de la celulosa y los iones nucleofílicos de la celulosa empiezan a reaccionar con el colorante.

El proceso de fijación provoca entonces una absorción adicional del colorante, para restablecer el equilibrio de la tintura. La absorción del colorante de la solución y la reacción con la fibra progresan hasta que no se absorbe más colorante (Broadbent, 2001).

Colorantes Reactivos Vinilsulfonas (VS). En este tipo de colorantes, el grupo vinilsulfona, mediante adición nucleofílica, reacciona con la celulosa. Para que este mecanismo de reacción pueda llevarse a cabo, se requiere una condición alcalina (Wolela, 2019).

Figura 7

Reacción de adición nucleofílica.



Nota. Tomado de Nawang (2019).

Colorantes Reactivos MCT, MFT, DFCP, DCT. Son derivados halogenados heterocíclicos, el proceso de reacción con la celulosa implica la sustitución nucleofílica de un grupo saliente de cloro o flúor que se activa gracias a la presencia de un átomo de nitrógeno cercano al anillo heterocíclico (Wolela, 2019).

Figura 8

Reacción de sustitución nucleofílica



Nota. Tomado de Nawang (2019).

Lavado Post-teñido. El baño de teñido contiene colorante unido a la celulosa, el cual fue absorbido, pero no reaccionó, así como colorante hidrolizado. También habrá residuos de álcali y sal. Estos últimos son relativamente fáciles de eliminar mediante enjuagues sucesivos en agua fría y luego en caliente. Se debe lavar la mayor cantidad posible de colorante que no

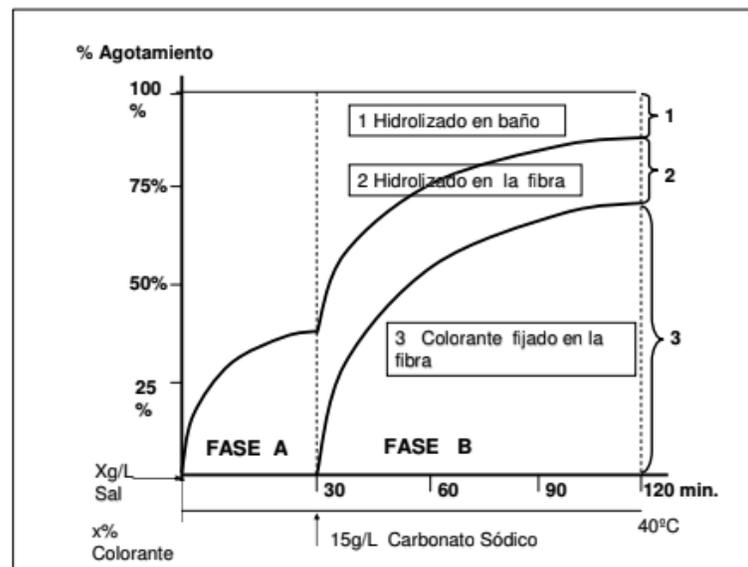
fue fijado, ya que, si no se hace de esta manera, la desorción de este colorante durante el lavado doméstico puede provocar manchas en otros materiales.

Parte del colorante no fijado se elimina durante el enjuague inicial que elimina la sal y el álcali. El jabonado posterior elimina los remanentes. Por último, se realiza un enjuague con agua tibia. El proceso de jabonado debe repetirse para los teñidos de colores oscuros (Broadbent, 2001).

En la Figura 9 se grafica el mecanismo de teñido por agotamiento de los colorantes reactivos con fibras celulósicas.

Figura 9

Mecanismo de teñido de fibras celulósicas con colorantes reactivos.



Nota. El significado es el siguiente: (1) Colorante hidrolizado en el baño, (2) Colorante hidrolizado en la fibra, y (3) Colorante fijado en la fibra. Tomado de Pey (2008).

2.3.3 Parámetros que influyen en el proceso de teñido

Existen ciertos parámetros que tienen gran influencia al momento de teñir algún sustrato textil, estos son los siguientes:

Temperatura. Una temperatura más alta en el teñido con colorantes reactivos da como resultado un mayor porcentaje de teñido, menor rendimiento de color, mejor penetración del colorante, rápida difusión, mejor igualación, mayor riesgo de hidrólisis del colorante y menor sustentividad. El aumento de la temperatura parece dar como resultado una apertura en la estructura de la celulosa, aumentando la accesibilidad de los hidroxilos de celulosa, mejorando la movilidad, así como la reactividad de las moléculas de colorante y superando la barrera de energía de activación del proceso de teñido, aumentando así el nivel de actividad molecular del sistema colorante-fibra, así como la interacción colorante-fibra (New Cloth Market, 2013).

pH. El pH del baño tintóreo será más bajo al final del teñido, lo que indica que se ha consumido parte del álcali durante el teñido. La fibra celulósica es responsable en parte de esta reducción. Al discutir sobre el efecto del pH, se debe tener en cuenta el pH interno de la fibra, así como el pH del baño. El pH interno es siempre menor que el pH del baño tintóreo.

A medida que aumenta el contenido de electrolitos del baño, el pH interno tiende a igualar el pH externo. Dado que la reacción de descomposición se produce completamente en el baño tintóreo, el pH externo más alto favorece la descomposición del colorante en lugar de la reacción con la fibra.

El pH influye principalmente en la concentración de celulosa en la fibra. También influye en la concentración de iones hidroxilo en el baño y en la fibra. La velocidad de teñido mejora cuando se eleva la temperatura de teñido una vez que se alcanza un pH de 11-12. Un mayor aumento del pH reducirá la velocidad de reacción, así como la eficacia de la fijación.

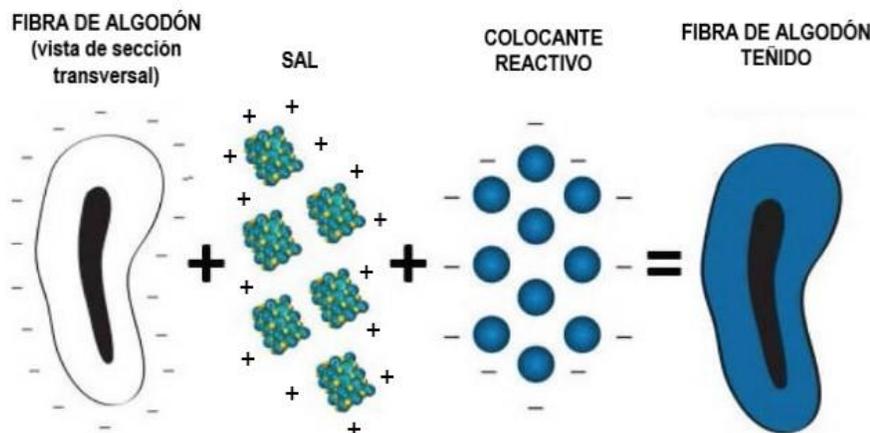
Se utilizan diferentes tipos de álcalis, como el hidróxido de sodio, carbonato de sodio, silicato de sodio o una combinación de estos álcalis, para alcanzar el pH de teñido requerido. La elección del álcali generalmente depende del colorante utilizado, el método de teñido y otros factores económicos y técnicos (New Cloth Market, 2013).

Electrolito. Se puede utilizar el cloruro de sodio (NaCl) o el sulfato de sodio (Na₂SO₄) como electrolitos, lo cual nos permite neutralizar el potencial electronegativo de la fibra y de esta manera, aumentar la afinidad de los colorantes reactivos por la celulosa. Cuando la sustantividad se incrementa, el equilibrio sustantivo se desplaza a favor de la fibra, acelerando su establecimiento. El posterior montaje del colorante tras la adición del electrolito se efectúa más rápido cuando la cantidad de electrolito aumenta, haciendo que el colorante se encuentre menos en la fase acuosa y, por tanto, se hidrolice menos (Villegas, 2013).

La adición de electrolitos da como resultado un aumento en la velocidad del agotamiento, un aumento de la agregación del colorante y una disminución en la difusión. Puede haber impurezas presentes en la sal que se va a usar, tales como sulfato de calcio, sulfato de magnesio, hierro y cobre, que pueden ser fuente de muchos problemas en el teñido (New Cloth Market, 2013).

Figura 10

Teñido tradicional del algodón.



Nota. Adaptado de Cottonworks (s.f.)

Relación de Baño. Es uno de los factores más influyentes en el agotamiento de los colorantes reactivos. Un aumento en la intensidad de color puede ser atribuido a una mayor

disponibilidad de colorante en las proximidades de las macromoléculas de celulosa, en una relación de baño más baja. Es posible mejorar la absorción de colorante en fibras celulósicas con la ayuda de tensoactivos adecuados. La mayor absorción de colorante se obtiene con tensoactivos aniónicos.

Los tensoactivos no iónicos pueden provocar una disminución en el agotamiento del colorante y del rendimiento del color, así como un cambio de tonalidad. Algunos tensoactivos no iónicos pueden ralentizar la hidrólisis del colorante (New Cloth Market, 2013).

2.4 Cationización del algodón

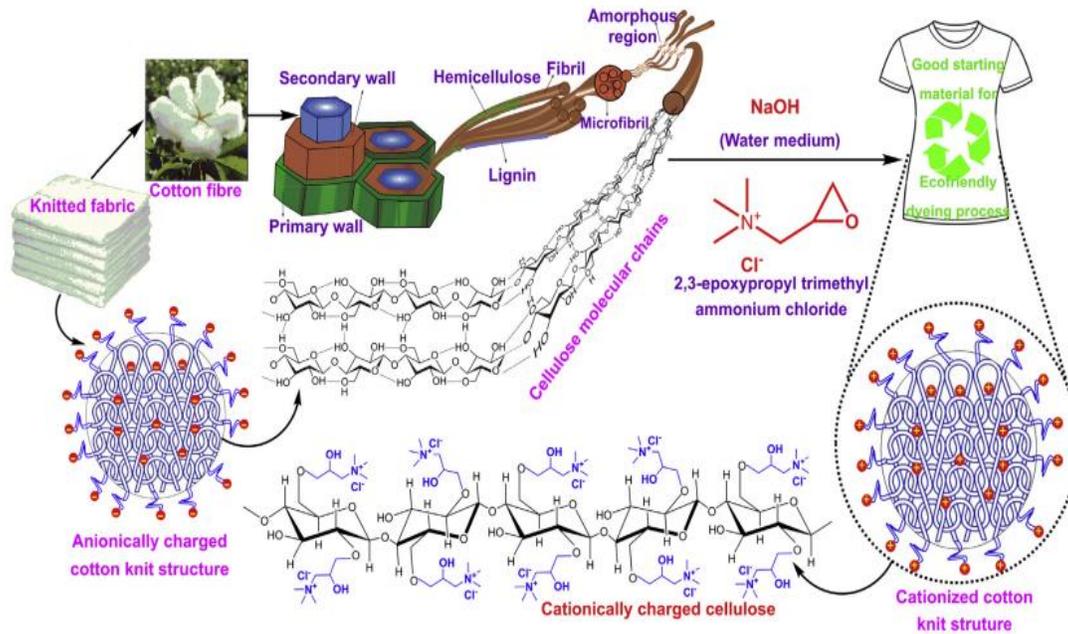
El algodón posee una carga neutra o moderadamente negativa, cuando está inmerso en agua. Para poder obtener algodón catiónico, la carga negativa del algodón cambia a positiva mediante una modificación química. Los colorantes, comúnmente utilizados para teñir algodón, también poseen carga negativa.

En un proceso convencional de teñido con colorantes reactivos, se utiliza sal y álcali en el baño tintóreo para invertir la carga del algodón convirtiéndose en positiva y de esta manera, los colorantes puedan reaccionar y unirse al sustrato textil. El algodón cationizado se trata químicamente para poder conseguir una carga permanentemente positiva, evitando el uso de sal en el teñido reactivo, y logrando un consumo de colorante más eficiente. Adicionalmente, el proceso de teñido se vuelve más corto y se consigue un ahorro en energía, agua y químicos. El algodón puede tratarse con el agente cationizante en forma de fibra, hilo o tela (Cottonworks, s.f.).

El proceso de cationización se realiza mediante la reacción de eterificación entre el grupo hidroxilo del tejido celulósico y el grupo epóxido del agente cationizante. Esto se puede observar mejor en la Figura 11.

Figura 11

Diagrama conceptual de la cationización de tejidos de punto de algodón.



Nota. Tomado de Arivithamani y Giri Dev (2017).

El algodón y el agente cationizante no reaccionan entre sí, sin la presencia de un catalizador. El catalizador que se utilizará será el hidróxido de sodio (NaOH). En presencia del hidróxido de sodio, los tejidos de algodón se convierten en sosa-celulosa y el agente cationizante como el cloruro de 3-cloro-2-hidroxipropiltrimetilamonio (CHPTAC) se convierte en cloruro de 2,3-epoxipropiltrimetilamonio (EPTAC) como producto del anillo intermedio de epóxido. Además, la reacción continúa en un medio alcalino durante la cual las especies iónicas del catalizador abren el anillo de epóxido del EPTAC y le permiten intercambiar con un protón del grupo alcohólico de la fibra celulósica para formar un éster hidroxilo de tejido celulósico llamado algodón cationizado.

Dado que el proceso de cationización se lleva a cabo en un medio acuoso alcalino, se produce una reacción de competencia entre un anillo intermedio de epóxido con el grupo

hidroxilo celulósico y con los grupos hidróxilos del agua, lo que da lugar a la formación del algodón cationizado, así como a la hidrólisis directa del EPTAC intermedio para formar un cloruro de 2,3-dihidroxipropiltrimetilamonio (diol) como subproducto (Arivithamani & Giri Dev, 2017).

2.5 Proceso de Tintura Sostenible

El proceso de tintura sostenible tiene como objetivo minimizar los impactos ambientales mediante el uso de métodos, materiales y prácticas que reducen el consumo de recursos naturales, la generación de residuos y la emisión de sustancias tóxicas.

Los colorantes naturales son una de las propuestas más desarrolladas, estos son derivados de recursos naturales, tales como las plantas, algas, animales, hongos, entre otros. Su uso innovador reduce la materia orgánica en los efluentes del proceso de fabricación, ofreciendo una alternativa ecológica a los colorantes convencionales (García Frutos, 2021).

Khatri (2010) presenta una serie de avances para mejorar la calidad de los efluentes que se generan por el proceso de teñido de algodón con colorantes reactivos, algunos de estos son: desarrollo en la elaboración de colorantes reactivos, desarrollo de maquinarias y procesos de teñido, modificación química de la fibra de algodón antes de la tintura y el uso de compuestos orgánicos en vez de compuestos inorgánicos.

Complementando lo anterior, Broadbent (2001) buscando minimizar los residuos y optimizar los métodos de proceso para que se viertan menos contaminantes en el efluente textil, brindó algunos ejemplos: reuso del exceso de la solución colorante que queda al final de un proceso de teñido, así como la mezcla de efluentes ácidos y alcalinos antes de la descarga para evitar una acidez o alcalinidad excesivas y cambios en el proceso tintóreo.

Buscando reducir el consumo de agua y el uso de los productos químicos en el teñido de algodón, se ha encontrado solución en la cationización de la celulosa, proceso que modifica

químicamente la molécula de celulosa, haciéndola fuertemente catiónica. Adicional a esto, se consigue eliminar el uso del álcali, carbonato de sodio (Na_2CO_3) y sal, insumos esenciales en el teñido con colorantes reactivos (Correia et al., 2020).

2.6 Evaluaciones de calidad en los teñidos

La solidez o estabilidad de color es una de las propiedades más importantes en un proceso de teñido. Un sustrato teñido se encuentra expuesto a una serie de agentes que pueden causar un desvanecimiento progresivo del color. La decoloración también puede ir acompañada de manchado en las prendas adyacentes. Como resultado, se podría obtener una prenda que pierde su valor estético debido a un cambio en su apariencia. (Clark, 2011).

