



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

Propuesta del mecanismo de detergencia en
tela de algodón y su verificación experimental

TESIS
PARA OBTENER EL TÍTULO DE
QUÍMICA

PRESENTA
Martha Rosario de los Santos González



CDMX

2021



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Je suis de ceux qui pensent que la science est d'une grande beauté. Un scientifique dans son laboratoire est non seulement un technicien : il es aussi un enfant placé devant des phénomènes naturels qui l'impressionnent comme des contes de fées.

(Soy de las que piensan que la ciencia tiene una gran belleza. Un científico en su laboratorio no es sólo un técnico: también es un niño colocado ante fenómenos naturales que lo impresionan como un cuento de hadas.)

MARIA SALOMEA SKŁODOWSKA (MARIE CURIE)

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE:	Profesor:	Jesús Gracia Fadrique
VOCAL:	Profesor:	José Luis López Cervantes
SECRETARIO:	Profesor:	Arturo Antonio García Figueroa
1er. SUPLENTE:	Profesor:	Ernesto Carrillo Nava
2do. SUPLENTE:	Profesor:	Víctor Manuel Luna Pabello

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA

Laboratorio de Superficies, Edificio F Laboratorio 331, Facultad de Química UNAM

ASESOR DEL TEMA:

Dr. José Luis López Cervantes

SUPERVISOR TÉCNICO:

Mtro. en C. Arturo Antonio García Figueroa

SUSTENTANTE:

Martha Rosario de los Santos González

Agradecimientos

A mi mamá Gloria González Trejo y a mi papá Adrián de los Santos Alvarado por guiarme en mi crecimiento y por el cariño que he recibido a lo largo de mi vida.

A mis amigos por su compañía, presencia, cariño y motivación que me han brindado.

Al Dr. José Luis López Cervantes y al Mtro. en C. Arturo Antonio García Figueroa por el tiempo dedicado, su apoyo y los conocimientos brindados.

Investigación realizada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM IN-113918. Agradezco a la DGAPA-UNAM la beca recibida.

A el Dr. Jesús Gracia Fadrique por abrirme las puertas de su laboratorio para realizar mi trabajo de titulación.

A todas aquellas personas que con su ayuda hicieron posible realizarme como profesionista.

Índice general

Índice de figuras	VIII
Índice de tablas	IX
Abreviaturas	XI
1. Introducción	1
1.1. Industria textil	1
1.1.1. La detergencia en el proceso industrial	3
1.1.2. El algodón en la industria textil	4
1.2. Contaminación ambiental	4
1.2.1. Efecto ambiental de los detergentes	6
1.3. Problemática	7
1.4. Antecedentes bibliográficos	8
2. Antecedentes	11
2.1. Detergentes	11
2.1.1. Tensoactivos	11
2.1.2. Aditivos del detergente	19
2.2. Detergencia	24
2.2.1. Determinación del poder detergente	24
2.2.2. Mecanismos de detergencia	30
3. Objetivos	37
3.1. Objetivo general	37
3.2. Objetivos particulares	37
4. Materiales y Métodos	38
4.1. Reactivos	38
4.2. Material y equipo	38
4.3. Sistema de ensuciamiento	39
4.4. Equipo de lavado	39
4.4.1. Agitación	40
4.5. Secado	40
4.6. Blancura	41
4.7. Dispersión de luz dinámica	43
4.8. Microscopía Electrónica de Barrido	43
4.9. Turbidez	44

5. Resultados y discusión	45
5.1. Mecanismo de detergencia	45
5.1.1. Suciedad adherida al sustrato	46
5.1.2. Interacción Sustrato-Suciedad-Baño	46
5.1.3. Emulsificación	49
5.1.4. Proceso general de detergencia	50
5.1.5. Eficiencia termodinámica	51
5.1.6. Casos de la Detergencia	51
5.2. Propuesta Experimental	52
5.2.1. Comparación del método de medición de la detergencia	52
5.2.2. Verificación experimental del mecanismo de detergencia	55
5.3. Resultados Experimentales	58
5.3.1. Comparación de la medición de detergencia por blancura y por diferencia de masas	58
5.3.2. Verificación experimental del mecanismo de detergencia	62
6. Conclusiones	65
A. Gráficas con datos de literatura	66
B. Tablas de resultados experimentales	69
C. Histogramas	71
D. Microscopía Electrónica de Barrido	76
Referencias	82

Índice de figuras

1.1. Producción mundial de fibra en millones de dólares.	2
1.2. Principales países de destino de las exportaciones mexicanas de la industria textil-confección en Millones de dólares.	3
1.3. Producción global de fibra en 2021. a) Total de fibras b) Fibras naturales	4
1.4. Vías de biodegradación aeróbica de los etoxilatos de nonilfenol	7
2.1. Estructura de tensoactivo	12
2.2. Tensoactivos aniónicos.	13
2.3. Estructura química del dodecilsulfato sódico	14
2.4. Estructura química de los etoxilatos de nonilfenol	15
2.5. Estructura química del cloruro de benzalconio	16
2.6. Estructura química de la cocamidopropil betaína	16
2.7. Isoterma de adsorción de tensoactivos con sus cuatro Regiones	18
2.8. Curvas de propiedades físicas para el dodecilsulfato de sodio	18
2.9. Unión del ión calcio por STTP mediante quelación	20
2.10. Estructura química de la carboximetilcelulosa.	20
2.11. Factores que impactan en la eficiencia de la detergencia	24
2.12. a) Imágenes SEM de tejidos de algodón con un aumento de 30× y estructura de una sola hebra con un aumento de 2000× b) Estructura química de la celulosa .	26
2.13. Estructura química del ácido oleico	28
2.14. Estructura química del Rojo Nilo	28
2.15. Detergencia y adsorción de tensoactivos durante el transcurso del tiempo	30
2.16. Ángulo de contacto de una gota de aceite (D) en un sustrato (S) en una atmósfera de aire (A)	32
2.17. Mecanismo Rolling up. Ángulo de contacto mayor a 90°	33
2.18. "Necking". Ángulo de contacto menor a 90°	33
2.19. Mecanismo de solubilización	34
2.20. a) Solubilización b) Comicelización	35
2.21. Curvatura de las estructuras formadas en la transición de las microemulsiones O/W y W/O	36
4.1. Sistema de ensuciamiento	40
4.2. Equipo de lavado: a) Sin perturbación b) Con agitación c) Con ultrasonido d) Con ultrasonido y agitación.	40
4.3. a) Propela marina b) Tacómetro B-891, Power Instruments, Inc.®	41
4.4. Telas en secadora de aire Hamilton Beach®32100A	41
4.5. Sistema de fotográfico	42
4.6. Turbidímetro, HACH®2100N	44
5.1. Interacción Sustrato-Suciedad	46
5.2. Sustrato-Suciedad en el Baño	46
5.3. Sustrato-Suciedad-Tensoactivo monomérico	47

5.4. Interacción del tensoactivo con el sustrato y suciedad	47
5.5. Sustrato-Suciedad-Micelas	48
5.6. Emulsificación	49
5.7. Metodología para la verificación del procedimiento de la medición de la detergencia	52
5.8. Tela de Algodón WFK 10A cortada en rectángulos de 10 x 11 cm con bordes en zigzag (Sustrato).	53
5.9. Rojo Nilo + ácido oleico (Suciedad)	53
5.10. Adición de la suciedad al sustrato	54
5.11. Metodología para la verificación del mecanismo detergente	56
5.12. Sustrato con SDS en agua y 2-propanol	57
5.13. Sustrato con Suciedad en agua y 2-propanol	57
5.14. Correlación del % Detergencia entre el artículo y la experimentación del presente trabajo	59
5.15. Relación Experimental Masas-Blancura	62
A.1. Graficas Detergencia vs. Sonicado, poliéster 30A y suciedad de ácido oleico-sudan III	66
A.2. Graficas Detergencia vs. Sonicado, algodón 10A y suciedad de ácido oleico-sudan III	66
A.3. Graficas Detergencia vs. Sonicado, algodón 10A y suciedad de Negro de carbón .	67
A.4. Graficas Detergencia vs. Sonicado, poliéster 30A y suciedad de Negro de carbón	67
A.5. Graficas Detergencia vs. Agitado, poliéster 30A y suciedad de ácido oleico-sudan III	67
A.6. Graficas Detergencia vs. Agitado, poliéster 30A y suciedad de Negro de carbón .	68
A.7. Graficas Detergencia y tipos de suciedades, poliéster 30A y Sonicado	68
C.1. Histogramas Tela 1	71
C.2. Histogramas Tela 2	71
C.3. Histogramas Tela 3	71
C.4. Histogramas Tela 4	72
C.5. Histogramas Tela 5	72
C.6. Histogramas Tela 6	72
C.7. Histogramas Tela 7	72
C.8. Histogramas Tela 8	73
C.9. Histogramas Tela 9	73
C.10. Histogramas Tela 10	73
C.11. Histogramas Tela 11	73
C.12. Histogramas Tela 12	74
C.13. Histogramas Tela Mec1	74
C.14. Histogramas Tela Mec2	75
D.1. Microscopía Electrónica de Barrido del Sustrato.	76
D.2. Espectro de Emisión de Electrones del sustrato	76
D.3. Microscopía Electrónica de Barrido del sustrato lavado.	77
D.4. Espectro de Emisión de Electrones del sustrato lavado	77