Pocos teñidos muestran una solidez uniformemente alta a todos los agentes. Las propiedades de solidez de un colorante son una característica de la combinación particular del colorante y la fibra. Son una función compleja de muchas variables que incluyen las siguientes (Broadbent, 2001).

- La estructura molecular del colorante.
- La forma en que el colorante se une a la fibra.
- La cantidad de colorante presente en la fibra.
- La naturaleza química de la fibra.
- La presencia de otras sustancias químicas en el sustrato.
- Las condiciones reales existentes durante la exposición.

Las pruebas de solidez se describen detalladamente en los documentos de organizaciones como la SDC (Sociedad de Tintoreros y Coloristas, por sus siglas en inglés), AATCC (Asociación Americana de Químicos y Coloristas Textiles, por sus siglas en inglés) y ASTM (Sociedad Americana de Pruebas y Materiales, por sus siglas en inglés). La mayoría de los países europeos adoptan las normas de solidez de ISO (Organización Internacional de

Normalización, por sus siglas en inglés) como normas nacionales. En cambio, muchos otros países han establecido sus propias normas de pruebas de solidez al color, pero lamentablemente las condiciones de estas varían considerablemente.

2.6.1 Solidez al lavado

La solidez o resistencia al lavado es una de las pruebas más importantes para el consumidor, en la cual se evalúa la estabilidad del color de los sustratos textiles.

Las condiciones de lavado doméstico y comercial han sido instauradas en base a seis pruebas de lavado bajo la norma ISO, que están relacionadas a la simulación de las condiciones que probablemente se encuentren en el uso cotidiano. Los cambios de color deben evaluarse con la ayuda de las escalas de grises. Mientras que para evaluar la transferencia de color debe utilizarse el testigo multifibra DW (Ingamells, 1993).

El rendimiento del lavado de los textiles teñidos depende de numerosos factores, tales como: la química del colorante, el tamaño y la solubilidad del colorante, la naturaleza de la unión entre la fibra y el colorante, la interacción entre el colorante y el disolvente, la ubicación del colorante en la estructura de la fibra y la formulación del detergente utilizado en el proceso de lavado (Clark, 2011).

2.6.2 Solidez al frote

La solidez al frote determina la cantidad de color que se transfiere desde una superficie textil teñida a otra superficie por medio de fricción o frote. Este método se puede realizar sobre textiles fabricados en base a cualquier fibra, tanto en forma de tejido como hilo.

En las plantas de tintorería, el grado de eliminación del color superficial después de enjabonar el colorante suele evaluarse rápidamente frotando una muestra del tejido húmedo contra un trozo de algodón seco. Sin embargo, para una evaluación más cuantitativa y reproducible, se utiliza un crockmeter. Se trata de un equipo en el que se puede controlar el

área de contacto, el tiempo de abrasión y la fuerza aplicada sobre el tejido. La prueba puede realizarse en condiciones húmedas o secas (Broadbent, 2001).

2.6.3 Solidez a la luz

La solidez a la luz es la resistencia en el cambio de color de un sustrato textil cuando se encuentra a la exposición de luz del sol o una fuente de luz artificial.

Esta solidez es una propiedad muy importante en los sustratos teñidos y está determinada por los siguientes factores (Clark, 2011):

- La longitud de onda de la radiación incidente.
- Las estructuras compactas del colorante y la fibra.
- El sistema colorante-fibra.
- El grado de agregación y el tamaño de las partículas del colorante.
- La humedad efectiva (combinación de aire, temperatura de la superficie y humedad relativa que rige el contenido de humedad en la superficie de la fibra).
- La acción catalítica inducida por el colorante.
- Temperatura.
- Disponibilidad de oxígeno (foto-oxidación) o luz UV (foto-reducción).
- Cantidad de colorante en la fibra.
- La presencia de impurezas.
- El tiempo de exposición.
- La superficie expuesta bajo la luz.
- La fotoconductividad de los colorantes y las fibras.
- El sustituto presente en la estructura del colorante.
- La estabilidad del compuesto aromático.

El método estándar de solidez a la luz recomendado por la AATCC incluye nueve estándares de lana azul denominados "L2" a "L9". Estos nueve patrones consisten en hilos de lana azul teñidos con CI Mordant Blue 1. (grado L2, muy poca solidez a la luz) o CI Solubilised Vat Blue 8 (grado L9, excelente solidez). Los patrones azules intermedios de L3 a L8 son mezclas de hilos azules teñidos con estos dos colorantes, teniendo los grados superiores una mayor proporción de hilo teñido, de modo que cada grado es aproximadamente el doble de rápido que el anterior. El procedimiento de prueba consiste en determinar el grado de exposición a la luz necesario para producir el desvanecimiento hasta el grado 4 en la escala de grises para la pérdida de color de su teñido estándar de lana azul "L4".

Esta exposición se designa como 20 AFU ($\Delta E^*_{ab} = 1,7$). Para desteñir sucesivos patrones de lana azul hasta un nivel de Grado 4 en la Escala de Grises para la pérdida de color, se requiere duplicar la exposición en términos de AFU. Los resultados se correlacionan de excelente manera con los obtenidos en la norma ISO (Broadbent, 2001).

Capítulo III. Procedimiento experimental

3.1 Obtención de los tejidos de algodón cationizados

Inicialmente se realizó la caracterización del tejido de punto de 100% algodón preparado para teñir (PPT) que cuenta con previo blanqueo químico con peróxido de hidrógeno. Se determinó la capilaridad, hidrofiliidad, grado de blanco y pH de extracción.

Posteriormente, se realizó el método del cationizado a la tela de algodón a diferentes concentraciones para finalmente realizar el método del teñido con colorantes reactivos, tanto a la tela cationizada como a la tela sin cationizar.

A continuación, se detalla la parte experimental de la investigación realizada:

3.1.1 *Caracterización del sustrato textil*

El sustrato textil con el cual se realizó todas las pruebas que se detallarán a continuación, poseía las siguientes especificaciones técnicas:

- Sustrato textil: Tejido de punto blanqueado preparado para teñir (PPT).
- Composición: Algodón 100%.
- Ligamento: Jersey.

Título Ne: 24/1

Se evaluaron las propiedades fisicoquímicas de este tejido, cuyas características se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2

Caracterización del tejido jersey 100% algodón.

Características	Unidad	Tejido 100%
Hidrofilidad	s	0
Capilaridad columnas - 5 min	cm	9,0
Capilaridad cursas - 5 min	cm	8,5
Capilaridad columnas - 30 min	cm	17,0
Capilaridad cursas - 30 min	cm	16,5
Grado de Blanco	CIE	68,75
Grado de Blanco	°Be	68,10
pH extracción	-	7,0

Nota. El Grado de Blanco se midió en grados Berger el espectrofotómetro SF550 marca Datacolor, calibrado con especularidad incluida (SCI), apertura grande (LAV) y con UV incluido (OFF), usando el software Tools.

3.1.2 Método de cationizado del algodón

Se utilizó la máquina de teñido infrarrojo modelo HTN-24P, serie NT0019003, ubicada en el Laboratorio 24 de la Facultad de Ingeniería Química y Textil de la Universidad Nacional de Ingeniería. En la Figura 12 se muestra la fotografía de la máquina en mención.

Figura 12

Máquina de teñido infrarrojo.



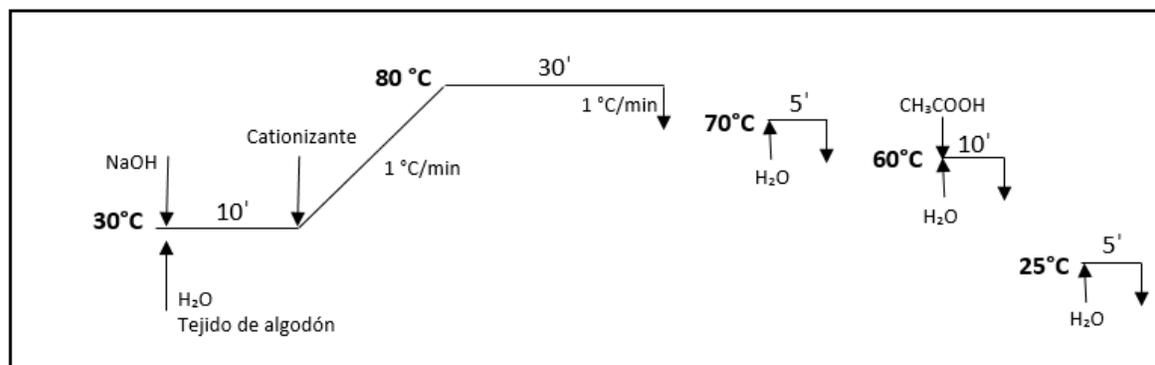
Nota. La capacidad de carga de la máquina es 24 tubos de acero inoxidable de 500 mL, con rango de temperatura de 20-140°C y microprocesador para su control.

La velocidad de rotación de los tubos con la que se trabajó fue de 40 RPM durante todo el proceso. En cada tubo de acero se procesó 3 muestras de tejido de 10 gramos cada una, a una relación de baño (RB) de 1:8. Se separó y rotuló 7 tubos, en los cuales se vertió agua destilada y 20 g/L de hidróxido de sodio (NaOH); una vez que se tuvo todos los tubos con NaOH y agua se introdujo el sustrato textil por triplicado, se cerraron para colocarlos en la máquina y calentarlos hasta los 30°C. Cuando se llegó a 30°C se adicionó la solución del Cloruro de (3-cloro-2-hidroxiopropil) - trimetilamonio, el cual llamaremos agente cationizante; en diferentes concentraciones a cada tubo variando de 10 en 10 g/L, empezando desde 20 g/L hasta llegar a 80 g/L y se elevó la temperatura a 80°C usando una gradiente de 1 °C/min.

Se mantuvieron los 7 tubos a 80°C durante 30 minutos y luego se disminuyó la temperatura a 70°C a una gradiente de 1°C/min; una vez que se llegó a 70°C, se drenó el baño. Se realizó un enjuague en caliente a 70°C durante 5 minutos y luego se drenó el baño. Se neutralizó con una solución de ácido acético (CH_3COOH) 1,5 g/L a 60°C por 10 minutos. Al término de este tiempo, se realizó un enjuague a temperatura ambiente y finalmente, se secaron las muestras a temperatura ambiente. En la Figura 13, se observa la curva.

Figura 13

Curva del método de cationizado de los tejidos de algodón.



3.2 Método del teñido con colorantes reactivos

Para este método se utilizó la máquina de teñido infrarrojo, modelo HTN-24P, serie NT0019003, ubicada en el Laboratorio 24 de la Facultad de Ingeniería Química y Textil de la Universidad Nacional de Ingeniería. La velocidad de rotación de los tubos con la que se trabajó fue de 40 RPM durante todo el proceso.

En este caso, se tiñeron las muestras cationizadas y sin cationizar, con colorante reactivo CORAFIX BLACK SD al 6%. En cada tubo de acero se procesó 2 muestras de tejido de 10 gramos cada una, a una relación de baño (RB) de 1:8. Se separó y rotuló 8 tubos de acero, en los primeros 7 se colocaron las muestras duplicadas de tela cationizada y en el tubo restante se colocó una muestra duplicada de tela sin cationizar. En cada tubo se colocó 1 g/L de secuestrante, colorante y agua destilada, posteriormente se adicionó el sustrato duplicado.

En el tubo que contenía las muestras sin cationizar, se le adicionó 80 g/L de cloruro de sodio (NaCl). Se cerraron los tubos y se colocaron a la máquina a una gradiente de 3 °C/min hasta que se llegó a los 60°C y se mantuvo por 30 minutos. Al término de este tiempo, se adicionó 5 g/L de carbonato de sodio (Na₂CO₃) y se procesó por 20 minutos. Una vez que se cumplió este tiempo, se adicionó 1 g/L de hidróxido de sodio (NaOH) y se mantuvo por 60 minutos.

En las Tablas 3 y 4 se observan las recetas de teñido que se utilizaron tanto para las muestras cationizadas como para las muestras sin cationizar. Notar que en la receta de teñido de las muestras sin cationizar hay presencia de cloruro de sodio, sal, en cambio en la receta de teñido de las muestras cationizadas no lleva.

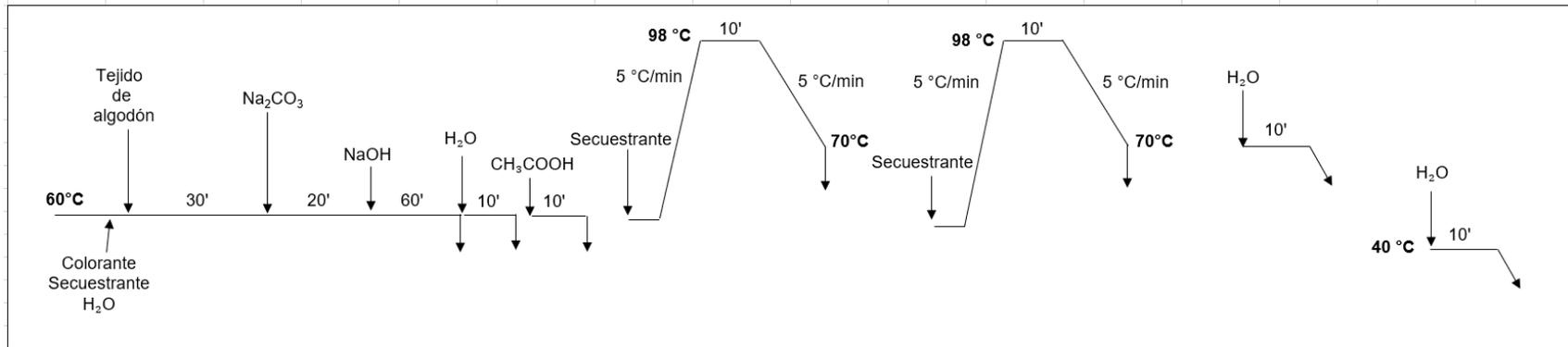
Cuando acabó el proceso de fijación, se realizó un enjuague en caliente a 60°C por 10 minutos y luego se drenó el baño, a continuación, se procedió con el neutralizado con una solución de CH₃COOH 1 g/L por 10 minutos, manteniendo la temperatura. Seguidamente, se realizó el jabonado con 1 g/L de secuestrante, se elevó la temperatura hasta 98°C a una

gradiente de 5 °C/min, cuando se estuvo a esta temperatura se mantuvo por 10 minutos y luego, se disminuyó hasta 70°C con una gradiente de 5 °C/min y al llegar se mantuvo por 1 minuto. Se drenó y se volvió a realizar otro jabonado. Al término del segundo jabonado, se drenó el baño y se procedió con un enjuague en caliente a 70°C por 10 minutos. Luego, se volvió a drenar y se realizó un enjuague en frío a 40°C por 10 minutos.