Índice de tablas

1.1. Impacto de la Industria textil y de la confección en actividades económicas, 2013	3
1.2. Clasificación de problemas ambientales en el procesamiento en húmedos de textiles	5
1.3. Ejemplos típicos de detergentes	6
2.1. Proporción de composición en toda la fibra de algodón	26
2.2. Métodos de remoción de impurezas del algodón	27
2.3. Desplazamiento de la suciedad oleosa de acuerdo a los ángulos de contacto . . .	33
4.1. Características del microscopio electrónico de barrido [1]	43
5.1. % Detergencia obtenida por blancura	58
5.2. Remoción de suciedad obtenida por masas.	61
5.3. % Detergencia obtenida por blancura	62
5.4. Turbidez	64
B.1. Masas de la parte experimental “comparación del método”.	69
B.2. Blancura y detergencia Kubelka-Munk en la parte experimental “Verificación experimental del mecanismo de detergencia”.	69
B.3. Blancura y detergencia Kubelka-Munk en la parte experimental “comparación del método”.	70

Abreviaturas y Símbolos

-	No hay acción mecánica
% D	Porcentaje de detergencia
A	Aire
Ag	Agitado
AOX	Compuestos Orgánicos Halogenados
B	Baño
B _A	Baño, agua
B _E	Baño, emulsiones de tensoactivo y suciedad
B _M	Baño, micelas
B _T	Baño, tensoactivo monomérico
Baño _D	Baño con residuos de suciedad después del lavado
Bl	Blancura
CMC	Concentración micelar crítica
COV	Compuestos orgánicos volátiles
D	Suciedad
D _E	Disolución ensuciadora
D _W	Disolución enjuagadora
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
Desv. Std.	Desviación estándar
DLS	Dispersión de luz dinámica
DQO	Demanda química de oxígeno
E	Ensuciamiento
In	Interacción
KM	Kubelka-Munk
m	Masa

PE	Punto de Enturbiamiento
RPM	Revoluciones por minuto
S	Sustrato
S_D	Sustrato con suciedad
S_L	Sustrato lavado
S_W	Sustrato enjuagado
S_{SDS}	Sustrato con dodecilsulfato de sodio
SDS	Dodecilsulfato de sodio
SEM	Microscopía Electrónica de Barrido
Son	Sonicado
T	Turbidez
TDS	Total de Sólidos Disueltos
W	Enjuague

Capítulo 1

Introducción

Los tensoactivos han estado presentes en la historia de la sociedad por siglos. La primera referencia literaria se encuentra en tablillas sumerias de arcilla sobre el lavado de lana que datan de 2500 a. C. En otra tablilla sumeria de 2200 a.C. se describe la forma en la que obtenía jabón a partir de agua, álcali y aceite de casia [2]. Este método de obtención basado en el proceso de saponificación de productos naturales se mantuvo hasta 1916 con el surgimiento del primer detergente sintético y mejorando a lo largo del tiempo [3].

A lo largo del tiempo los tensoactivos han sido utilizados con diversos fines y necesidades. En rituales religiosos, como los hebreos, instituyendo leyes respecto al lavado de manos antes y después de una comida, y de manos y pies antes de entrar al templo [2]. En la industria alimentaria son necesarios para favorecer la acción de los desinfectantes y garantizar la inocuidad de los alimentos. La industria del papel los utiliza para lavar la pulpa. En el área de la salud son importantes al utilizarlos en la limpieza para la prevención de la propagación de enfermedades. La industria metalúrgica en la limpieza de los metales: desengrasado, enjuagado, etc. En la industria textil en el lavado (detergencia), blanqueo, tintura, etcétera [4].

1.1. Industria textil

Globalmente la producción de fibras registró 109 millones de toneladas en 2020. Esta producción casi se ha duplicado desde el año 2000 cuando la producción era de 58 millones de toneladas. Si bien el crecimiento se vio afectado por la pandemia; se espera que si se restaura el crecimiento de los años anteriores, habrá un aumento mayor al 30 % en la producción, estas tendencias se muestran en la imagen 1.1 [5].

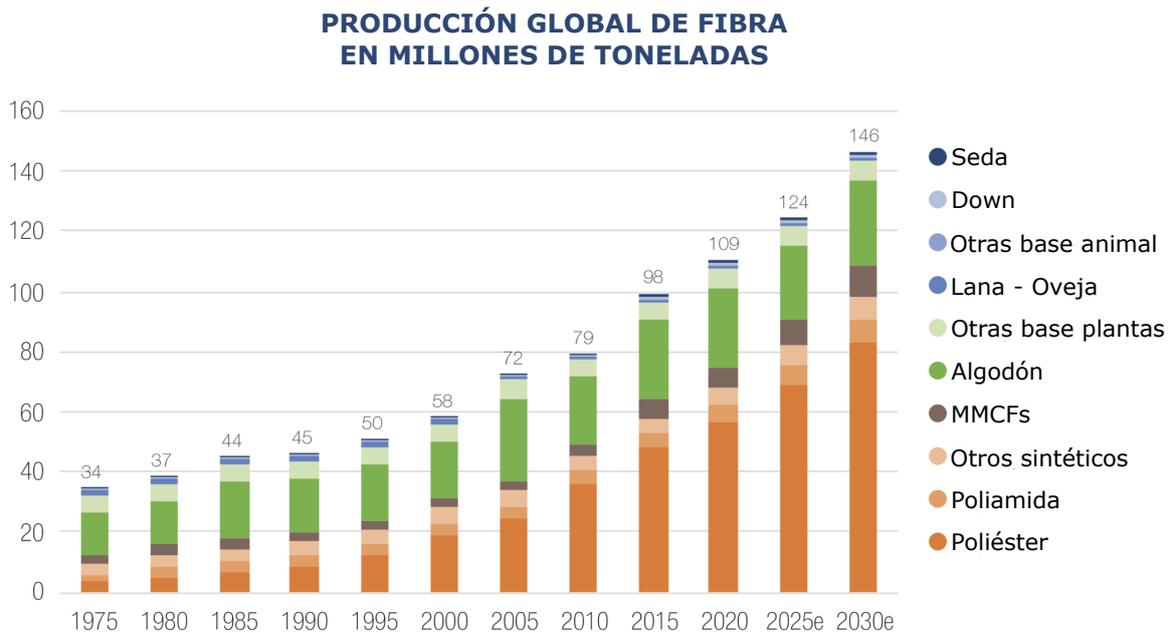


Figura 1.1: Producción mundial de fibra en millones de dólares. Recuperado y traducido de <https://textileexchange.org/preferred-fiber-and-materials-market-report/>

A nivel nacional la industria textil y de la confección se encuentra entre las actividades económicas manufactureras más importantes. Con el Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) el PIB de la Industria textil y de la confección aumentó. Sin embargo, descendió el PIB de esta industria al unirse China a la Organización Mundial de Comercio (OMC) en el año 2000 [6]. En 2021 ha tenido un aporte del 7.2% del PIB de las Industrias manufactureras. El PIB de esta industria disminuyó por la pandemia un 3.4% respecto a 2019 por no ser considerada como esencial.

El principal destino de las exportaciones mexicanas de la industria textil-confección es Estados Unidos de América (EUA). En 2021 el 86% del total de exportaciones se realizaron a este país. Sin embargo, la aceptación de confecciones mexicanas se ha extendido a diversos países de América Latina y de Europa, destacando aquellos con los que se han suscrito acuerdos comerciales. Es por esto que después de EUA los países a donde principalmente se dirigen las exportaciones son Nicaragua con 75 millones de dólares (mdd) y Honduras con 52 mdd. En la imagen 1.2 se muestran los principales países a donde se realizan exportaciones [7].

Respecto a las importaciones de la industria textil en 2021, EUA lidera como país de origen con un 20.8%, siguiéndolo por China con 14.7%. En este año las importaciones de México han mantenido un crecimiento constante con una variación del 8.8% [7].

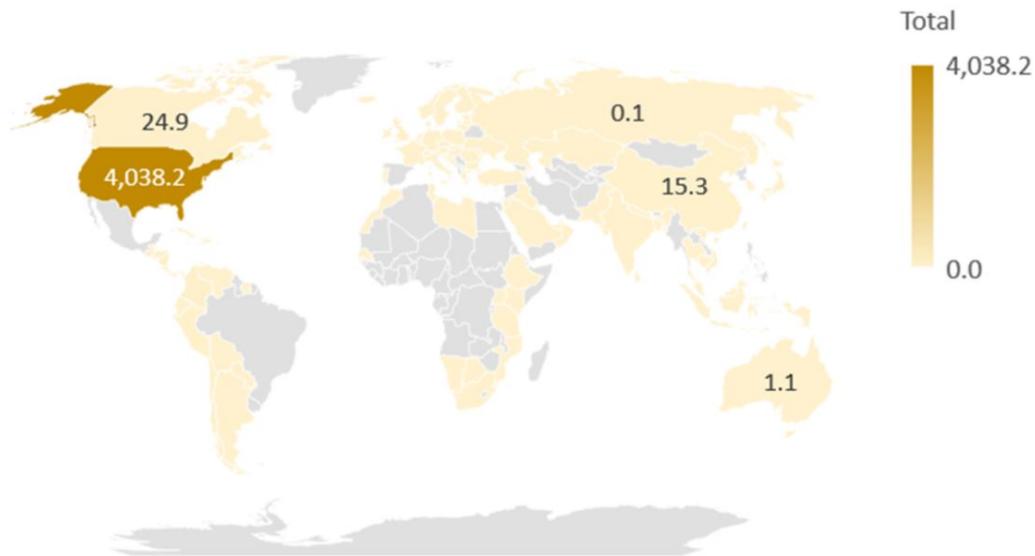


Figura 1.2: Principales países de destino de las exportaciones mexicanas de la industria textil-confección en Millones de dólares. Recuperado de <https://canaintex.org.mx/informacion-estadistica-infografias/>

La demanda de insumos para la producción de la industria textil y de confección tiene impacto sobre 406 actividades económicas, según SCIAN, que se desglosan en la tabla 1.1 siendo el sector secundario donde la mayoría de estas se desarrollan. Las actividades económicas se consideran de un total de 822 clases de actividad que se encuentran en la Matriz de Insumo-Producto (MIP) [6].

Tabla 1.1: Impacto de la Industria textil y de la confección en actividades económicas, 2013. Elaborada con datos de INEGI, 2021 [6]

Sector	Número de clases de actividad del SCIAN
Sector primario	15
Sector secundario	266
Comercio y servicios	125
Total	406 clases de actividad del SCIAN

1.1.1. La detergencia en el proceso industrial

Los tensoactivos dentro de la industria textil son muy variados y se utilizan en partes del proceso como lo son: el hilado, el tejido, el desescarchado, el fregado, el blanqueo, el teñido y en los acabados. Actúan como detergentes, agentes humectantes, emulsionantes, agentes espumantes, dispersantes, suavizantes y agentes antiestáticos. Una de las aplicaciones donde más se encuentran presentes los tensoactivos en esta industria es en el fregado de fibras celulósicas naturales, jugando un papel crítico, debido a que encontrar trazas de suciedad afecta los procesos posteriores como la tintura, el revestimiento, laminaciones, entre otros [8, 4, 9].

1.1.2. El algodón en la industria textil

Las fibras naturales representaron alrededor del 30 % del mercado mundial de fibra en 2020. El algodón domina la producción textil de este sector y la segunda fibra más importante en términos de volumen con 24 % de la producción mundial de fibra en 2020, como se muestra en la imagen 1.3 [5].

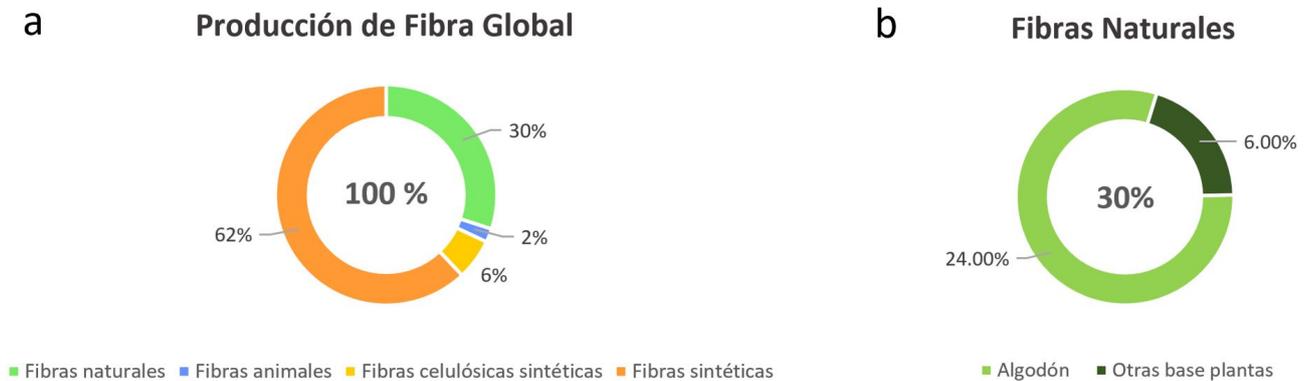


Figura 1.3: Producción global de fibra en 2021. a) Total de fibras b) Fibras naturales. Elaboración propia con datos de Textile Exchange, 2021 [5]

1.2. Contaminación ambiental debida al proceso de detergencia

La industria textil tiene una gran diversidad de materias primas, procesos, productos y equipos. Se puede clasificar en términos generales en procesamiento seco y húmedo. El procesamiento en seco incluye la fabricación de hilados, el tejido y el tejido de punto. El procesamiento en húmedo requiere más agua, energía y se genera mayor contaminación, especialmente para las fibras naturales, de las cuales el algodón domina la producción textil [10].

El proceso en húmedo se compone de las etapas: preparación, coloración y acabado. La primera de ellas es de donde proviene aproximadamente más de la mitad de la contaminación total, debido a la producción de aguas residuales y alto consumo energético. La preparación del algodón incluye el desaprestado, el lavado/fregado, el blanqueo y el mercerizado [10].

Los subprocesos que participan en el proceso en húmedos de textiles son: desaprestado, lavado/fregado, blanqueo, mercerizado, teñido, estampado y acabado. En el desaprestado se elimina el encolado aplicado al hilo de urdimbre antes de tejer; esto se realiza para facilitar la penetración de tintes y productos químicos en las operaciones posteriores. En el lavado/fregado se reduce la cantidad de impurezas para obtener resultados uniformes y reproducibles en las

operaciones de teñido y acabado. En el proceso de blanqueo se producen tejidos blancos utilizando agentes blanqueadores que impactan mínimamente la degradación de la fibra y que destruyen la materia colorante proveniente de los pigmentos de flavona de la flor del algodón o el amarillento causado por el clima, el suelo, la sequía y las heladas. La mercerización proporciona a la tela de algodón un brillo sedoso y es la base de acabados mejorados y hermosos [11]. En el teñido se utilizan colorantes para proporcionar a la tela color. El estampado se utiliza para producir efectos de moda sobre los tejidos [12]. En el acabado se mejoran las propiedades físicas y mecánicas del textil [13]. En la tabla 1.2 se observa el impacto ambiental que tienen estos subprocesos. Por interés del presente trabajo se destaca en esta tabla que el proceso de lavado/fregado tiene una prioridad alta y entre sus principales problemas se encuentra la toxicidad de los tensoactivos [10].

Tabla 1.2: Clasificación de problemas ambientales en el procesamiento en húmedos de textiles. Adaptado de Ren, 2000 [10]

Sub-proceso	Principales problemas ambientales	Prioridad	Observaciones
Desapretado	DBO más alta (>50%), uso de productos químicos.	Alta	La operación de apresto puede afectar significativamente, se prefieren tamaños bajos/recuperables de DBO
Lavado/fregado	DBO alta (20-30%), DQO, toxicidad de los tensoactivos, etc., agua consumida en el lavado.	Alta	Se prefieren los productos químicos de baja toxicidad a la DBO baja
Blanqueo	AOXs en efluentes	Baja	No hay tal problema para el blanqueamiento con H_2O_2
Mercerizado	Alta alcalinidad en efluentes	Más baja	Rara vez practicado en Europa
Teñido	Color, DBO (10-20%), la mayoría de los metales, sales, DQO (>30%), alto consumo de agua/energía	Más alta	Principalmente contaminación del agua e impactos relacionados con la energía
Estampado	COVs, urea, disolventes, aglutinantes	Baja	Principalmente emisión de aire
Acabado	COVs, urea-aldehído, energía	Media	Impactos principalmente relacionados con el aire/la energía

Debido a que se utilizan pH altos en el lavado, las aguas residuales contienen contaminantes emulsionados y solubilizados, obteniendo valores de demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y total de sólidos disueltos (TDS, por sus siglas en inglés) altos [14]. En la normativa mexicana para las descargas de aguas residuales de la industria textil NOM-CCA-014-ECOL/1993 [15] se estipula para el DBO un máximo de 100 a 120 mg O_2/L de DBO y el efluente del proceso de fregado de algodón se obtiene de 100 a 2900 mg O_2/L . Por su lado, el DQO se estipula de 200 a 240 mg O_2/L y el efluente de fregado de algodón se obtiene de 8000 mg O_2/L [14, 15].