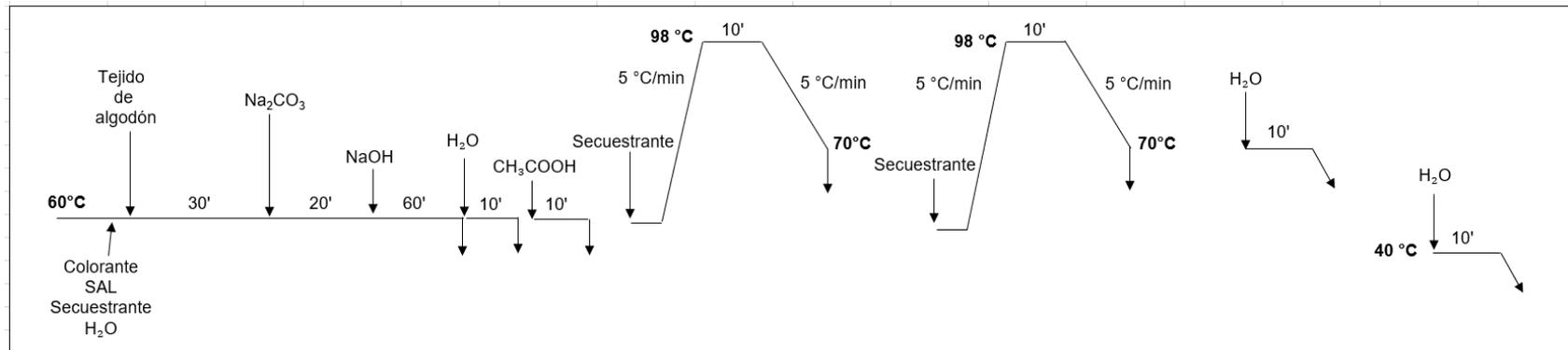
Finalmente, se descargaron los tubos y se secaron todas las muestras en la estufa a 60°C por un tiempo aproximado de 15 minutos. En la Figura 14, se observan las curvas de teñido con colorante reactivo que se utilizaron para las muestras cationizadas y sin cationizar.

Figura 14

Curva del método de teñido con colorantes reactivos de los tejidos de algodón.



(a)



(b)

Nota. La curva (a) se utiliza para el teñido con colorantes reactivos de las muestras cationizadas, mientras que la curva (b) se utiliza para el teñido con colorantes reactivos de las muestras sin cationizar.

Tabla 3*Receta de teñido reactivo para el color negro en algodón sin cationizar.*

Productos	Dilución		Receta			
			Concentración		Cantidad	
Negro Corafix SD	50	g/L	6,00	%	24,00	mL
Secuestrante	100	g/L	1,00	g/L	1,60	mL
Cloruro de sodio	sólido		80,00	g/L	12,80	g
Carbonato de sodio	100	g/L	5,00	g/L	8,00	mL
NaOH	200	g/L	1,00	g/L	0,80	mL
Agua inicial				mL	125,60	mL
Volumen total (RB)				mL	160,00	mL

Tabla 4*Receta de teñido reactivo para el color negro en algodón cationizado.*

Productos	Dilución		Receta			
			Concentración		Cantidad	
Negro Corafix SD	50	g/L	6,00	%	24,00	mL
Secuestrante	100	g/L	1,00	g/L	1,60	mL
Cloruro de sodio	sólido		0.00	g/L	0.00	g
Carbonato de sodio	100	g/L	5,00	g/L	8,00	mL
NaOH	200	g/L	1,00	g/L	0,80	mL
Agua inicial				mL	125,60	mL
Volumen total (RB)				mL	160,00	mL

3.3 Método del teñido con colorantes reactivos utilizando curva optimizada

Para este método se utilizó la máquina de teñido infrarrojo, modelo HTN-24P, serie NT0019003, ubicada en el Laboratorio 24 de la Facultad de Ingeniería Química y Textil de la Universidad Nacional de Ingeniería. La velocidad de rotación de los tubos con la que se trabajó fue de 40 RPM durante todo el proceso.

En este caso, se tiñeron las muestras cationizadas y sin cationizar. con colorante reactivo CORAFIX RED ME4B 150% a diferentes concentraciones (2%, 4% y 6%). En cada tubo de acero se procesó 2 muestras de tejido de 10 gramos cada una, a una relación de baño (RB) de 1:8. Se separó y rotuló 12 tubos de acero, en cada tubo se colocó 1 g/L de secuestrante, colorante y agua destilada, posteriormente se adicionaron los sustratos duplicados. En los 6 primeros tubos se colocaron muestras cationizadas y en los otros 6; muestras sin cationizar.

En primera instancia, se tomaron 3 tubos con muestras cationizadas y 3 tubos con muestras sin cationizar y se separaron en 3 parejas de tubo con muestra cationizada y tubo con muestra sin cationizar. Se concibieron estas parejas para teñir a diferentes concentraciones de colorante (2%, 4% y 6%). A los tubos que contenían las muestras sin cationizar, se le adicionó cloruro de sodio (NaCl) a diferentes concentraciones, en este caso la concentración varió según la concentración de colorante que se utilizó. Estos 6 tubos siguieron el proceso de teñido para cada tipo de muestras que se indica en el numeral 3.2 Método del Teñido con Colorantes Reactivos.

Por otro lado, los otros 6 tubos, 3 con muestras cationizadas y 3 con muestras sin cationizar se tiñeron utilizando la curva optimizada que aparece en la Figura 15. Como vimos anteriormente, a las muestras sin cationizar se les adicionó cloruro de sodio (NaCl), mientras que a las muestras sin cationizar; no.

Se cerraron los tubos de acero y se colocaron a la máquina a una gradiente de 3 °C/min hasta que se llegó a los 60°C y se mantuvo por 30 minutos. Al término de este tiempo, se adicionó 5 g/L de carbonato de sodio (Na_2CO_3) y se procesó por 20 minutos. Una vez que se cumplió este tiempo, se adicionó hidróxido de sodio (NaOH) y se mantuvo por 60 minutos.

Cuando concluyó el proceso de fijación, se realizó un enjuague en caliente a 60°C por 10 minutos y luego se drenó el baño, a continuación, se procedió con el neutralizado con una solución de 1 g/L de CH_3COOH por 10 minutos, manteniendo la temperatura. Seguidamente, se realizó el jabonado con 1 g/L de secuestrante, se elevó la temperatura hasta 75°C a una gradiente de 5 °C/min, cuando se estuvo a esta temperatura se mantuvo por 10 minutos y luego, se disminuyó hasta 60°C con una gradiente de 3 °C/min y al llegar se mantuvo por 1 minuto. Al término del jabonado, se drenó el baño y se procedió con un enjuague en frío a 40°C por 5 minutos.

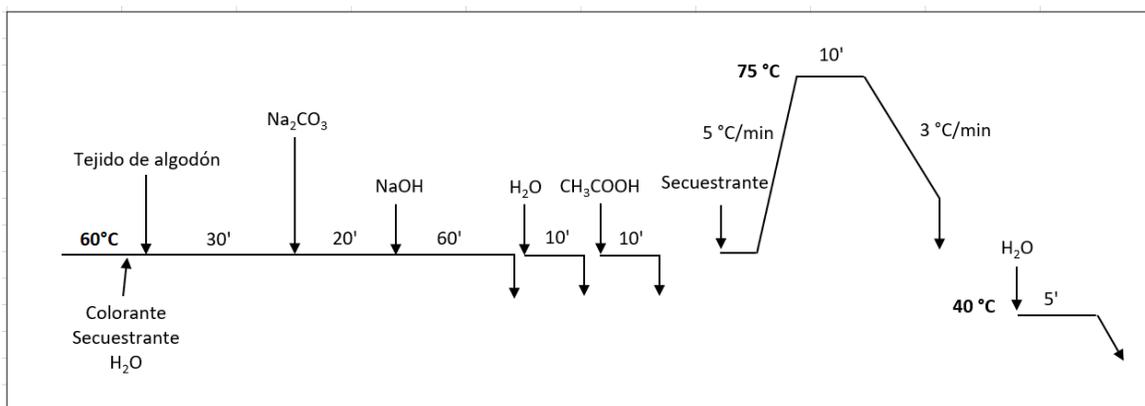
Finalmente, se descargaron los tubos y se secaron todas las muestras en la estufa a 60°C por un tiempo aproximado de 15 minutos.

En las Tablas 5, 7 y 9 se observan las recetas utilizadas sobre las muestras sin cationizar para teñirlas a rojo al 2%, 4% y 6%, respectivamente, mientras que en las Tablas 6, 8 y 10 se observan las recetas utilizadas sobre las muestras cationizadas para teñirlas a rojo al 2%, 4% y 6%, respectivamente.

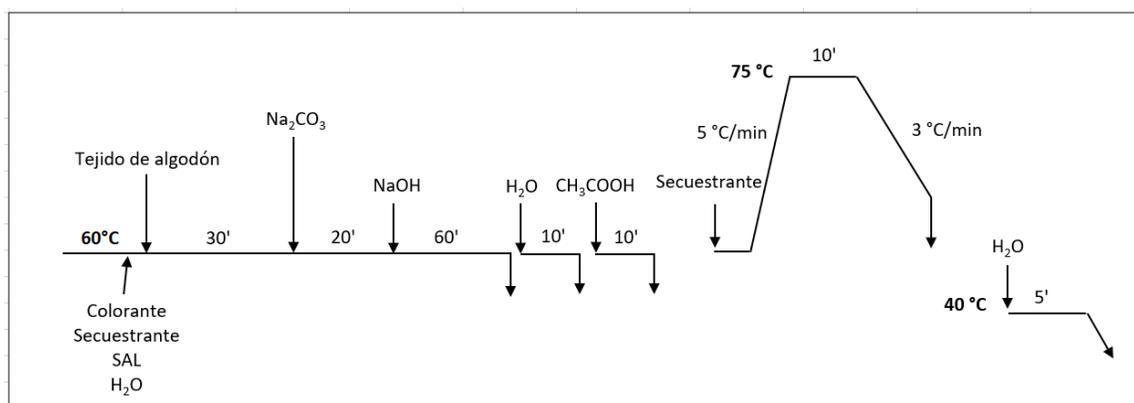
Figura 15

Curva optimizada del método de teñido de los tejidos de algodón con colorantes reactivos.

(a)



(b)



Nota. La curva (a) se utiliza para el teñido con colorantes reactivos de las muestras cationizadas, mientras que la curva (b) se utiliza para el teñido con colorantes reactivos de las muestras sin cationizar.

Tabla 5*Receta de teñido reactivo para el color rojo al 2% en algodón sin cationizar.*

Productos	Dilución		Receta			
			Concentración		Cantidad	
CORAFIX RED ME4B 150%	20	g/L	2,00	%	20,00	mL
Secuestrante	100	g/L	1,00	g/L	1,60	mL
Cloruro de sodio	sólido		50,00	g/L	8,00	g
Carbonato de sodio	100	g/L	5,00	g/L	8,00	mL
NaOH	200	g/L	1,00	g/L	0,80	mL
Agua inicial				mL	129,60	mL
Volumen total (RB)				mL	160,00	mL

Tabla 6*Receta de teñido reactivo para el color rojo al 2% en algodón cationizado.*

Productos	Dilución		Receta			
			Concentración		Cantidad	
CORAFIX RED ME4B 150%	20	g/L	2,00	%	20,00	mL
Secuestrante	100	g/L	1,00	g/L	1,60	mL
Cloruro de sodio	sólido		0,00	g/L	0,00	g
Carbonato de sodio	100	g/L	5,00	g/L	8,00	mL
NaOH	200	g/L	1,00	g/L	0,80	mL
Agua inicial				mL	129,60	mL
Volumen total (RB)				mL	160,00	mL

Tabla 7*Receta de teñido reactivo para el color rojo al 4% en algodón sin cationizar.*

Productos	Dilución		Receta			
			Concentración		Cantidad	
CORAFIX RED ME4B 150%	20	g/L	4,00	%	40,00	mL
Secuestrante	100	g/L	1,00	g/L	1,60	mL
Cloruro de sodio	sólido		70,00	g/L	11,20	g
Carbonato de sodio	100	g/L	5,00	g/L	8,00	mL
NaOH	200	g/L	1,00	g/L	0,80	mL
Agua inicial				mL	109,60	mL
Volumen total (RB)				mL	160,00	mL

Tabla 8*Receta de teñido reactivo para el color rojo al 4% en algodón cationizado.*

Productos	Dilución		Receta			
			Concentración		Cantidad	
CORAFIX RED ME4B 150%	20	g/L	4,00	%	40,00	mL
Secuestrante	100	g/L	1,00	g/L	1,60	mL
Cloruro de sodio	sólido		0,00	g/L	0,00	g
Carbonato de sodio	100	g/L	5,00	g/L	8,00	mL
NaOH	200	g/L	1,00	g/L	0,80	mL
Agua inicial				mL	109,60	mL
Volumen total (RB)				mL	160,00	mL

Tabla 9

Receta de teñido reactivo para el color rojo al 6% en algodón sin cationizar.

Productos	Dilución		Receta			
			Concentración		Cantidad	
CORAFIX RED ME4B 150%	20	g/L	6,00	%	60,00	mL
Secuestrante	100	g/L	1,00	g/L	1,60	mL
Cloruro de sodio	sólido		80,00	g/L	12,80	g
Carbonato de sodio	100	g/L	5,00	g/L	8,00	mL
NaOH	200	g/L	2,00	g/L	1,60	mL
Agua inicial				mL	88,80	mL
Volumen total (RB)				mL	160,00	mL

Tabla 10

Receta de teñido reactivo para el color rojo al 6% en algodón cationizado.

Productos	Dilución		Receta			
			Concentración		Cantidad	
CORAFIX RED ME4B 150%	20	g/L	6,00	%	60,00	mL
Secuestrante	100	g/L	1,00	g/L	1,60	mL
Cloruro de sodio	sólido		0,00	g/L	0,00	g
Carbonato de sodio	100	g/L	5,00	g/L	8,00	mL
NaOH	200	g/L	2,00	g/L	1,60	mL
Agua inicial				mL	88,80	mL
Volumen total (RB)				mL	160,00	mL

3.4 Evaluación del color

Con el apoyo de la colorimetría instrumental, el hombre ha buscado la manera de interpretar y representar numéricamente la percepción visual que el color le produce. Existen 3 elementos muy importantes que intervienen en la formación de la sensación de color en el cerebro, y estos son: la iluminación, ya sean fuentes naturales o artificiales; el

objeto, representado por el sustrato textil; y el receptor u observador (Valldeperas-Morell, 1994).

El ojo humano puede detectar ondas electromagnéticas con longitudes de onda en un rango entre los 400 y 700 nm aproximadamente, este rango es lo que se denomina luz visible. El análisis espectral de la luz de día o luz blanca, utilizando un prisma, por ejemplo; la separa en varias luces de colores, como se ve en el arco iris. Los colores espectrales rojo, naranja, amarillo, verde, azul y violeta del arco iris corresponden a luces con longitudes de onda de alrededor de 650, 600, 575, 525, 460 y 420 nm, respectivamente (Broadbent, 2001).