1.2.1. Efecto ambiental de los detergentes

Los tensoactivos utilizados en el proceso textil de lavado son, por lo general, combinaciones de tensoactivos no iónicos y aniónicos. Algunos tensoactivos típicos que se utilizan en la industria textil como detergentes se encuentran en la tabla 1.3. Los tensoactivos no iónicos debido a su lenta degradación provocan efectos tóxicos en el medio ambiente [14].

Tabla 1.3: Ejemplos típicos de detergentes. Elaborada con datos de Karmakar, 1999 [11]

Carga iónica	Tensoactivos
Aniónicos	Estearato de sodio (jabón) Sulfonatos de naftaleno de dipropilo Sulfonatos de alquilbenceno Sulfatos de alquilo Sulfonatos de alcanos Ésteres de fosfato
No iónicos	Alcohol primario etoxilado Nonil fenol etoxilado Tioéteres etoxilados Ácidos grasos etoxilados Amida grasa etoxilada

Los nonil fenol etoxilados (NPE) son tensoactivos no iónicos económicos para formular y en la imagen 1.4 se describe la secuencia de degradación de los NPE; la ruta de degradación depende de las condiciones de cinética y/o condiciones ambientales en la que se encuentre esta sustancia. En cada paso de degradación se acortan las cadenas, dando intermediarios que también son tensoactivos. Los oligómeros NPE1 y NPE2 son hidrófobos y se adsorben en los sólidos orgánicos de lodos y sedimentos. Los carboxilatos al ser hidrófilos permanecen en solución. El NP en presencia de oxígeno se forma en muy pocas cantidades. Por último, el anillo aromático se oxida y se rompe formando fenol, un endocrino disruptor [16].

Los tensoactivos etoxilatos de alquilfenol se utilizan mayormente como auxiliares por su capacidad como detergente y agente humectante. Sin embargo, estos son no biodegradables y disruptores endocrinos que interfieren con los sistemas hormonales de los mamíferos.

La presencia de tensoactivos con fosfatos afecta la calidad del agua debido a que favorecen el crecimiento de algas que provocan la eutrofización de las aguas.

Los tensoactivos aniónicos, alquilbencenosulfonatos lineales (LAS), provocan cambios en las actividades fisiológicas y bioquímicas de los organismos acuáticos retrasando su metabolismo y crecimiento; dañan su membrana celular rompiendo el complejo proteico de la clorofila [17].

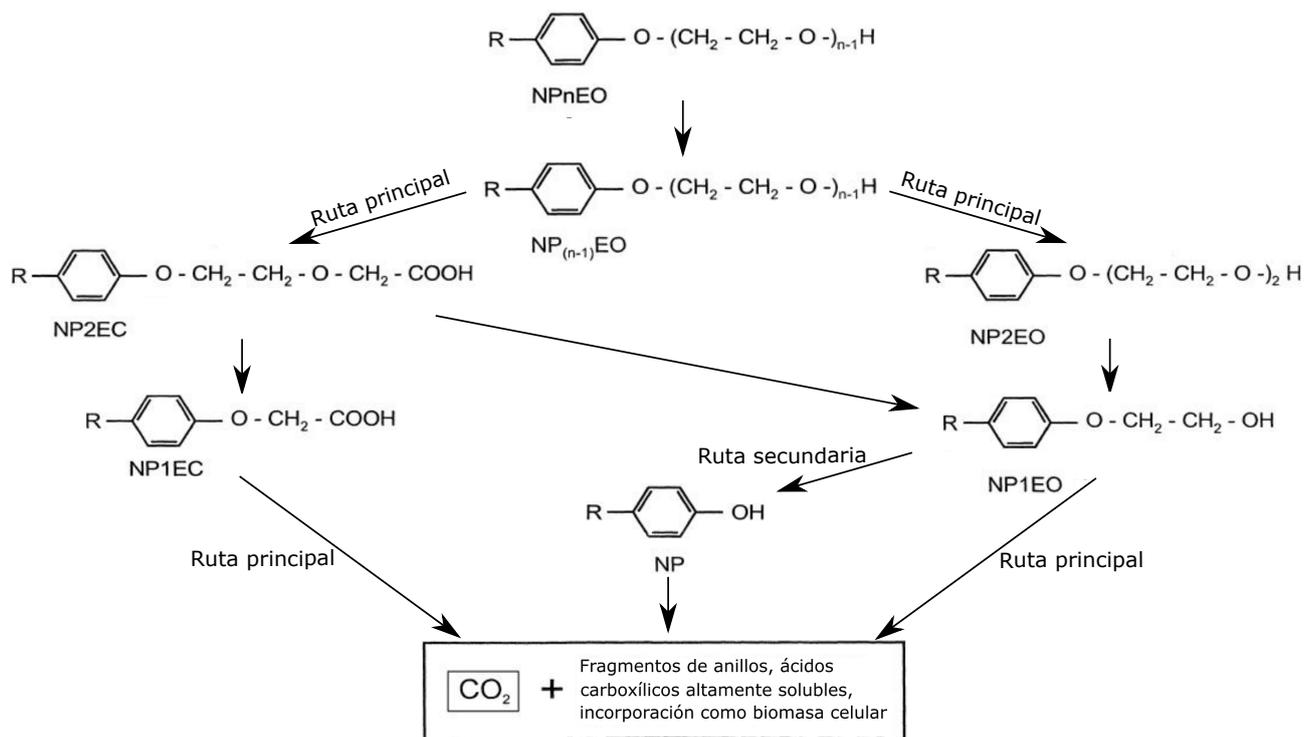


Figura 1.4: Vías de biodegradación aeróbica de los etoxilatos de nonilfenol. Adaptado de Zoller, 2004 [16]

1.3. Problemática

Considerando la importancia de la industria textil a nivel mundial y nacional descrita en la sección anterior, así como el impacto negativo que tiene sobre el medio ambiente el proceso de lavado en húmedo del algodón, se requieren propuestas de cambio. Es por esto, que esta investigación presenta una propuesta del mecanismo de detergencia específico para el algodón y su verificación experimental, con el fin de conocer las etapas con mayor impacto en el fenómeno. Al conocer las propiedades fisicoquímicas relevantes que un tensoactivo debe tener para realizar su función como detergente en algodón, se espera que en caso de necesitar un cambio de tensoactivo tóxico, la tarea de selección del anfifilo sustituto resulte más sencilla.

Uno de los retos que se encontraron al planear la investigación, fue la falta de una metodología experimental estandarizada para la medición de detergencia en textiles, ya que cada investigación utilizaba distintas pruebas. Por lo que se propone una metodología de evaluación de detergencia en textiles.

1.4. Antecedentes bibliográficos

Con el fin de conocer los trabajos previos que pudieran tener relación con esta investigación se utilizó el buscador “Scopus” y el 31 de agosto del 2021 se terminó la búsqueda sistemática con las palabras clave: “mechanism”, “detergency”, “fabric” y “cotton”. Los resultados obtenidos se enumeran a continuación, con una descripción del respectivo estudio:

1. Fujimoto et al. [18] proponen un modelo probabilístico con un estudio mecanístico del proceso de detergencia que no relaciona sus propiedades fisicoquímicas.
2. Tagaya et al. [19] realizan un estudio del mecanismo de eliminación ácido oleico en varios sustratos sin acción mecánica y con ligera acción mecánica. Investigaron la relación entre el valor de ácido oleico y la concentración de solución de dodecilsulfato de sodio (SDS). Utilizaron el método de cromatografía de papel, empleando la tela como fase estacionaria, y determinaron las concentraciones de ácido oleico para obtener el coeficiente de reparto (K) entre fibras y las micelas.
3. Chanwattanakit et al. [20] usan palmitato de metilo y evalúan su detergencia en algodón y poliéster a distintas temperaturas alrededor del punto de fusión del palmitato de metilo con varios tensoactivos.
4. Kissa, E. en 1971 [21] postula un mecanismo de liberación de suciedad de 3 pasos: remoción lenta, remoción rápida y retención constante; el autor realiza estudios sobre la cinética de liberación de suciedad líquida y mixta, cambiando condiciones como: cantidad de suciedad, temperatura, lavado, agitación y viscosidad.
5. Rojvoranun et al. en 2012 [22] se enfocan en las relaciones del potencial zeta, la adsorción del tensoactivo, el ángulo de contacto, la presión de dispersión sólido/líquido y la estabilidad de la dispersión en las soluciones de lavado en comparación con el rendimiento de detergencia y la antirredeposición en función de la concentración del tensoactivo y el nivel de pH utilizando caolinita y óxido férrico como suciedades en algodón y poliéster. Utilizaron tres tipos de tensoactivos, para las dos suciedades el SDS tuvo la mejor detergencia, seguido por el etoxilato de octilfenol (OP(EO)₁₀) y por último el bromuro de cetiltrimetilamonio (CTAB). Las fuerzas dominantes para la remoción de suciedad en ambas telas fueron: fuerzas electrostáticas para el SDS; fuerzas electrostáticas y efectos estéricos para el OP(EO)₁₀; y fuerzas electrostáticas y la reducción de la tensión interfacial sólido/líquido para el CTAB.