3.4.1 Calibración del espectrofotómetro

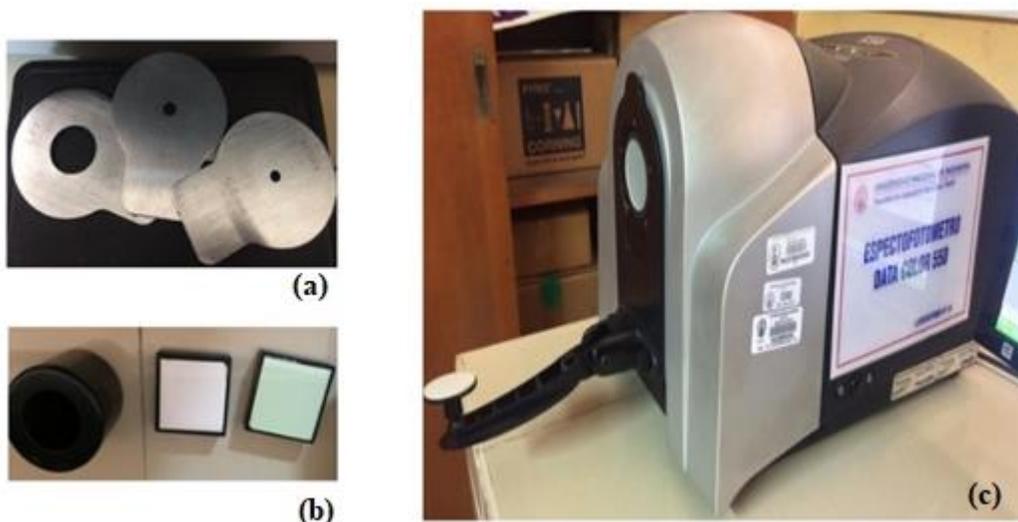
Antes de procesar cualquier muestra textil se debe calibrar el espectrofotómetro, esta calibración debe ser realizada cada 8 horas utilizando las placas negra y blanca. Luego del uso de estas placas, se utiliza la placa verde de diagnóstico del equipo para garantizar la repetitividad de las lecturas. En este caso, se utilizó el espectrofotómetro Datacolor SF550 y el software Datacolor Tools versión 1.1, ubicado en el Laboratorio 24 de la Facultad de Ingeniería Química y Textil de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Se encendió el espectrofotómetro y se ingresó al software Datacolor Tools, dentro del programa se presionó el botón CALIBRAR y a continuación se abrió la ventana en la cual se definió las siguientes condiciones de calibración: Especularidad incluida (SCI), Placa de apertura de visión grande (LAV) de 30 mm y filtro OFF (sin filtro para incluir la radiación UV), al término se seleccionó la opción Calibrar.

Paso seguido, el programa solicitó colocar las placas estándares en el orden indicado a continuación: trampa negra, placa blanca para la calibración. Luego para el test diagnóstico de la lámpara se puso la placa verde. El resultado del test de diagnóstico indicó PASA y con un dE CMC de 0,10, finalmente, se dio aceptar.

Figura 16

Espectrofotómetro y accesorios.



Nota. En c) se observa el Espectrofotómetro Marca Datacolor – Modelo SF550 – Número de serie 3074. En a) tenemos las placas de visión de acero y en b) se tiene la trampa negra y las placas blanca y verde.

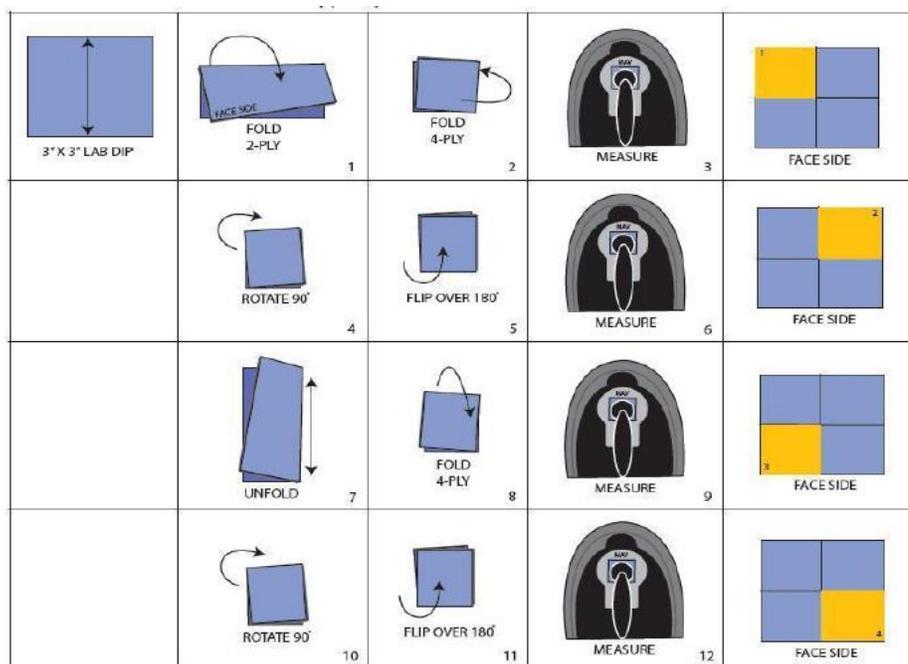
3.4.2 *Medición de color de muestras*

A continuación de la calibración, se procedió a realizar las mediciones de las muestras teñidas previamente cationizadas, así como también de las muestras teñidas sin cationizado previo. Inicialmente, en la pantalla principal del Datacolor Tools, se seleccionó la opción Nuevo Estándar y se escribió el nombre elegido para la muestra textil.

Se dobló la muestra por la mitad en dos ocasiones, es decir en 4 capas, esto se observa en la Figura 17. Luego, se colocó en la apertura del espectrofotómetro y se presionó la opción Est: Prom Inst e inmediatamente, se abrió la Ventana Principal de Medición, en esta seleccioné el botón Medida para realizar la primera medición. A continuación, se realizaron 3 medidas más en diferentes lugares de la muestra doblada. Una vez que se tuvo las 4 mediciones, se presionó aceptar y apareció la curva espectral de reflectancia del color de la muestra textil y sus valores de reflectancia de 400 nm a 700 nm.

Figura 17

Presentación de muestras para la lectura en el espectrofotómetro.



Nota. Tomado de J.C Penney Company (2010) *Supplier Conformance Guide Requirements Document Version 1.1s.*

3.5 Evaluación de solidez de las muestras

Se realizaron pruebas de solidez al lavado, solidez al frote y solidez a la luz a las muestras teñidas previamente cationizadas, así como también a las muestras teñidas sin cationizar.

3.5.1 Evaluación de solidez al lavado

Esta evaluación se llevó a cabo bajo la norma ISO 105-C06: 2010 Test: B1M, la cual es una prueba de lavado acelerado que sirve para determinar la resistencia de los sustratos teñidos a 5 ciclos de lavado doméstico.

En primera instancia, se prepararon las probetas a analizar, para esto se cortaron muestras y sus respectivos testigos multifibra DW de 10 x 4 cm que contiene las siguientes fibras: Diacetato, algodón blanqueado, poliamida, poliéster, acrílico y lana. Estas se

cosieron por el lado más corto, colocando las caras de las probetas en contacto con sus respectivos testigos.

A continuación, se procedió a preparar la solución de 4 gramos de detergente sin blanqueador óptico en 1 litro de agua destilada, de esta solución se separó 150 mL en un frasco del equipo en el cual se le adicionó 50 billas de acero. Una vez que se tuvo el frasco con la solución y las billas, se procedió a precalentar el launderómetro a 50°C por 10 minutos. Al término del precalentamiento, se adicionó la probeta cosida con su multifibra al frasco y se reinició el launderómetro por 45 minutos a 40 RPM.

Una vez cumplido los 45 minutos, se retiró la probeta del frasco y se realizaron dos enjuagues en agua destilada por unos 20 segundos y se exprimó para eliminar el exceso de agua.

Finalmente, las probetas se secaron a una temperatura no mayor a los 60°C, revisando que las muestras no estuviesen en contacto con las multifibra. Las evaluaciones de cambio y transferencia de color se realizaron en la cabina de luces utilizando la luz estándar de día D65 y las escalas de grises respectivas donde:

Clasificación de Solidez – Cambio de Color

- 5 – Insignificante o sin cambio de color.
- 4 – Ligero cambio de color.
- 3 – Cambio de color notable.
- 2 – Cambio considerable de color.
- 1 – Cambio severo de color.

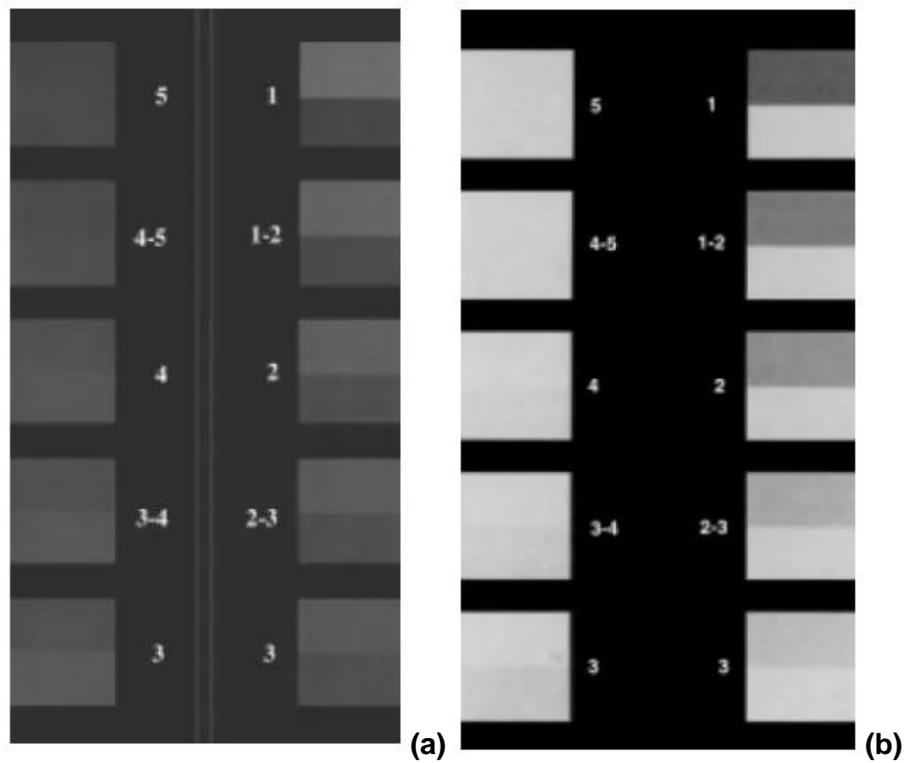
Clasificación de Solidez – Transferencia de Color

- 5 – Sin manchado o manchado insignificante.
- 4 – Ligeramente manchado.

- 3 – Manchas notables.
- 2 – Considerablemente manchado.
- 1 – Muy manchada.

Figura 18

Tipos de escalas de grises.



Nota. a) Escala de grises para el cambio de color, b) Escala de grises para la transferencia de color.

3.5.2 Evaluación de solidez al frote

Esta evaluación se llevó a cabo bajo la norma ISO 105/X12: 2016, la cual determina la cantidad de color que se transfiere desde una superficie textil teñida a otra superficie por medio de fricción o frote. Esta prueba se realiza tanto en seco como en húmedo y se usa un testigo blanco cuyas características son:

- 100% algodón peinado.
- Dimensiones: 5 cm x 5 cm
- Blanqueado sin óptico.
- Desencolado
- Título 40/1.
- pH = 7 +/- 0,5
- Grado de blanco W: 80 +/- 2.
- N.º de hilos 32 +/- 3 urdimbre/cm, 33 +/- 3 hilos de trama/cm.
- Densidad: 111.3 +/- 5 g/m².

En primer lugar, por cada muestra cationizada y sin cationizar, se prepararon dos muestras de 5 cm de ancho x 14 cm de largo con dirección paralela a las agujas. Luego, se fija el papel abrasivo (lija) en la base del crockmeter.

A continuación, se realizó la evaluación de solidez al frote seco, para esto se colocó y sujetó la muestra con la cara hacia arriba encima del papel abrasivo. Se colocó un testigo blanco en el tarugo del brazo del crockmeter y se le aseguró con el gancho para que se encuentre paralelo a la muestra a analizar.

Se bajó el tarugo cubierto del testigo sobre la muestra y se encendió el crockmeter, el cual frotó a una velocidad de un ciclo por segundo, con un movimiento de vaivén, 10 veces en un sentido y otras 10 hacia el otro sentido. Finalmente, se retiró el testigo blanco.

En el caso del ensayo de solidez al frote en húmedo, se estableció una técnica para preparar el testigo, la que consistía en pesar un testigo blanco acondicionado, luego este se remojaba completamente con agua destilada para terminar pesando la muestra húmeda y asegurar una impregnación del 100%. Una vez que se tiene el testigo húmedo, se coloca

este en el tarugo del brazo del crockmeter y se repite el mismo proceso que para el frote seco. En este caso en particular, el testigo se dejó secar a temperatura ambiente.

Las evaluaciones de transferencia de color o manchado de los testigos, para ambos casos (en seco y húmedo) se realizaron en la cabina de luces utilizando la luz D65 y con la escala de grises transferencia de color. Durante esta evaluación, se colocaron tres testigos blancos detrás de cada testigo evaluado.

3.5.3 Evaluación de solidez a la luz

Esta evaluación se realizó en un laboratorio externo, en el cual se llevó a cabo utilizando la norma AATCC TM 16.3 - 2020 Opción 3. Esta opción incluyó el uso de lámpara de arco Xenón Luz continua y una opción del Panel Negro, esta prueba se realizó en el equipo Weather Ometer marca Atlas modelo Ci 3000+.

Para esta norma, las condiciones de evaluación varían según la opción elegida. En el presente trabajo, las condiciones de operación fueron las siguientes:

Tabla 11

Condiciones de operación para la evaluación de solidez a la luz

Componente	Especificación
Fuente de luz	Xenón
Temperatura del panel negro	63 ± 1°C
Temperatura de aire de la cámara	43 ± 2°C
Humedad relativa	30 ± 5°C
Irradiancia W/m ² /nm (a 420 nm)	1.10 ± 0.03
Irradiancia W/m ² (300 - 400 nm)	48 ± 1
Ciclo de radiación	Continuo

Nota. Tomado y traducido de la norma AATCC TM 16.3 – 2020.

Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

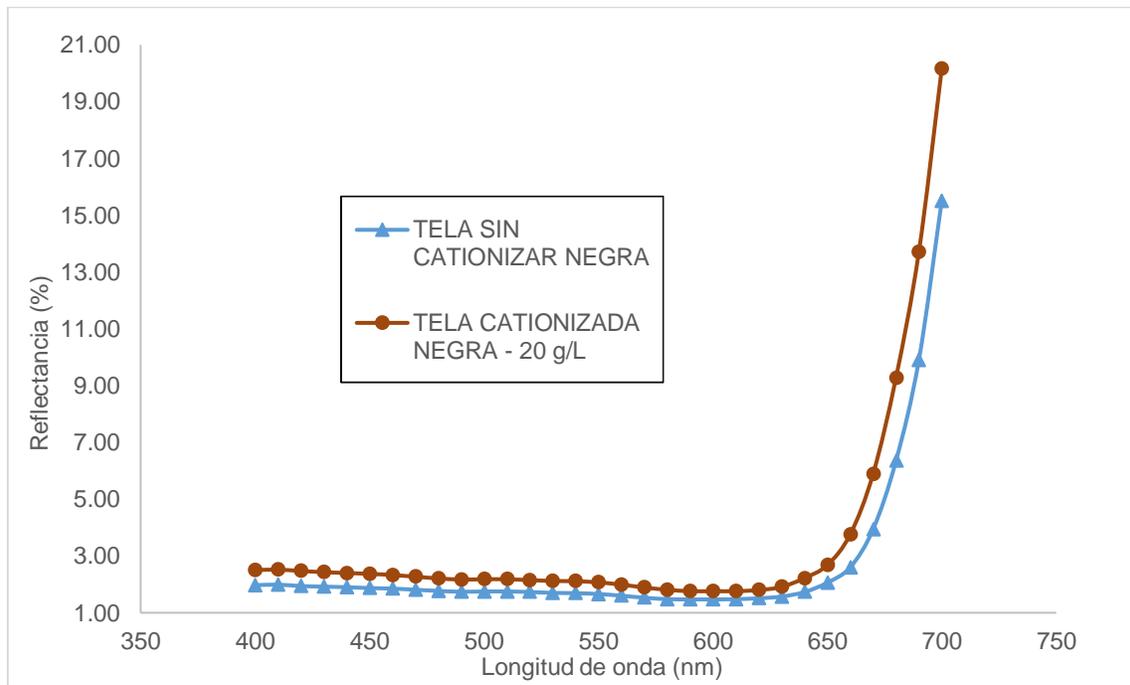
En este capítulo se analizan y discuten los resultados de los teñidos de las telas cationizadas y sin cationizar.

4.1 Evaluación espectrofotométrica de las muestras

En primera instancia, se analizaron todas las telas color negro teñidas con 6% de Corafix Black SD, tanto las que fueron cationizadas previamente, como la que no se cationizó. En las Figuras 19, 20, 21, 22, 23, 24 y 25, se muestran las comparativas de las curvas espectrales de reflectancia de las telas teñidas a negro cationizadas a diferentes concentraciones con respecto a la curva espectral de la tela teñida a negro sin cationizar.

Figura 19

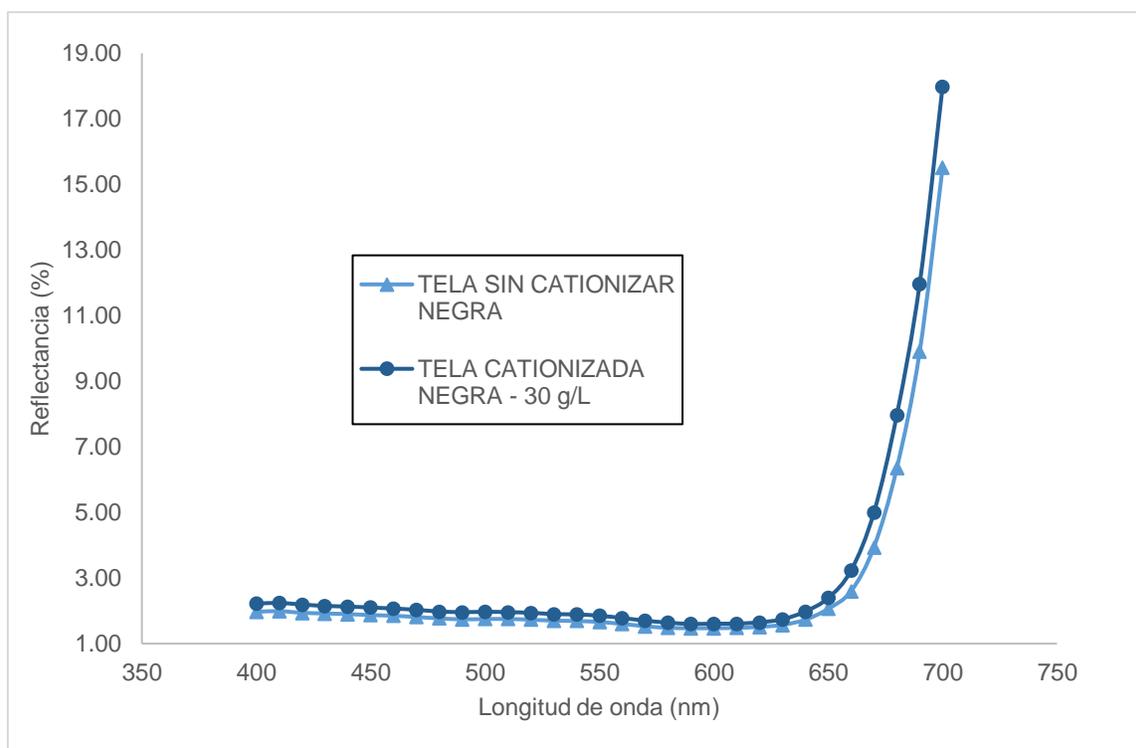
Curva de reflectancia de las telas negras cationizadas con 20 g/L vs. Tela sin cationizar.



Nota. Elaborada con datos del software Datacolor Tools versión 1.1, luego de la medición de las telas con el espectrofotómetro Datacolor SF550 calibrado con especularidad incluida (SCI), apertura grande (LAV) y filtro OFF (UV incluida).

Figura 20

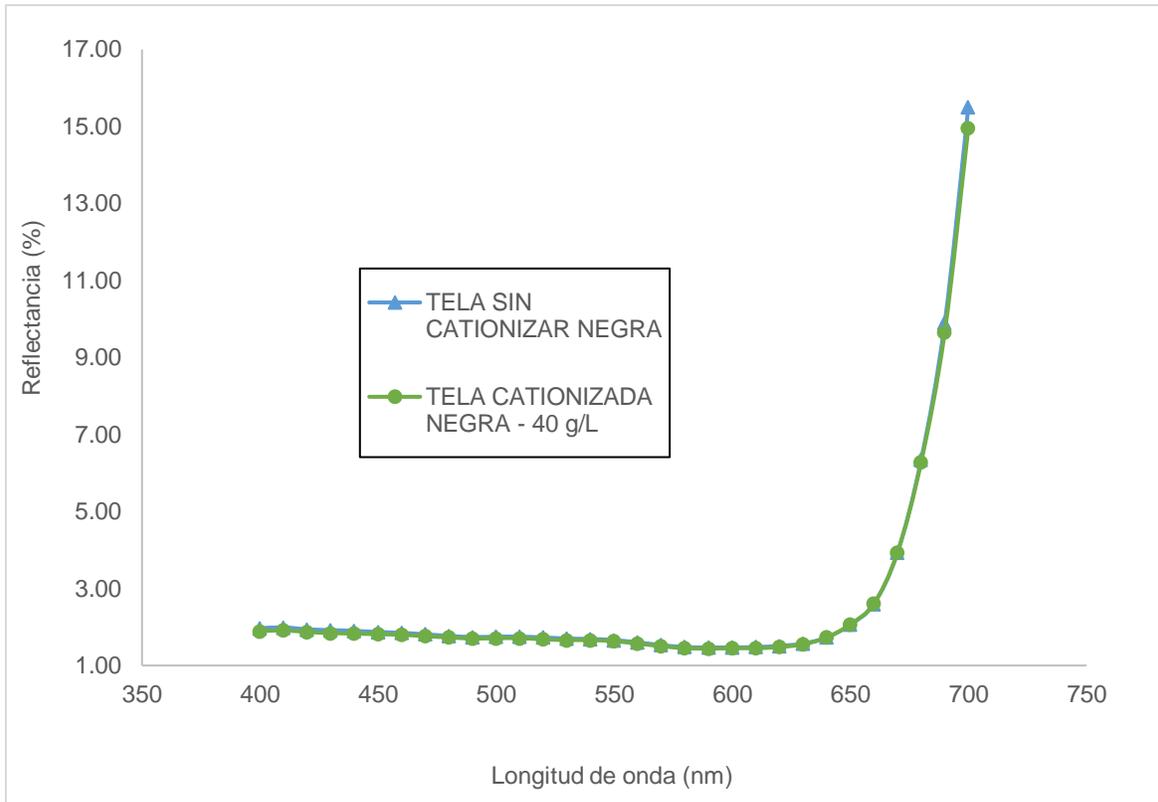
Curva de reflectancia de las telas negras cationizadas con 30 g/L vs. Tela sin cationizar.



Nota. Elaborada con datos del software Datacolor Tools versión 1.1, luego de la medición de las telas con el espectrofotómetro Datacolor SF550 calibrado con especularidad incluida (SCI), apertura grande (LAV) y filtro OFF (UV incluida).

Figura 21

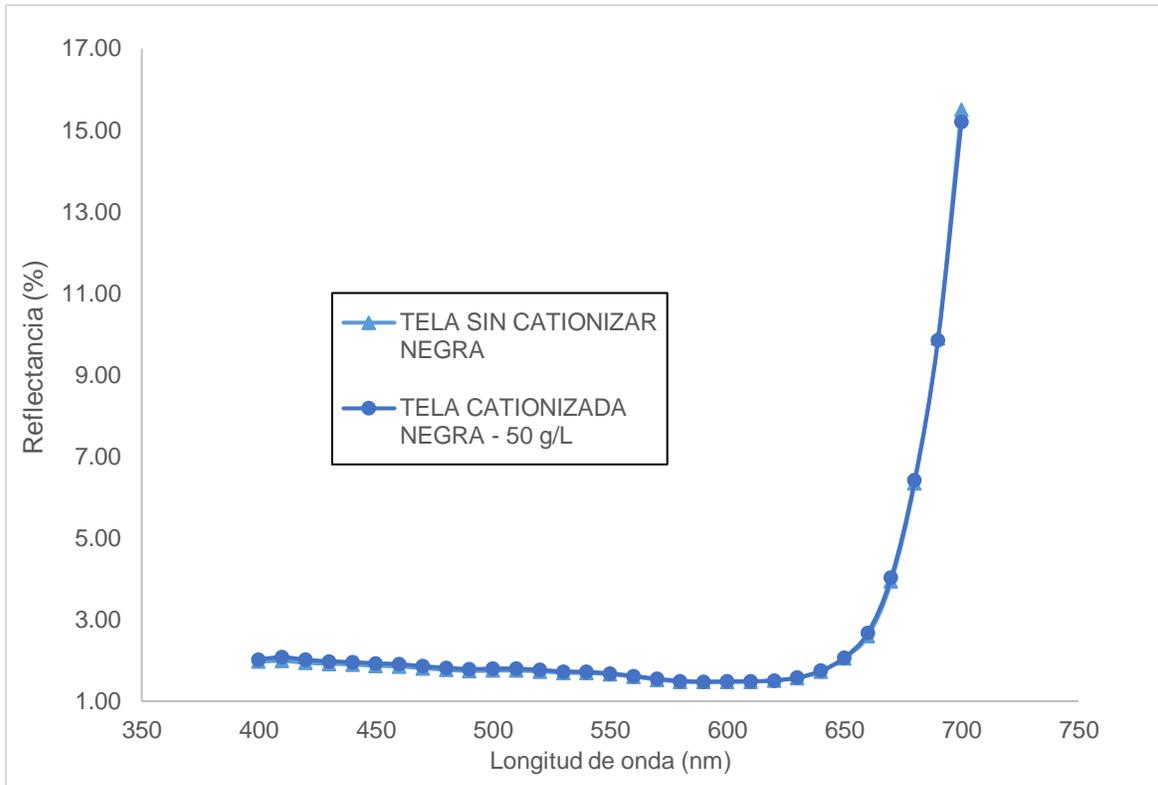
Curva de reflectancia de las telas negras cationizadas con 40 g/L vs. tela sin cationizar.



Nota. Elaborada con datos del software Datacolor Tools versión 1.1, luego de la medición de las telas con el espectrofotómetro Datacolor SF550 calibrado con especularidad incluida (SCI), apertura grande (LAV) y filtro OFF (UV incluida).

Figura 22

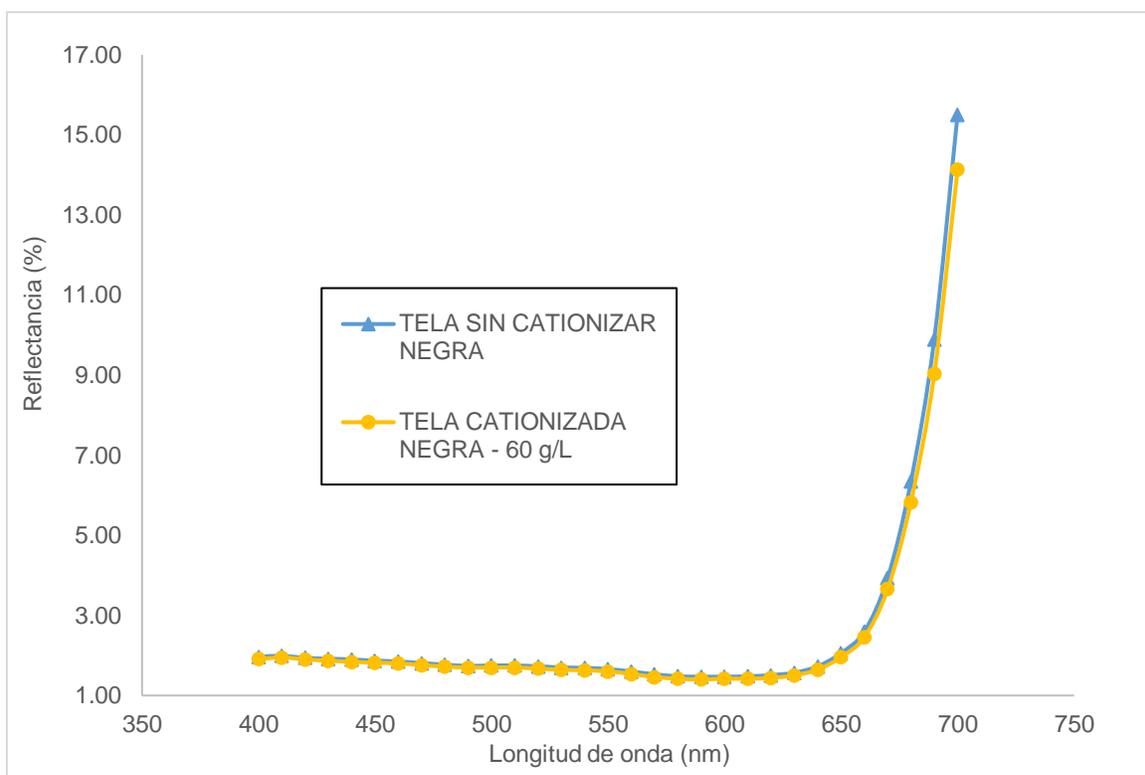
Curva de reflectancia de las telas negras cationizadas con 50 g/L vs. tela sin cationizar.



Nota. Elaborada con datos del software Datacolor Tools versión 1.1, luego de la medición de las telas con el espectrofotómetro Datacolor SF550 calibrado con especularidad incluida (SCI), apertura grande (LAV) y filtro OFF (UV incluida).

Figura 23

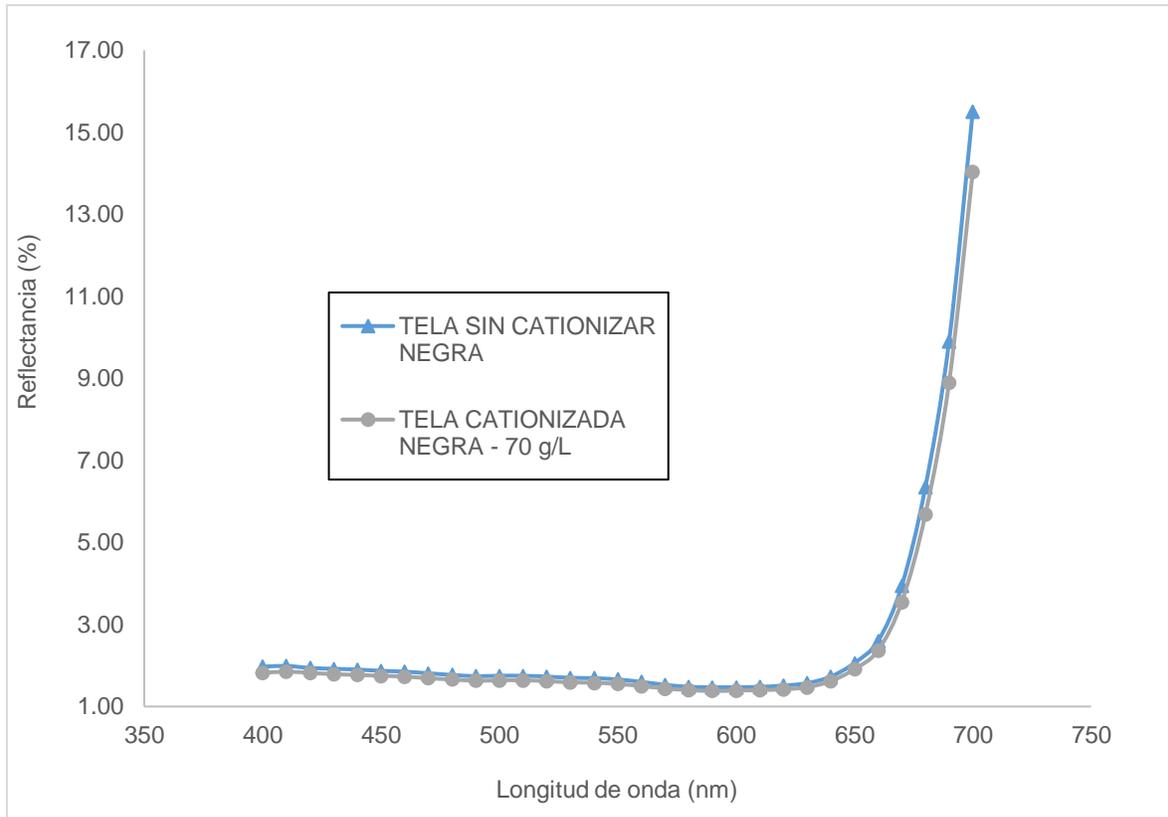
Curva de reflectancia de las telas negras cationizadas con 60 g/L vs. tela sin cationizar.