6. Rojvoranun et al. en 2011 [23] se enfocan en las relaciones del potencial zeta, la adsorción del tensoactivo, el ángulo de contacto y la presión de dispersión sólido/líquido en comparación con el rendimiento de detergencia y la antirredeposición en función de la concentración del tensoactivo y el nivel de pH utilizando negro de carbón como suciedad en algodón y poliéster. El mecanismo dominante de eliminación de suciedad para todos los tensoactivos y telas es la repulsión electrostática entre la tela y la suciedad. En los tensoactivos no iónicos los efectos estéricos debidos a la adsorción de los tensoactivos fueron importantes para la detergencia. Los tensoactivos aniónicos tuvieron mejores resultados que los no iónicos. Los tensoactivos catiónicos mostraron una deficiente detergencia, la cual, se dio por la reducción de la tensión interfacial sólido/líquido por la adsorción del tensoactivo.
7. Chi et al. en 2001 [24] estudian el envejecimiento de suciedades aceitosas a 40 °C en distintas telas.
8. Obendorf et al. [25] hacen un estudio de remoción de aceite de cerdo en mercerización y carboximetilación del algodón.
9. Chi et al. en 1998 [26] realizan una revisión de literatura sobre la remoción del envejecimiento de suciedades aceitosas sobre textiles.
10. Choe-Park et al. [27] hacen un estudio de la remoción de suciedades aceitosas envejecidas utilizando radiotrazadores, cromatografía capa fina y FT-IR en el transcurso del tiempo y temperatura. Proponen un mecanismo de transformación de las suciedades.
11. Miller et al. [28] realizan una revisión sobre la investigación sistemática del mecanismo de solubilización emulsificación sobre telas sintéticas y suciedades aceitosas. Los autores encuentran que la remoción de suciedad máxima ocurre cuando la suciedad se incorpora a una microemulsión o cristal líquido desarrollado durante el proceso de lavado en la interfaz entre la suciedad y el baño.
12. Carroll [29] hace una revisión bibliográfica de la detergencia donde considera y discute aspectos de la deposición y adhesión de suciedades particuladas y aceitosas a las telas considerando el movimiento que pueden tener estas durante el lavado; el cuál es dependiente de factores como al ángulo de contacto, las dimensiones y la geometría.
13. Schott et al. [30] realiza un análisis sobre el mecanismo de detergencia del algodón sin profundizar en su relación con las propiedades fisicoquímicas.

14. Murata et al. [31] realizan una propuesta de adición de celulosa alcalina para hidrólizar las regiones amorfas de la fibras para la eliminación de residuos de sebo que quedan en los espacios interiores de las fibras de algodón.
15. Kame et al. [32] estudian los efectos de varias enzimas en la detergencia a 20 °C.
16. Utermohlen et al. [33] realizan un estudio de la influencia de remoción de solidos con aglutinantes.
17. Kissa en 1975 [34] discute los mecanismos de detergencia desde el punto de vista cinético en suciedades aceitosas, proponiendo los siguientes tres pasos para la eliminación de suelo líquido hidrofóbico:
 - a) Periodo de inducción. La remoción de suciedad es lenta.
 - b) Periodo rápido de remoción de suciedad. La suciedad en el sustrato disminuye linealmente con el logaritmo creciente del tiempo de lavado.
 - c) Periodo final. La cantidad de suciedad retenida no disminuye significativamente
18. Kissa en 1978 [35] mide la remoción de suciedad en intervalos de tiempo, utiliza partículas sólidas (óxido de hierro) para determinar el orden cinético $n=1.1$ y el coeficiente de tasa de eliminación de suciedad (k) que disminuye al aumentar el tiempo de lavado, provocando una desviación de la cinética de primer orden.
19. Kissa en 1979 [36] utiliza regresiones lineales con las que propone la ecuacion 1.1 que describe la detergencia con perspectiva cinética considerando cuestiones físicas como: velocidad de rotación, cantidad de suciedad en contacto con la fibra y el tiempo de ensuciamiento.
$$c_w = k_r u (st_s)^{0.5} \quad (1.1)$$
Donde c_w es la cantidad de partículas de suciedad retenidas después de lavar, k_r es el coeficiente de retención, u es la velocidad de rotación (rpm) del dispositivo de ensuciamiento (acelerador), s es la cantidad de suciedad en contacto con la fibra, y t_s es el tiempo de ensuciamiento (min).
20. Kissa, E. en 1981 [37] discute la eliminación de suciedad de algodón de prensa de acuerdo a su mecanismo y cinética en suciedades aceitosas y particuladas, así como posibles soluciones.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Detergentes

Se le denomina detergente a aquellas sustancias que tienen la capacidad de remover la suciedad de un sustrato. Estas sustancias son tensoactivos y se encuentran disueltos en agua como tensoactivos libre o como agregados moleculares; estos últimos pueden ser micelas o cristales líquidos. El tipo de agregados moleculares dependerá de la concentración a la que se encuentren. La concentración de tensoactivo usado en la industria textil se encuentra entre el 0.05 % m/m y el 0.4 % m/m [38], por tanto, los agregados moleculares formados son micelas esféricas. Es en este intervalo de concentración que se sitúa el presente trabajo.

A parte de los tensoactivos en las formulaciones de detergentes, se suelen encontrar otros componentes que no tienen acción detergente cuando se usan por sí mismos, pero sirven para aumentar la acción del agente tensoactivo. Estos aditivos son: coadyuvantes, polímeros dispersantes, agentes alcalinos y auxiliares de lavado [39, 40, 41].

2.1.1. Tensoactivos

Una molécula tensoactiva es aquella que tiene la capacidad de adsorberse en algunas o en todas las interfaces de un sistema, siendo capaz de cambiar la tensión superficial de manera considerable a baja concentración.

Los anfífilos se componen de dos grupos estructurales, imagen 2.1. Un grupo es hidrofílico compuesto por un grupo muy polar o iónico que contienen heteroátomos como O, S, P o N presentes en grupos como forfatos, alcoholes, sulfatos, aminas, amidas, etc. Esta parte del tensoactivo es soluble en disolventes polares como el agua. El otro grupo estructural es hidrofóbico

que generalmente son cadenas de hidrocarburos haciéndolo soluble en disolventes apolares como aceites [42, 43].



Figura 2.1: Estructura de tensoactivo. Elaboración propia

Cuando estas moléculas de tensoactivos son añadidas a un disolvente polar como el agua existe una repulsión a la parte hidrofóbica del tensoactivo. Esto provoca que algunas moléculas de tensoactivos sean expulsadas a las interfases del sistema, cuyos grupos apolares se orientan fuera del baño (hacia el aire) para disminuir el contacto con el disolvente polar, es decir, se adsorben en la superficie. Este fenómeno provoca la disminución de la tensión interfacial del agua [42].

La capacidad de adsorción de los tensoactivos es descrita por la ecuación de la isoterma de adsorción de Gibbs, ecuación 2.1, que describe la relación entre la concentración de soluto en la superficie y la variación de la tensión superficial respecto a la composición de la fase volumétrica. Donde, Γ es la concentración de superficie, x es la fracción mol del del anfifilo, σ es la tensión superficial, T es la temperatura, P es presión y R es la constante de los gases.

$$\Gamma = -\frac{x}{RT} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial x} \right)_{T,P} \quad (2.1)$$

Debido a su capacidad de adsorción los tensoactivos presentan propiedades de humectación, emulsión, dispersión, formación de espuma, control de la formación de espuma, etcétera [44]. Y dependiendo de la naturaleza de su grupo hidrófilo se pueden clasificar en cuatro grupos: tensoactivos aniónicos, catiónicos, no iónicos y anfóteros.

Tensoactivos aniónicos

A la molécula que en disolución acuosa posee actividad superficial y su grupo hidrofílico se encuentra cargado negativamente se le denomina tensoactivo aniónico. Uno de los mayores usos que tienen estos tensoactivos es la detergencia. Para que esta propiedad ocurra de manera óptima, la cadena hidrofóbica tiene una longitud de cadena de 12 a 16 átomos de carbono. A pesar de utilizarse cadenas ramificadas, se prefieren cadenas lineales por tener mayor eficiencia

en la detergencia y degradación a las primeras. Algunos ejemplos de grupo hidrófilo que se encuentran son los carboxilatos (denominados jabones, RCOO^-), sulfatos (ROSO_3^-), sulfonatos (RSO_3^-) y fosfatos (RPO_4^{3-}) [44]. Algunos ejemplos de estos tensoactivos con actividad detergente se muestran en la imagen 2.2.