Nota. Elaborada con datos del software Datacolor Tools versión 1.1, luego de la medición de las telas con el espectrofotómetro Datacolor SF550 calibrado con especularidad incluida (SCI), apertura grande (LAV) y filtro OFF (UV incluida).

Figura 24

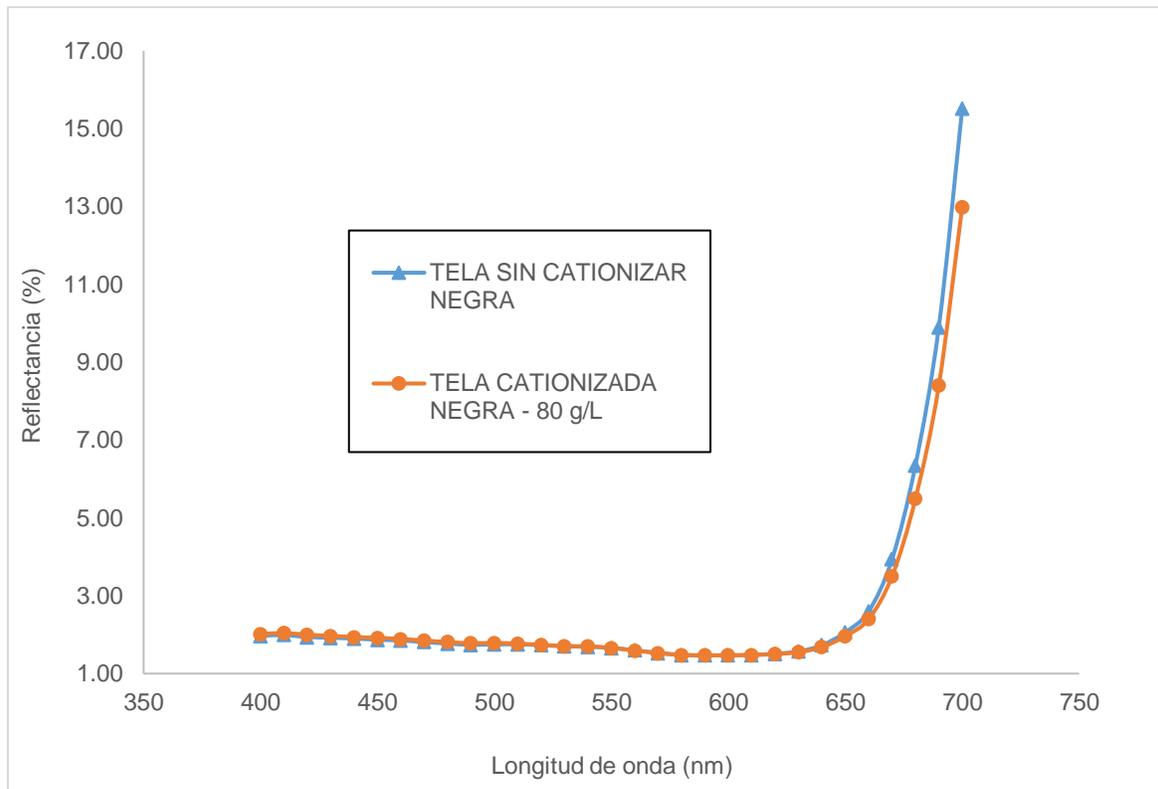
Curva de reflectancia de las telas negras cationizadas con 70 g/L vs. tela sin cationizar.



Nota. Elaborada con datos del software Datacolor Tools versión 1.1, luego de la medición de las telas con el espectrofotómetro Datacolor SF550 calibrado con especularidad incluida (SCI), apertura grande (LAV) y filtro OFF (UV incluida).

Figura 25

Curva de reflectancia de las telas negras cationizadas con 80 g/L vs. tela sin cationizar.



Nota. Elaborada con datos del software Datacolor Tools versión 1.1, luego de la medición de las telas con el espectrofotómetro Datacolor SF550 calibrado con especularidad incluida (SCI), apertura grande (LAV) y filtro OFF (UV incluida).

Se puede observar que en las Figuras 19, 20, 21 y 22, las curvas espectrales de la tela cationizada y teñida con 6% de Corafix Black SD están por encima de la curva espectral de reflectancia de la tela sin cationizar negra, esto nos indica que estas cuatro muestras teñidas previamente cationizadas son más claras que la muestra teñida sin cationizar. En cambio, en las Figuras 23, 24 y 25, las curvas espectrales de la tela cationizada negra están por debajo de la curva espectral de reflectancia de la tela sin cationizar negra, lo cual explica que las tres muestras teñidas previamente cationizadas son más oscuras que la muestra teñida sin cationizar.

En la Tabla 12, se observan los porcentajes de fuerza de color de las telas cationizadas y sin cationizar que han sido teñidas a color negro. La muestra patrón para esta prueba fue la tela sin cationizar teñida con 6% de Corafix Black SD, por este motivo su fuerza de color aparece como 100%. Las telas que fueron procesadas con 60 g/L, 70 g/L y 80 g/L de agente cationizante obtuvieron los porcentajes más altos de fuerza de color en comparación de la tela teñida sin cationizar, lo cual reafirma los resultados obtenidos en las curvas espectrales de reflectancia, que indicaba que estas telas eran más oscuras.

Tabla 12

Fuerza relativa de color de las muestras cationizadas a diferentes concentraciones y teñidas con 6% de Corafix Black SD

Muestra	Concentración del agente cationizante (g/L)	Fuerza relativa de color (%)
Tela sin cationizar negra al 6%	-	100,00
Tela cationizada negra al 6%	20,00	80,90
Tela cationizada negra al 6%	30,00	86,63
Tela cationizada negra al 6%	40,00	95,80
Tela cationizada negra al 6%	50,00	96,89
Tela cationizada negra al 6%	60,00	104,27
Tela cationizada negra al 6%	70,00	107,02
Tela cationizada negra al 6%	80,00	107,72

Nota. Elaborada tomando como referencia los datos del software Datacolor Tools versión 1.1.

Teniendo en consideración lo estudiado por Arivithamani y Giri Dev (2018), ellos demostraron que la muestra teñida convencionalmente y la muestra teñida y cationizada a 80 g/L de CHPTAC presentaban una variación de fuerza relativa de color de 1%. En cambio, en el presente estudio, se obtuvo una mayor variación de fuerza relativa de color de 7,72%. Es decir, mayor rendimiento del colorante en el algodón cationizado con 80g/L.

También podemos notar que si se utiliza una concentración de agente de cationizante mayor o igual a 60 g/L, se obtuvo una variación de fuerza relativa de color superior al 1%.

4.2 Análisis de solidez al lavado

Las telas cationizadas y sin cationizar que fueron teñidas a color negro con 6% de Corafix Black SD se sometieron a la norma de solidez al lavado ISO 105-C06: 2010 Test: B1M, los resultados obtenidos se pueden visualizar en las Tablas 13 y 14.

En la Tabla 13, se puede notar que los resultados de cambio de color obtenidos en las telas teñidas y cationizadas desde 40 g/L en adelante, fueron iguales a la calificación de la tela teñida sin cationizar. Todas las muestras, anteriormente comentadas, obtuvieron una calificación de 4-5, la cual indica que hay un ligero cambio de color.

Por otro lado, en la Tabla 14, las transferencias de color en todas las telas teñidas a negro presentaron resultados favorables, pero si nos centramos en la evaluación de la fibra de algodón, se puede observar que la puntuación obtenida en las telas teñidas y previamente cationizadas a 20 g/L, 30 g/L, 40 g/L y 50 g/L fue igual a la que se obtuvo de la tela teñida sin cationizar. Por el contrario, las telas teñidas y previamente cationizadas a 60 g/L, 70 g/L y 80 g/L obtuvieron una mejor calificación de 4-5.

Tabla 13

Resultados de solidez al lavado: evaluación de cambio de color.

Muestra	Concentración del agente cationizante (g/L)	Cambio de color
Tela cationizada negra al 6%	20,00	3-4
Tela cationizada negra al 6%	30,00	4
Tela cationizada negra al 6%	40,00	4-5

Muestra	Concentración del agente cationizante (g/L)	Cambio de color
Tela cationizada negra al 6%	50,00	4-5
Tela cationizada negra al 6%	60,00	4-5
Tela cationizada negra al 6%	70,00	4-5
Tela cationizada negra al 6%	80,00	4-5
Tela sin cationizar negra al 6%	-	4-5

Nota. Elaborada tomando como referencia los resultados según norma ISO 105-A02, utilizando el software Datacolor Tools versión 1.1, a partir de mediciones en el espectrofotómetro de reflectancia Datacolor SF550.

Tabla 14

Resultados de solidez al lavado: evaluación de transferencia de color.

Muestra	Concentración del agente cationizante (g/L)	Testigo multifibra DW					
		Diacetato	Algodón	Poliamida	Poliéster	Acrílico	Lana
Tela cationizada negra al 6%	20,00	5	4	5	5	5	4-5
Tela cationizada negra al 6%	30,00	5	4	5	5	5	4-5
Tela cationizada negra al 6%	40,00	5	4	5	5	5	4-5
Tela cationizada negra al 6%	50,00	5	4	5	5	5	4-5
Tela cationizada negra al 6%	60,00	5	4-5	5	5	5	4-5
Tela cationizada negra al 6%	70,00	5	4-5	5	5	5	4-5
Tela cationizada negra al 6%	80,00	5	4-5	5	5	5	4-5
Tela sin cationizar negra al 6%	-	5	4	5	5	5	4-5

Nota. Elaborada tomando como referencia los resultados según la norma ISO 105-A03. Para calificar esta prueba se utiliza la escala de grises transferencia de color. Esta calificación va del 1 al 5, donde 5 indica no hay manchado, mientras 1 indica que el testigo está muy manchado.

Los resultados obtenidos en la prueba de solidez al lavado bajo la evaluación de color concuerdan con el estudio de Arivithamani y Giri Dev (2018), quienes demostraron que la muestra teñida sin sal poseía una excelente propiedad de color al lavado. En el presente estudio, las muestras teñidas que fueron previamente cationizadas con una concentración de CHPTAC igual o mayor a 40 g/L obtuvieron estos óptimos resultados.

Adicional a esto, en la evaluación de transferencia de color sobre la fibra de algodón, los resultados obtenidos de las muestras teñidas y previamente cationizadas con una concentración de CHPTAC igual o mayor a 60 g/L fueron similares a lo expuesto por Arivithamani y Giri Dev (2018).

4.3 Análisis de solidez al frote

Las telas cationizadas y sin cationizar que fueron teñidas a color negro con 6% de Corafix Black SD se sometieron a la norma de solidez al frote ISO 105/XI2: 2016, tanto en seco como en húmedo, los resultados obtenidos se pueden visualizar en la Tabla 15.

Se puede observar que los resultados de las evaluaciones de solidez al frote seco sobre las telas cationizadas y teñidas fueron mejores que el obtenido en la tela teñida sin cationizar. El mismo comportamiento se puede observar en los resultados de las evaluaciones de solidez al frote húmedo.

Tabla 15

Resultados de solidez al frote de las muestras teñidas a negro.

Muestra	Concentración del agente cationizante (g/L)	Evaluación de transferencia de color	
		Frote Seco	Frote Húmedo
Tela cationizada negra al 6%	20,00	5	4-5
Tela cationizada negra al 6%	30,00	5	4
Tela cationizada negra al 6%	40,00	5	4
Tela cationizada negra al 6%	50,00	5	4
Tela cationizada negra al 6%	60,00	5	4

Muestra	Concentración del agente cationizante (g/L)	Evaluación de transferencia de color	
		Frote Seco	Frote Húmedo
Tela cationizada negra al 6%	70,00	5	4
Tela cationizada negra al 6%	80,00	5	4
Tela sin cationizar negra al 6%	-	4-5	3-4

Nota. Elaborada tomando como referencia los resultados según la norma ISO 105-A03. Para calificar esta prueba se utiliza la escala de grises transferencia de color. Esta calificación va del 1 al 5, donde 5 indica no hay manchado, mientras 1 indica que el testigo está muy manchado.

Los resultados obtenidos en la prueba de solidez al frote en seco de todas las muestras cationizadas fueron muy similares al resultado obtenido por Arivithamani y Giri Dev (2018), aunque en el presente estudio, se obtuvo la calificación más alta (5).

Por otro lado, en el mismo estudio realizado por Arivithamani y Giri Dev (2018) obtuvieron un resultado de 3-4 de solidez al frote en húmedo para la muestra teñida sin sal, en cambio, en el presente estudio se obtuvo una mejor calificación de 4. Ambos valores son aceptables para este tipo de prueba de solidez.

4.4 Análisis de solidez a la luz

Las telas cationizadas y sin cationizar que fueron teñidas a color negro con 6% de Corafix Black SD se sometieron a la norma de solidez a la luz AATCC TM 16.3 - 2020 Opción 3, los resultados obtenidos se pueden visualizar en la Tabla 16.

Se puede observar que los resultados de las evaluaciones de solidez a la luz, tanto para las muestras cationizadas como para la muestra sin cationizar, fueron iguales. Estos resultados fueron buenos y muestran que no hay influencia negativa en la presencia del agente cationizante en este atributo de calidad.

Tabla 16

Resultados de solidez a la luz de las telas teñidas a negro.

Muestra	Concentración del agente cationizante (g/L)	Cambio de color
Tela cationizada negra al 6%	20,00	4.5
Tela cationizada negra al 6%	30,00	4.5
Tela cationizada negra al 6%	40,00	4.5
Tela cationizada negra al 6%	50,00	4.5
Tela cationizada negra al 6%	60,00	4.5
Tela cationizada negra al 6%	70,00	4.5
Tela cationizada negra al 6%	80,00	4.5
Tela sin cationizar negra al 6%	-	4.5

Nota. Elaborada tomando como referencia los resultados según la norma ISO 105-A02. Para calificar esta prueba se utilizó la escala de grises cambio de color. Esta calificación va del 1 al 5, donde 5 indica no hay cambio de color, mientras 1 indica un cambio severo de color.

En el caso de la propiedad de la solidez a la luz, la calificación obtenida fue tan buena como la de la muestra teñida convencionalmente. Si comparamos lo obtenido por Arivithamani y Giri Dev (2018), se puede notar que ellos también obtuvieron una calificación buena tanto en la muestra teñida convencionalmente y la muestra teñida sin sal, pero fue medio punto más baja que la obtenida en el presente estudio.