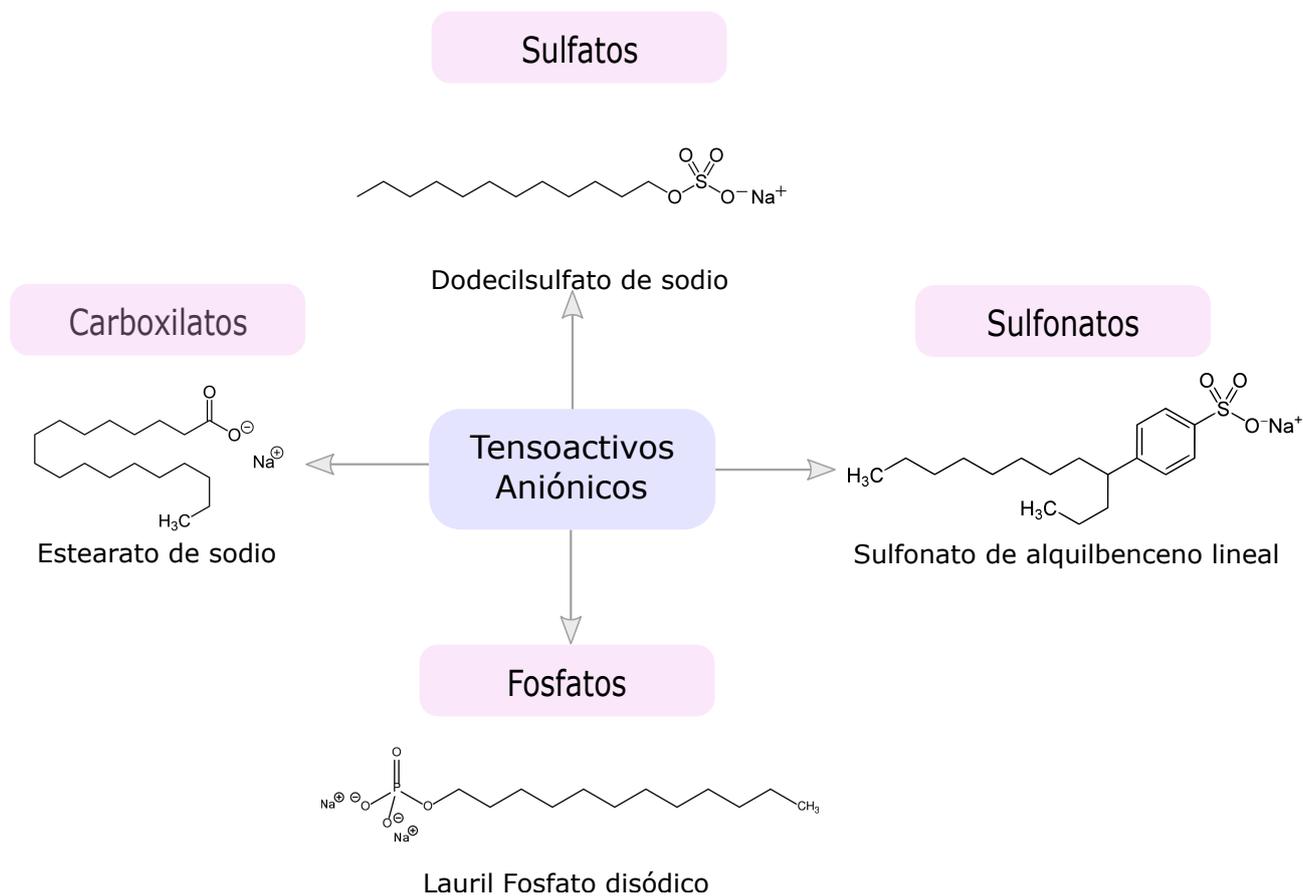


Figura 2.2: Tensoactivos aniónicos. Elaboración propia

El grupo hidrofílico de estos tensoactivos al poseer una carga negativa se encuentra susceptible a reaccionar con algunos componentes del baño, como lo son los iones calcio y magnesio que se encuentran en aguas duras y que poseen carga positiva.

Los tensoactivos de carga aniónica son los más producidos industrialmente, representan alrededor del 55 % de la producción anual de tensoactivos [43]. Esto se debe a su relativo bajo coste de fabricación y que se utilizan prácticamente en todas las formulaciones detergentes, particularmente utilizados por su eficiencia en remoción de suciedades aceitosas y arcillosas [44].

Uno de los tensoactivos aniónicos utilizados para la detergencia de textiles es el dodecilsulfato de sodio el cual se emplea en el presente estudio.

Dodecilsulfato de sodio. El dodecilsulfato de sodio (SDS, por sus siglas en inglés) o lauril sulfato de sodio (SLS) es una sal sódica cuyo ion en disolución tiene es un tensoactivo aniónico con propiedades detergentes y desnaturizante de proteínas. La molécula posee un hidrocarburo lineal de 12 carbonos como grupo hidrofóbico y un grupo sulfato con carga negativa como grupo hidrofílico, como se muestra en la imagen 2.3. Su fórmula química es $C_{12}H_{25}OSO_2ONa$ con masa molar de 288.38 g/mol. Físicamente es un sólido blanco con punto de fusión de 204 - 207 °C y con una solubilidad mayor a 130 g/L [45].

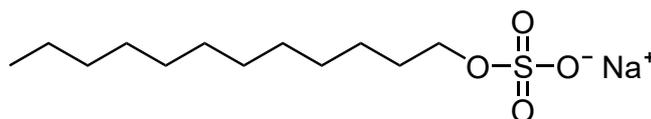


Figura 2.3: Estructura química del dodecilsulfato sódico

Sin embargo, en ocasiones los tensoactivos aniónicos llegan a ser demasiado hidrófilos para su uso por lo que se mezclan con tensoactivos no iónicos para obtener el comportamiento deseado [28].

Tensoactivos no iónicos

Los tensoactivos no iónicos son aquellos que en disolución acuosa poseen actividad superficial y su grupo hidrofílico no es ionizable. Esta última característica proporciona la ventaja que son insensibles a cationes presentes en aguas duras.

La parte polar de los tensoactivos no iónicos usualmente está compuesta por éteres cuya solubilidad en agua está relacionada al número de átomos de oxígenos que contenga. Por cada átomo de oxígeno se forma un hidrato con 2 a 3 moléculas de agua [46]. Su parte apolar puede solubilizar a moléculas oleosas. Esta cualidad hace capaces a este tipo de tensoactivos realizar una buena detergencia removiendo la suciedad por su propiedad de solubilizar y emulsionar aceites. Además, presentan buena compatibilidad con todas las clases de tensoactivos.

Sin embargo, a pesar de estas buenas propiedades detergentes e insensibilidad a la dureza del agua, se debe considerar su punto de enturbiamiento (PE). El PE es la temperatura a la que la disolución de tensoactivo no iónico se vuelve turbia o insoluble a una concentración de 1% masa/volumen. A temperaturas mayores al PE las micelas se juntan y forman una fase turbia con una alta concentración de detergente, mientras que el resto de la solución se agota en deter-

gente [47]. A mayor número de moléculas de óxido de etileno, mayor será el PE, es decir, cuanto más hidrófilo es el tensoactivo no iónico, mayor es el PE. Para evitar este problema se mezclan los no iónicos con tensoactivos aniónicos o la adición de un electrolito como sal común [11].

Los tensoactivos no iónicos más comunes son los basados en óxido de etileno, denominados tensoactivos etoxilados. En este grupo existen diversas clases: etoxilatos de alquilfenol, etoxilatos de éster de sorbitán, etoxilatos de ácidos grasos, etoxilatos de alcohol, etoxilatos de monoalcanolamida, etoxilatos de aminas grasas y copolímeros de óxido de etileno-óxido de propileno (denominados tensoactivos poliméricos). Entre los etoxilatos de alquilfenol se encuentran los tensoactivos denominados etoxilatos de nonilfenol que son altamente contaminantes, imagen 2.4. Existe también otra clase de tensoactivos no iónicos productos de los polihidroxi tales como ésteres de glicerol (y poliglicerol), ésteres de glicol, glucósidos (y poliglucósidos) y ésteres de sacarosa. Hay tensoactivos no iónicos con un grupo polar pequeño como los óxidos de amina y los tensoactivos de sulfonilo [44].

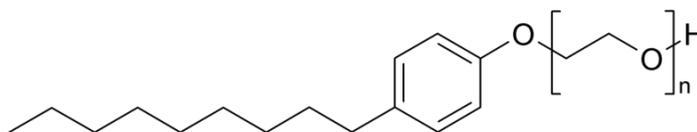
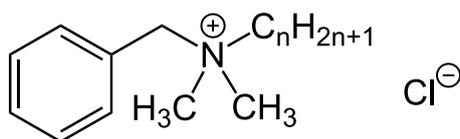


Figura 2.4: Estructura química de los etoxilatos de nonilfenol

Tensoactivos catiónicos

A la molécula que en disolución acuosa posee actividad superficial y su grupo hidrofílico se encuentra cargado positivamente se le denomina tensoactivo catiónico. Por su carga positiva no son adecuados para su uso como detergentes, ya que la mayoría de las superficies en disolución, como las telas de algodón, tienen carga negativa y los cationes se absorben sobre ellas en lugar de solubilizar la suciedad adherida. Es por esto que su uso en el proceso textil se encuentra principalmente como suavizantes, agentes niveladores, retardantes en tintura, repelentes de agua, inhibidores del crecimiento de bacterias y emulsionantes. Pero en ocasiones se utilizan también como lubricantes o antiestáticos al final del ciclo de fregado, en productos que se van a teñir pero no blanquear [11].

Los principales tensoactivos catiónicos son los compuestos de amonio cuaternario donde comúnmente su contra ion suele ser el anión cloruro. Un ejemplo de estos tensoactivos es el cloruro de benzalconio, imagen 2.5 [44].



$$n = 8, 10, 12, 14, 16, 18$$

Figura 2.5: Estructura química del cloruro de benzalconio

Tensoactivos anfóteros

Los tensoactivos anfóteros son moléculas con actividad superficial que dependiendo de las condiciones de pH medio donde se encuentren pueden presentar tanto cargas catiónicas, aniónicas o no iónicas en distintas partes de la molécula. En condiciones alcalinas las moléculas adquieren carga negativa comportándose como tensoactivos aniónico mientras que en condiciones ácidas adquiere carga positiva comportándose como tensoactivo catiónico. Si se encuentran en condiciones del punto isoeléctrico de la molécula, esta presentará carga en ambos grupos iónicos y se comportará similar a los tensoactivos no iónicos [44].

La actividad superficial y propiedades de los anfóteros varía dependiendo del cambio de carga del tensoactivo. Muestran mayor actividad superficial en el punto isoeléctrico. Presentan una excelente compatibilidad con otros tensoactivos. Son caros y algunos de ellos no son termoestables impidiendo usarse a temperaturas elevadas. Tienen propiedades como lubricación, inhibidores de la corrosión, humectantes, detergentes y formadores de espuma. Entre sus principales usos se encuentran el lavado y teñido de fibras proteicas para prevenir rozaduras, marcas de grietas y “patas de gallo” [44, 11].

Los tensoactivos anfóteros más habituales son las N-alkilbetaínas, que son derivados de la trimetilglicina, como lo es la laurilamidopropildimetilbetaína o también llamada cocamidopropil betaína, imagen 2.6 [44].

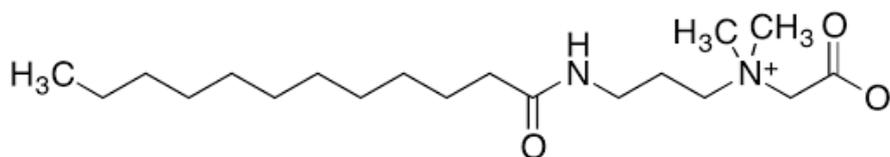


Figura 2.6: Estructura química de la cocamidopropil betaína

Micelas

Otra propiedad importante de los tensoactivos aparte de adsorberse en la interfase es la capacidad de formar agregados moleculares llamados micelas. La micelización ocurre como método subsecuente a la adsorción de los tensoactivos en las interfaces cuando se encuentra saturada por los mismos [42].

Una vez saturada la interfase y los tensoactivos se encuentren disueltos en el agua, existe una repulsión de las partes hidrofóbicas del tensoactivo por el disolvente provocando un aumento en la energía del sistema. Para disminuir esta repulsión los tensoactivos se orientan con la parte hidrofóbica en dirección a la parte hidrofóbica de otros tensoactivos y la parte hidrofílica hacia el seno de la disolución reduciendo así la energía del sistema [42]. Este acomodo provoca que comiencen a formarse agregados moleculares de tensoactivos, denominados micelas.

Cuando los tensoactivos se aglomeran pueden experimentar cierta pérdida de libertad al estar confinada a la micela y en el caso de los tensoactivos iónicos puede resultar en la repulsión de electrostática entre moléculas, aumentando la energía del sistema y oponiéndose a la micelización. Por lo que la formación de micelas es dependiente del equilibrio entre los factores las favorecen como las fuerzas que se oponen a ellas. Otro factor que afecta es cuando la repulsión del grupo hidrofóbico al agua es poca hay poca tendencia a la micelización. Esto ocurre cuando el grupo hidrofóbico del tensoactivo es corto [42].

Concentración micelar crítica. La concentración a la que comienzan a formarse las micelas se le llama concentración micelar crítica (CMC) [11]. Por debajo de la CMC se encontrará la forma monomérica del tensoactivo y conforme aumenta su concentración, la tensión interfacial disminuye drásticamente y aparece la acumulación de monómero en la disolución.

Las interacciones entre los tensoactivos se pueden dividir en cuatro zonas, imagen 2.7. En la región I el tensoactivo se encuentra libre y disperso, al aumentar la concentración los tensoactivos empiezan a interactuar formando hemimicelas y admicelas, región II y III respectivamente. Siguiendo con el aumento de la concentración de tensoactivo se comienzan a formar las micelas (CMC) y se sigue teniendo la presencia de los tensoactivos en forma de monómeros [48]. La existencia del tensoactivo como monómero es importante para la separación de la suciedad del sustrato [39].

La CMC es distinta para las diversas estructuras de los tensoactivos y varía con factores como la temperatura, el número de aglomeraciones y el número medio de moléculas por micela [11].

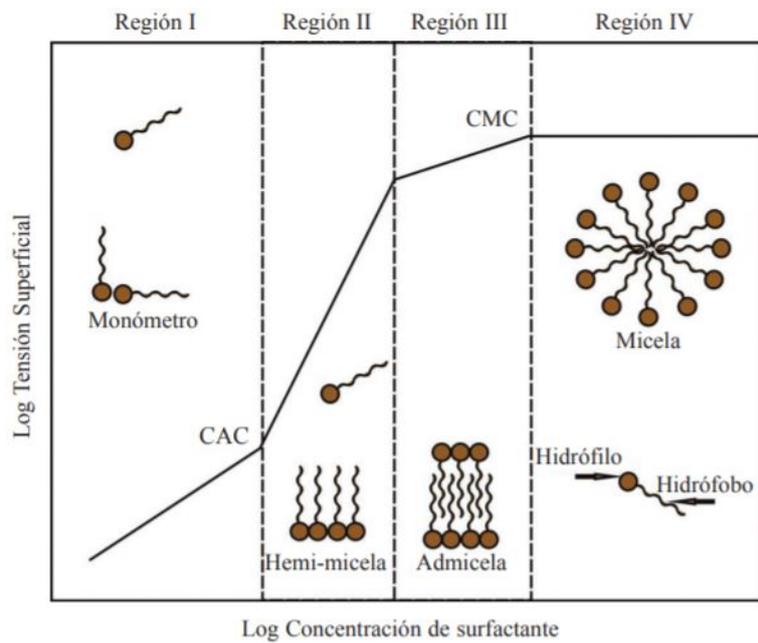


Figura 2.7: Isoterma de adsorción de tensoactivos con sus cuatro Regiones. Riojas et al., 2011 [49]

Una de las consideraciones más importantes para el lavado de textiles es la CMC del tensoactivo. Es por esto por lo que los tensoactivos en la industria textil generalmente se utilizan a una concentración por arriba de su CMC [40]. A la CMC la detergencia es máxima y la tensión interfacial mínima. Este comportamiento se muestra en la imagen 2.8 [11].

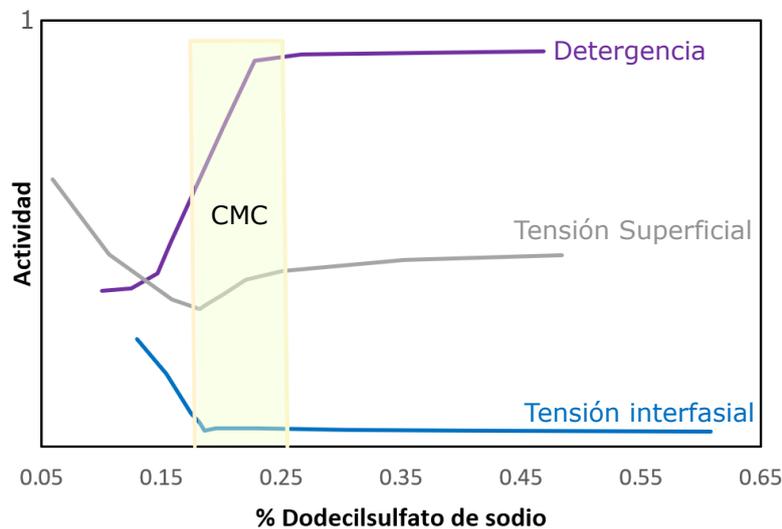


Figura 2.8: Curvas de propiedades físicas para el dodecilsulfato de sodio. Adaptado de Presto, 1948 [50]

Un tensoactivo ideal para su uso en detergencia debe de contar con características como disminuir la tensión superficial del agua, formar agregados moleculares, relación costo (bajo)-rendimiento (alto), compatibilidad, biodegradabilidad, solubilidad en agua fría y caliente, entre otros dependiendo del tipo de tensoactivo (aniónico y/o iónico) [39].