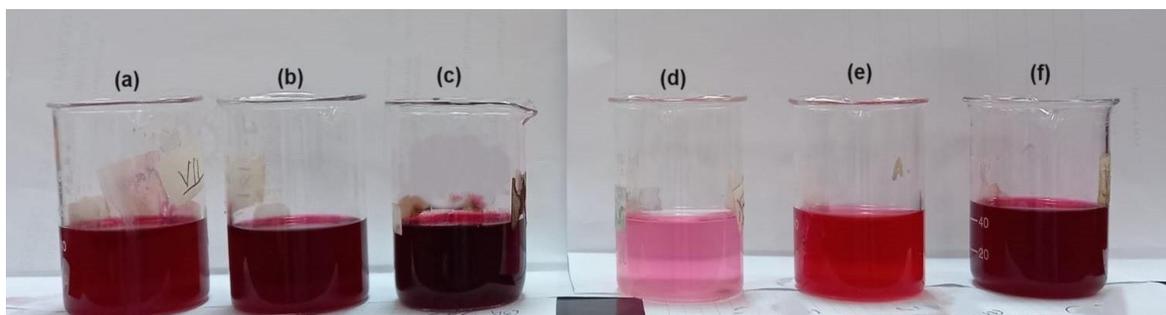
4.5 Resultados de tintura con concentraciones óptimas de cationizado

En base a lo obtenido en los resultados de las evaluaciones de las muestras teñidas cationizadas, se pudo definir que se obtendrían buenos rendimientos cuando se utilice una concentración de agente cationizante desde los 60 g/L en adelante.

En este caso en particular, se optó por utilizar la concentración de 70 g/L para cationizar más muestras de algodón y realizar pruebas de teñido utilizando un nuevo colorante, Corafix Red ME4B 150% a diferentes concentraciones (2%, 4% y 6%). En las Figura 26 y Figura 27 se observa las diferencias de los baños residuales luego de la tintura al usar algodón pre cationizado.

Figura 26

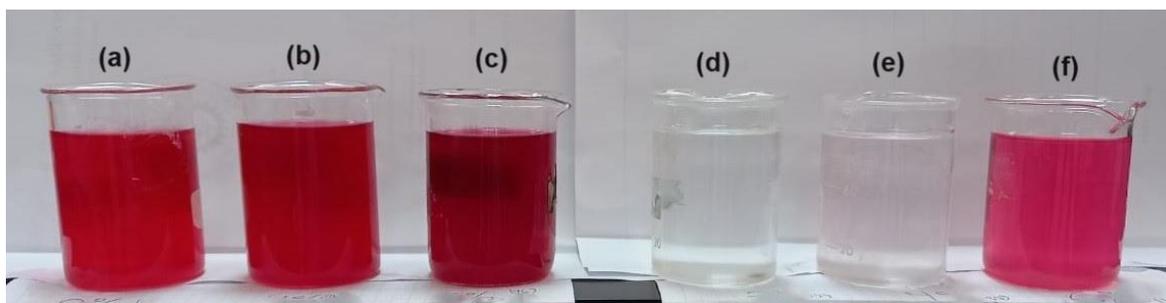
Baños luego del teñido con colorante Corafix Red ME4B 150% a diferentes concentraciones.



Nota: (a) teñido convencional al 2%, (b) teñido convencional al 4%, (c) teñido convencional al 6%, (d) teñido previamente cationizado al 2%, (e) teñido previamente cationizado al 4% y (f) teñido previamente cationizado al 6%.

Figura 27

Baños luego del enjuague obtenidos al teñir con Corafix Red ME4B 150% a diferentes concentraciones.



Nota: (a) teñido convencional al 2%, (b) teñido convencional al 4%, (c) teñido convencional al 6%, (d) teñido previamente cationizado al 2%, (e) teñido previamente cationizado al 4% y (f) teñido previamente cationizado al 6%.

4.5.1 Evaluación de fuerza de color en las muestras

En la Tabla 17, se observan los porcentajes de fuerza de color de las telas cationizadas y sin cationizar que han sido teñidas a rojo al 2% de Corafix Red ME4B 150%. La muestra patrón para esta prueba fue la tela sin cationizar roja al 2% que en el proceso de teñido se le realizó 2 jabonados, por este motivo su fuerza de color aparece como 100%.

Tabla 17

Fuerza relativa de color de las muestras cationizadas al 2% Corafix Red ME4B 150%.

Muestra	Concentración del agente cationizante (g/L)	Fuerza relativa de color (%)
Tela sin cationizar roja al 2% - 1 jabonado	-	98,89
Tela sin cationizar roja al 2% - 2 jabonados	-	100,00
Tela cationizada roja al 2% - 1 jabonado	70	131,13
Tela cationizada roja al 2% - 2 jabonados	70	131,01

Nota. Elaborada tomando como referencia los datos del software Datacolor Tools versión 1.1.

Se puede verificar que las telas que fueron cationizadas obtuvieron los porcentajes más altos de fuerza de color en comparación de las telas teñidas sin cationizar. Si se compara la fuerza de color de las muestras con un solo jabonado, la tela cationizada obtuvo 131,13% frente al 98,89% de la tela sin cationizar. Además, se observa que cuando a la tela cationizada se le realizó dos jabonados, la fuerza de color disminuye a 131,01%.

En la Tabla 18, se observan los porcentajes de fuerza de color de las telas cationizadas y sin cationizar que han sido teñidas a rojo al 4% de Corafix Red ME4B 150%. La muestra patrón para esta prueba fue la tela sin cationizar roja al 4% que en el proceso de teñido se le realizó 2 jabonados, por este motivo su fuerza de color aparece como 100%.

Tabla 18

Fuerza relativa de color de las muestras cationizadas al 4% Corafix Red ME4B 150%.

Muestra	Concentración del agente cationizante (g/L)	Fuerza relativa de color (%)
Tela sin cationizar roja al 4% - 1 jabonado	-	99,48
Tela sin cationizar roja al 4% - 2 jabonados	-	100,00
Tela cationizada roja al 4% - 1 jabonado	70	111,53
Tela cationizada roja al 4% - 2 jabonados	70	106,21

Nota. Elaborada tomando como referencia los datos del software Datacolor Tools versión 1.1.

Se puede verificar que las telas que fueron cationizadas obtuvieron los porcentajes más altos de fuerza de color en comparación de las telas teñidas sin cationizar. Si se compara las muestras con un solo jabonado, la tela cationizada obtuvo 111,53% frente al 99,48% de la tela sin cationizar. Además, se observa que cuando a la tela cationizada se le realizó dos jabonados, la fuerza de color disminuye a 106,21%.

En la Tabla 19, se observan los porcentajes de fuerza de color de las telas cationizadas y sin cationizar que han sido teñidas a rojo al 6% de Corafix Red ME4B 150%.

Tabla 19

Fuerza relativa de color de las muestras cationizadas al 6% Corafix Red ME4B 150%.

Muestra	Concentración del agente cationizante (g/L)	Fuerza relativa de color (%)
Tela sin cationizar roja al 6% - 1 jabonado	-	100,46
Tela sin cationizar roja al 6% - 2 jabonados	-	100,00
Tela cationizada roja al 6% - 1 jabonado	70	107,39
Tela cationizada roja al 6% - 2 jabonados	70	105,36

Nota. Elaborada tomando como referencia los datos del software Datacolor Tools versión 1.1.

La muestra patrón para esta prueba fue la tela sin cationizar roja al 6% que en el proceso de teñido se le realizó 2 jabonados, por este motivo su fuerza de color aparece como 100%.

Se puede verificar que las telas que fueron cationizadas obtuvieron los porcentajes más altos de fuerza de color en comparación de las telas teñidas sin cationizar. Si se compara las muestras con un solo jabonado, la tela cationizada obtuvo 107,39% frente al 100,46% de la tela sin cationizar. Además, se observa que cuando a la tela cationizada se le realizó dos jabonados, la fuerza de color disminuye a 105,36%.

Revisando las Tablas 17, 18 y 19, se puede comprobar que las muestras cationizadas con una menor concentración de colorante nos brinda los porcentajes de fuerza de color más altos, por ejemplo, si comparamos las muestras cationizadas con 1 jabonado, se observa que la muestra cationizada y teñida al 2% obtuvo 131,13% frente al 106,21% de la muestra cationizada y teñida al 4%, y 105,36% de la muestra cationizada y teñida al 6%.

4.5.2 *Análisis de solidez al lavado*

Las telas cationizadas y sin cationizar que fueron teñidas a color rojo con Corafix Red ME4B 150%, se sometieron a la norma de solidez al lavado ISO 105-C06: 2010 Test: B1M, los resultados obtenidos se pueden visualizar en las Tablas 20 y 21.

En la Tabla 20, si comparamos las telas a las cuales solo se le realizó un jabonado, se pudo notar que la tela cationizada y teñida a rojo al 2% no sufrió un cambio de color luego de la prueba de solidez, por ello se obtuvo un resultado de 5. Este valor fue el mejor de todas las muestras que pasaron por un jabonado. Las otras muestras obtuvieron resultado de 4-5, excepto la tela sin cationizar y teñida a rojo al 6% que obtuvo un 4. Este último valor fue el más bajo de las telas con un jabonado.

En el caso de las telas a las cuales se le realizó dos jabonados, se pudo observar que la gran mayoría tuvo un resultado de 4-5, valor considerado como aceptable. En cambio, la tela cationizada y teñida a rojo al 2% obtuvo un valor de 5, el cual fue el mejor de todas las telas con dos jabonados.

En la Tabla 21, las transferencias de color en todas las telas teñidas a rojo presentaron buenos resultados, pero si nos centramos en la evaluación de la fibra de algodón, se puede observar que la calificación obtenida en las telas teñidas y previamente cationizadas fueron mejores. Si comparamos las muestras a las cuales solo se les realizó un jabonado, podemos notar que la diferencia solo radicó en la tela teñida a rojo al 6%. La

muestra sin cationizar tuvo una mayor transferencia de color, obteniendo un 4; mientras que la muestra previamente cationizada obtuvo un 4-5.

Coincidentemente, en las muestras a las cuales se les realizó dos jabonados, la diferencia solo se observó en las telas teñidas a rojo al 6%, la muestra previamente cationizada obtuvo una calificación de 4-5, en cambio la muestra sin cationizar; 4.

Finalmente, podemos notar que la solidez al lavado de las muestras previamente cationizadas no es dependiente del número de jabonados que se realice.

Tabla 20

Resultados de solidez al lavado: evaluación de cambio de color a las muestras teñidas a rojo.

Muestra	Concentración del colorante (%)	Concentración del agente cationizante (g/L)	Cambio de color
Tela sin cationizar roja - 1 jabonado	2,0	-	4-5
Tela sin cationizar roja - 1 jabonado	4,0	-	4-5
Tela sin cationizar roja - 1 jabonado	6,0	-	4
Tela sin cationizar roja - 2 jabonados	2,0	-	4-5
Tela sin cationizar roja - 2 jabonados	4,0	-	4-5
Tela sin cationizar roja - 2 jabonados	6,0	-	4-5
Tela cationizada roja – 1 jabonado	2,0	70,00	5
Tela cationizada roja – 1 jabonado	4,0	70,00	4-5
Tela cationizada roja – 1 jabonado	6,0	70,00	4-5
Tela cationizada roja – 2 jabonados	2,0	70,00	5
Tela cationizada roja – 2 jabonados	4,0	70,00	4-5
Tela cationizada roja – 2 jabonados	6,0	70,00	4-5

Nota. Elaborada tomando como referencia los resultados según norma ISO 105-A02, utilizando el software Datacolor Tools versión 1.1, a partir de mediciones en el espectrofotómetro de reflectancia Datacolor SF550.

Tabla 21

Resultados de solidez al lavado: evaluación de transferencia de color a las muestras teñidas a rojo.

Muestra	Concentración del colorante (%)	Concentración del agente cationizante (g/L)	Testigo multifibra DW					
			Diacetato	Algodón	Poliamida	Poliéster	Acrílico	Lana
Tela sin cationizar roja - 1 jabonado	2,0	-	5	5	5	5	5	5
Tela sin cationizar roja - 1 jabonado	4,0	-	5	4-5	5	5	5	5
Tela sin cationizar roja - 1 jabonado	6,0	-	5	4	5	5	5	5
Tela sin cationizar roja - 2 jabonados	2,0	-	5	5	5	5	5	5
Tela sin cationizar roja - 2 jabonados	4,0	-	5	4-5	5	5	5	5
Tela sin cationizar roja - 2 jabonados	6,0	-	5	4	4-5	5	5	5
Tela cationizada roja – 1 jabonado	2,0	70,00	5	5	5	5	5	5
Tela cationizada roja – 1 jabonado	4,0	70,00	5	4-5	5	5	5	5
Tela cationizada roja – 1 jabonado	6,0	70,00	5	4-5	5	5	5	5
Tela cationizada roja – 2 jabonados	2,0	70,00	5	5	5	5	5	5
Tela cationizada roja – 2 jabonados	4,0	70,00	5	4-5	5	5	5	5
Tela cationizada roja – 2 jabonados	6,0	70,00	5	4-5	5	5	5	5

Nota. Elaborada tomando como referencia los resultados según la norma ISO 105-A03. Para calificar se utiliza la escala de grises transferencia de color. Esta calificación va del 1 al 5, donde 5 indica no hay manchado, mientras 1 indica que el testigo está muy manchado.

4.5.3 Análisis de solidez al frote

Las telas cationizadas y sin cationizar que fueron teñidas a color rojo se sometieron a la norma de solidez al frote ISO 105/XI2: 2016, tanto en seco como en húmedo, los resultados obtenidos se pueden visualizar en la Tabla 22.

Se puede observar que los resultados de las evaluaciones de solidez al frote seco fueron óptimos para todas las muestras, tanto cationizadas como sin cationizar.

En cambio, en las evaluaciones de solidez al frote húmedo si se puede observar diferencia en los resultados obtenidos. Los resultados de las telas sin cationizar, teñidas, tanto al 4% como 6% de concentración de colorante, y con 1 solo jabonado, fueron las más bajas (3-4). Los resultados de las telas cationizadas y teñidas, tanto con 1 como con 2 jabonados, son similares a las que se obtuvieron en las telas sin cationizar y teñido con 2 jabonados.

Tabla 22

Resultados de solidez al frote de las muestras teñidas a rojo.

Muestra	Concentración del agente cationizante (g/L)	Concentración del colorante (%)	Evaluación de transferencia de color	
			Frote Seco	Frote Húmedo
Tela sin cationizar roja - 1 jabonado	-	2,0	5	4
Tela sin cationizar roja - 1 jabonado	-	4,0	5	3-4
Tela sin cationizar roja - 1 jabonado	-	6,0	5	3-4
Tela sin cationizar roja - 2 jabonados	-	2,0	5	4-5
Tela sin cationizar roja - 2 jabonados	-	4,0	5	4
Tela sin cationizar roja - 2 jabonados	-	6,0	5	4
Tela cationizada roja – 1 jabonado	70,00	2,0	5	4-5

Muestra	Concentración del agente cationizante (g/L)	Concentración del colorante (%)	Evaluación de transferencia de color	
			Frote Seco	Frote Húmedo
Tela cationizada roja – 1 jabonado	70,00	4,0	5	4
Tela cationizada roja – 1 jabonado	70,00	6,0	5	4
Tela cationizada roja – 2 jabonados	70,00	2,0	5	4-5
Tela cationizada roja – 2 jabonados	70,00	4,0	5	4
Tela cationizada roja – 2 jabonados	70,00	6,0	5	4

Nota. Elaborada tomando como referencia los resultados según la norma ISO 105-A03. Para calificar se utiliza la escala de grises transferencia de color. Esta calificación va del 1 al 5, donde 5 indica no hay manchado, mientras 1 indica que el testigo está muy manchado.

4.6 Ahorro de recursos en el proceso de teñido reactivo con la curva optimizada

Esta experimentación tuvo como finalidad poder comprobar que podía lograrse ahorro de dos recursos muy importantes en el proceso tintóreo textil: tiempo y agua.

4.6.1 Ahorro de tiempo

En un proceso de teñido convencional con colorantes reactivos para un color oscuro se realizan una serie de procesos, tales como neutralizado, doble jabonado y múltiples enjuagues, tanto en frío como en caliente. Esto se puede observar en la Figura 14.

En la curva optimizada propuesta se ha reducido el número de jabonados y enjuagues como se puede observar en la Figura 15.

Esta curva optimizada nos ha dado como resultado muestras teñidas con buenas solidez, según lo visto líneas arriba, con un ahorro de tiempo en el proceso tintóreo. Este ahorro de tiempo que asciende a un 14,71% se puede visualizar en la Tabla 23.

Tabla 23

Cálculo del tiempo de ejecución del proceso de teñido reactivo convencional vs. proceso de teñido reactivo de muestra cationizada.

Etapa de Proceso	Tiempo de ejecución (min)	
	Teñido reactivo convencional	Teñido reactivo de muestra cationizada
Tintura	110,00	110,00
Enjuague	10,00	10,00
Neutralizado	10,00	10,00
1er Jabonado	10,00	10,00
2do Jabonado	10,00	0,00
Enjuague en caliente	10,00	0,00
Enjuague en frío	10,00	5,00
Tiempo total	170,00	145,00
	Ahorro:	14.71%

4.6.2 Ahorro de agua

En base al estudio realizado por Uribe (2021) se ha tomado como dato, la producción promedio de una tintorería textil en el 2019 por un periodo de seis meses, la cual ascendía a 200 ton/mes.

Con el dato anteriormente indicado se calculó el consumo de agua en litros por Kilogramo de material textil y se pudo proyectar el ahorro de agua en L/kg. Adicionalmente, se requirió la relación de baño utilizada, en este caso 1/8; el número de baños de cada tipo de proceso, así como el porcentaje de la absorción de algodón.

Finalmente se obtuvo que el teñido reactivo convencional consume 38 Litros de agua por kilogramo de material textil teñido, mientras que el proceso de teñido reactivo de una muestra cationizada consume 23 litros de agua por kilogramo de material textil teñido, con lo que se obtiene un ahorro de 39,47% de agua.

Cabe recalcar que en planta habrá un ahorro adicional del recurso hídrico al considerar el agua de enfriamiento para bajar temperatura ni el vapor para calentar los baños del segundo jabonado y enjuague en caliente.

Tabla 24

Comparativa de consumo de agua: proceso de teñido reactivo convencional vs. proceso de teñido reactivo de muestra cationizada.

Tipo de proceso	Número de baños	Absorción de algodón (%)	Consumo de agua (L/kg)
Teñido reactivo convencional	7	300	38,00
Teñido reactivo de muestra cationizada	4	300	23,00
Ahorro			39,47%

Nota. Este cálculo se realizó en base a una relación de baño 1/8, la cual se empleó en el proceso de teñido.

4.6.3 Costo del cationizado

Se realizó un análisis del costo incurrido para cationizar los tejidos de algodón y de esta manera obtener una tintura reactiva sostenible, ya que con este proceso previo se logró omitir la utilización de la sal en el teñido.

En la Tabla 25 se detalla el costo de los productos químicos que se utilizaron en la receta del cationizado de algodón.

Tabla 25

Costo de la receta de cationizado de algodón.

Producto Químico	Concentración (g/L)	Peso (kg)	Precio (US\$/kg producto)	Costo (US\$/kg tela)
CHPTAC	70,00	0,56	0,90	0,50
Hidróxido de sodio	20,00	0,16	0,45	0,07
Ácido acético glacial	1,50	0,012	0,70	0,01
Total				0,58

Conclusiones

- La propuesta y desarrollo de un proceso de cationizado de algodón optimizado se consiguió y constituye una contribución hacia la mejora de la sostenibilidad en la industria textil. Este enfoque no solo se centra en la obtención de resultados de alta calidad en las evaluaciones de color y solidez en los tejidos de algodón, sino que también demuestra un compromiso sólido con la conservación de los recursos. Eliminar la sal como neutralizador en el cationizado reduce la contaminación de efluentes, facilitando su reutilización.
- Se determinó que la concentración del agente cationizante es el parámetro más importante dentro del proceso de cationizado del algodón, ya que en el presente estudio se pudo comprobar que las muestras cationizadas a concentraciones superiores o iguales a los 60 g/L de CHPTAC, obtuvieron los mejores resultados en las pruebas de solidez que se les realizó posterior a su teñido reactivo.
- En el presente estudio, se definió que dentro del método optimizado de tintura reactiva para algodón cationizado se realice un proceso de enjuague junto a un neutralizado y posteriormente solo un jabonado a 75°C, concluyendo con un enjuague en frío. Con esta optimización del método de tintura reactiva, se pudo lograr un ahorro de recursos.
- En las pruebas de solidez, así como en las evaluaciones de color, en la mayoría de los casos se obtuvieron resultados similares. En ciertas evaluaciones, los resultados de las muestras teñidas previamente cationizadas fueron mejores que las muestras teñidas sin cationizar, esto se observa en la prueba de solidez al lavado y en la de solidez al frote, tanto en seco como en húmedo.
- El proceso de cationizado por agotamiento en tejidos de algodón generó ahorros significativos de recursos dentro del proceso de tintura con colorantes reactivos. Se

consiguió un ahorro de agua del 39,47% y un ahorro de tiempo en el proceso tintóreo de 14,71%.

Recomendaciones

- Profundizar en el estudio del cationizado de algodón como un proceso sostenible textil y buscar la manera de escalarlo a nivel producción en planta.
- Evaluar el efecto del cationizado en el algodón utilizando otro tipo de agente cationizante como el DMC o el DADMAC.
- En un estudio posterior se podría analizar la influencia de la temperatura en el proceso de cationizado de algodón.
- Con respecto al proceso de teñido reactivo posterior al cationizado, examinar el comportamiento de las tricromías de colorantes y comprobar si estas mantienen resultados óptimos, cuando se les realicen pruebas de solidez.

Referencias bibliográficas

- Arivithamani, N., & Giri Dev, V. (2018). Characterization and comparison of salt-free reactive dyed cationized cotton hosiery fabrics with that of conventional dyed cotton fabrics. *Journal of Cleaner Production*, 183, 579-589. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.175>
- Arivithamani, N., & Giri Dev, V. R. (2017). Sustainable bulk scale cationization of cotton hosiery fabrics for salt-free reactive dyeing process. *Journal of Cleaner Production*, 149, 1188-1199. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.162>
- Broadbent, A. D. (2001). *Basic Principles of Textile Coloration*. Society of Dyers and Colourists.
- Chattopadhyay, D. P. (2011). Chemistry of dyeing. En M. Clark, *Handbook of textile and industrial dyeing* (Vol. 1, págs. 150-183). Woodhead Publishing Limited.
- Clark, M. (Ed.). (2011). *Handbook of textile and industrial dyeing Volume 1*. Woodhead Publishing Limited.
- Cole, J. (05 de junio de 2019). *El teñido de tejidos: el mayor problema de contaminación de la industria de la moda*. Retrieved 20 de octubre de 2021, from Vogue: <https://www.vogue.es/moda/articulos/tintes-toxicos-ropa-problemas-contaminacion-industria-moda>
- Correia, J., Rainert, K., Oliveira, F., de Cássia Siqueira Curto Valle, R., & Valle, J. (2020). Cationization of cotton fiber: an integrated view of cationic agents, processes variables, properties, market and future prospects. *Cellulose*, 27, 8527-8550. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03361-w>

- Cottonworks. (s.f.). *Cationic cotton*. <https://www.cottonworks.com/en/topics/sourcing-manufacturing/dyeing/cationic-cotton/?highlight=cationic>
- Cottonworks. (s.f.). *Traditional Cotton Dyeing [Fotografía]*. Cottonworks: <https://cottonworks.com/en/topics/sourcing-manufacturing/dyeing/cationic-cotton/>
- García Frutos, A. (2021). *Evaluación ambiental de los productos textiles durante todo su ciclo de vida e introducción de estrategias de economía circular*. [Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Madrid]. <https://oa.upm.es/68410/>
- Gordon, J. (2001). *Handbook of textile fibres* (5 ed., Vol. 1). Woodhead Publishing Limited.
- Ingamells, W. (1993). *Colour for Textiles: A User's Handbook*. Society of Dyers and Colourists.
- J.C Penney Company. (2010). Supplier Conformance Guide Requirements Document Version 1.1s . *J.C Penney Global Color and Fabric Innovation*, 18.
- Khatri, A. (2010). *Pad-steam Dyeing of Cotton with Reactive Dyes Using Biodegradable Alkaline Organic Salts*. [Tesis de doctorado, RMIT University]. <https://core.ac.uk/download/pdf/15624021.pdf>
- Menachem, L. (Ed.). (2006). *Handbook of Fiber Chemistry*. CRC Press.
- Nawang, N. N. (2019). *Study of a process based on salt-free dyeing of cellulosic fibres*. [Tesis de pregrado, Universitat Politècnica de Catalunya]. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/178833>
- New Cloth Market. (Setiembre de 2013). *Problems Solving In Dyeing Of Cotton Textile Material with Reactive Dyes*. Fibre2Fashion: <https://www.fibre2fashion.com/industry-article/7052/problems-solving-in-dyeing-of-cotton-textile-material>

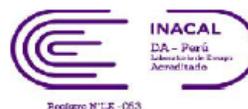
- Peñañiel, S. (2011). *Influencia del suavizado con bases de ácidos grasos en el cambio de matiz en tejidos algodón 100% tinturados con colorantes reactivos de baja reactividad*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte].
<http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/631>
- Sanchez, C. (13 de septiembre de 2016). *La industria textil, la segunda más contaminante del planeta*. XL Semanal:
<https://www.xlsemanal.com/actualidad/20160913/cataclismo-la-fast-fashion.html>
- Uribe, C. (2021). *Estrategia 3R para la gestión de los efluentes textiles generados por los procesos tintóreos* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional Federico Villarreal].
Registro Nacional de Trabajos de Investigación.
<https://hdl.handle.net/20.500.13084/4916>
- Valdeperas-Morell, J. (1994). La colorimetría instrumental: Un auxiliar importante para la industria textil. *Boletín Intexter*(105), 71-75.
https://www.researchgate.net/publication/39433795_La_colorimetria_Instrumental_Un_auxiliar_Importante_para_la_industria_textil
- Villegas, S. (2013). *Optimización de la fase de jabonado en la tintura del algodón 100% con colorantes reactivos mediante evolución y selección de una fórmula técnicamente desarrollada*. [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte].
<http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/1957>
- Wolela, A. D. (2019). Cationic Modification of Cotton for Salt-free Reactive Dyeing: A Review. *International Journal of Modern Science and Technology*, 4(4), 79-91.
<http://www.ijmst.co/vol.-4--issue-4--april-2019---paper-1.html>

Xicota, E. (08 de agosto de 2020). *Los impactos de la industria textil y de la moda en el ambiente*. Retrieved 16 de octubre de 2021, from <https://www.esterxicota.com/impactos-moda-textil-medio-ambiente/>

Anexos

Anexo 1: Prueba de solidez a la luz - AATCC TM 16.3 - 2020 Opción 3	1
Anexo 2: Fotos de la investigación.....	3

Anexo 1: Prueba de solidez a la luz - AATCC TM 16.3 - 2020 Opción 3



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA CON REGISTRO N° LE-053

INFORME DE ENSAYO N° 58065

FECHA DE INFORME : 07 DE SEPTIEMBRE DEL 2022	
SOLICITANTE	: UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA UNI
N° RUC	: 20169004359
Dirección	: Av. Tupac Amaru N° 210 - Rimac - Lima - Perú
Atención	: Lic. Bryan Córdova
Artículo	: JERSEY
Color	: NEGRO
RECEPCION	: QUALITY LAB SAC : Av. Canadá N° 1346 - Urb. Santa Catalina - La Victoria - Lima - Perú
Muestra	: TEXTIL
Tipo	: TELAS
Tejido	: TEJIDO DE PUNTO
Cantidad	: 08
Tamaño	: 12.0 cm x 10.0 cm aprox.
Fecha	: 18 de Agosto de 2022
Ensayo	: 6 de Setiembre de 2022
Informe Previo	: -
ENSAYO SOLICITADO :	Solidez a la Luz - AATCC TM 16.3

ENSAYO		RESULTADO	
1. SOLIDEZ DEL COLOR A LA LUZ		MUESTRA	CAMBIO DE COLOR
Método	: AATCC TM 16.3 - 2020 Opción 3	N° 1	: 4.5
Equipo	: Xenón Weather Ometer, Atlas Ci 3000+, 16110, rack horizontal, agua desionizada, Cámara: 43°C, Panel negro: 63°C	N° 2	: 4.5
Exposición	: 20 AFU - 85 KJ/m ² - 20 horas	N° 3	: 4.5
Ensayo	: MVM . 06/09/2022 L-4	N° 4	: 4.5
Especímen	: Cara Técnica, preparada con respaldo	N° 5	: 4.5
Evaluación con Escala de Grises - AATCC, con la muestra original		N° 6	: 4.5
		N° 7	: 4.5
		N° 8	: 4.5

INFORME DE ENSAYO N° 58065

Disposiciones y Normativas :

- Todos nuestros equipos e instrumentos están calibrados por Laboratorios Acreditados.
- Los resultados de este informe solo están relacionados exclusivamente con la muestra tal como se recibió.
- Los especímenes de la muestra fueron acondicionados de acuerdo a ASTM D 1776.
- Quality Lab se responsabiliza por toda la información en este Informe de Ensayo, excepto los datos que declara el solicitante.
- El informe incluye los test solicitados basados en la información que nos fue proporcionada.
- Los resultados no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.
- A partir de la fecha de emisión, tiene 60 días para cualquier reclamo concierne a este servicio y se atenderá de manera rápida e imparcial de acuerdo a nuestro Procedimiento de Atención de Quejas.
- Los restantes de la muestra será almacenada por un periodo de 60 días, después del cual será destruida, en caso de que el cliente requiera retirarla deberá solicitarlo con anticipación.
- Este informe no debe ser copiado, reproducido o adulterado por alguna persona o entidad; ni usar nuestro nombre, sin la aprobación escrita de Quality Lab.
- Quality Lab se compromete en guardar la confidencialidad de los servicios prestados y los derechos de propiedad de la muestra, salvo requerimiento expreso de una autoridad gubernamental o judicial.
- En caso de cualquier modificación externa del Informe de Ensayo, la cláusula de confidencialidad quedará anulada, pudiendo Quality Lab SAC tomar todas las acciones legales pertinentes.

Revisado por :

MAYRA VIDAURRE
Supervisora de Laboratorio
Quality Lab SAC
SC

FIN DEL INFORME DE ENSAYO N° 58065

SI NECESITA AYUDA PARA INTERPRETAR LOS RESULTADOS DE ESTE INFORME O SI TIENE ALGUNA PREGUNTA, NO DUDE EN CONTACTARNOS.

Anexo 2: Fotos de la investigación.

Foto 1. *Carga en máquina de teñido infrarrojo modelo HTN-24P.*



Foto 2. *Preparación de los insumos para el teñido.*



Foto 3. Lectura de muestras en el espectrofotómetro Datacolor SF550.



Foto 4. Evaluación de cambio de color con el uso de la escala de grises.



Foto 5. Baños residuales del algodón teñido a color negro.



Nota: (a) baño residual de la muestra teñida y previamente cationizada y (b) baño residual de la muestra teñida convencionalmente.