2.1.2. Aditivos del detergente

Las formulaciones utilizadas para la limpieza de textiles generalmente cuentan con otros aditivos que, aunque no tengan acción detergente, potencian la de los tensoactivos. Estos aditivos que se describirán a continuación son: coadyuvantes, polímeros dispersantes, agentes alcalinos y auxiliares de lavado en concentraciones menores [40, 41, 39].

Coadyuvantes

Los coadyuvantes, o “builders” en inglés, ayudan a mejorar o “construir” la eficacia de la detergencia del tensoactivo. Son aditivos en el baño de lavado que ayudan a la detergencia disminuyendo la dureza del agua. En su mayoría actúan eliminando los cationes de calcio y magnesio del baño mediante los procesos de precipitación, secuestro o intercambio iónico. Otra de sus funciones es la de amortiguador alcalino del baño [39, 44]. La eliminación se presenta al añadir sales como el carbonato de sodio y precipitar los iones como sales insolubles. O bien, añadir coadyuvantes cargados negativamente, como los polifosfatos, que rodean los iones positivos desactivándolos y secuestrándolos. El precipitado de la sal se puede depositar sobre la tela limpia, mientras que el secuestro de cationes permite aislarlos del medio para después eliminarlos; por lo que se prefiere el secuestro de iones [39, 44].

Los coadyuvantes tienen también la función de amortiguar el pH del baño al mantener alcalina la solución en caso de encontrar suciedades ácidas. De este modo, los tensoactivos susceptibles al pH puedan funcionar eficazmente [39].

Entre los coadyuvantes más habituales se encuentran las zeolitas en suspensión (eliminando la dureza cálcica por intercambio de iones) y las sales sódicas de aniones polivalentes (tripolifosfatos, boratos, pirofosfatos, citratos, carbonatos, silicatos, polímeros con grupos carboxílicos, sulfatos, etc.). El metasilicato de sodio ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) también actúa como detergente y amortiguador; ayudando a otros químicos a penetrar en la masa de lignina de los materiales de celulosa [51, 11]. Otro ejemplo es el tripolifosfato de sodio (STPP) que era el coadyuvante más popular debido a su capacidad para ablandar el agua y suspender la suciedad a través de la complejación, imagen 2.9. Sin embargo, en 1980 se prohibió por la Europa Occidental y los EE. UU. debido a la capacidad de este producto de producir el fenómeno de eutrofización [39].

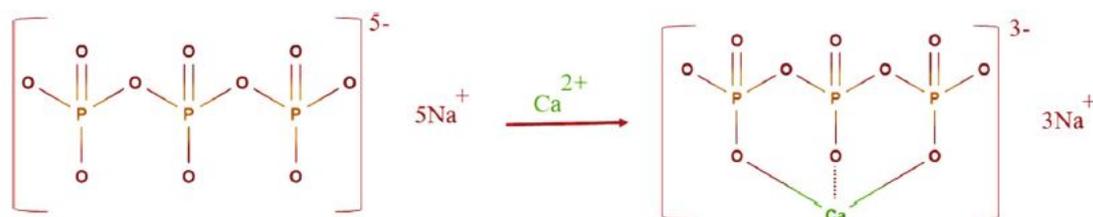


Figura 2.9: Unión del ión calcio por STTP mediante quelación. Koohsaryan, 2020 [39]

Al disminuir la dureza del agua y mantener el pH, los coadyuvantes permiten que los tensoactivos estén libres y activos para el proceso detergente. Pero en ocasiones un coadyuvante no es suficientemente eficaz, por lo que se añade un agente auxiliar que lo ayude y mejore su eficiencia. Este último generalmente es un polímero con alto contenido de grupos carboxílicos [39].

Polímeros dispersantes

Los dispersantes poliméricos o los agentes anti-redeposición son compuestos que ayudan a que las suciedades no se depositen sobre el sustrato. También contribuyen a controlar la alcalinidad, inhibiendo el crecimiento de cristales dispersando las sales inorgánicas y la suciedad [39].

Son generalmente grupos de polímeros aniónicos y no iónicos. Los polímeros aniónicos se adsorben en las suciedades y sustratos dando cargas negativas ayudando a la repulsión electrostática entre las partículas y la fibra. Los no iónicos se utilizan por su efecto estérico sobre la estabilidad de las dispersiones [11].

El polietilenglicol, el alcohol polivinílico y los copolímeros de bloque y de etoxi/propoxi aleatorios pertenecen a los no iónicos. Mientras que los iónicos incluyen dispersantes aniónicos/catiónicos como copolímeros de ácido maleico y acrílico y homopolímeros de ácido acrílico. Un ejemplo es la carboximetilcelulosa, imagen 2.10, que es el agente antirredeposición más popular; forma un coloide protector evitando que se vuelva a depositar sobre la tela [39, 11].

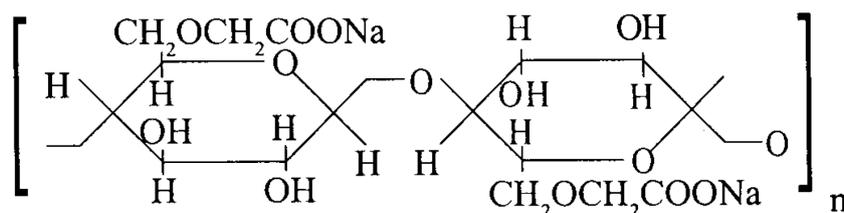


Figura 2.10: Estructura química de la carboximetilcelulosa.

Agentes alcalinos

Es muy importante la selección del álcali ya que pudiera ser perjudicial para algunas fibras como la lana y la seda que se disuelven en medios alcalinos o como el acetato y el triacetato que se regresan a su forma de celulosa. Por su parte el algodón absorbe álcalis. El álcali neutraliza el grupo carboxilo en celulosa y pectina. Los grupos hidroxilo de las unidades de glucosa en la celulosa que son débilmente ácidos también son neutralizados por el álcali. Debido a esta sorción preferencial, la concentración de álcali en la fibra aumenta y ataca las impurezas de manera más intensa. Algunos procesos de álcalis utilizados en el algodón son: hervor de sosa-lima, hervor de la sosa cáustica, hervor de ceniza de sosa, mezcla de soda caustica y ebullición de ceniza de sosa y ebullición de jabón/detergente-ceniza de sosa [11]. Los álcalis que se utilizan en estos procesos se describen a continuación:

El hervor de sosa-lima. Este proceso es largo y poco económico. El algodón se hierve con lechada de cal que convierte ácidos grasos en jabones de cal insolubles; que a su vez por acidificación se convierte en depósitos de ácidos libres. El calcio se elimina en forma de cloruro de calcio. Posteriormente los ácidos libres se hierven con carbonato de sodio y se convierten en jabones solubles [11].

El hervor de la sosa cáustica. El algodón se hierve con hidróxido de sodio con una relación de licor de 3: 1. Esta tela únicamente se degrada cuando se hierve con concentraciones superiores a 20 g/L en ausencia de aire [11].

El hervor de ceniza de sosa. El álcali utilizado depende de la calidad del algodón. Para hilos coloreados en la tela se utiliza carbonato de sodio por su pH bajo. Si los hilos se teñirán de colores oscuros se usa en presencia de agente humectante carbonato de sodio al 1-2 % durante 30 minutos [11].

Mezcla de soda caustica y ebullición de ceniza de sosa. Se utiliza una combinación de sosa cáustica y carbonato de sodio 2:1 a ebullición. La ceniza de sosa interactúa con las sales de calcio y magnesio de aguas duras. Aumenta el hinchamiento de la fibra liberando las impurezas y neutralizando los ácidos grasos [11].

La ebullición de jabón/detergente-ceniza de sosa. Para tejidos de algodón más delicados y de color se utiliza álcali con acción más suave y lenta por la adición de detergentes. Se

utilizan tensoactivos aniónicos como los alquil sulfatos de sodio y alquil sulfonatos aromáticos y no iónicos como los compuestos polietoxilados [11].

Al final de todos estos procedimientos se trata el tejido con una solución ácida para neutralizar cualquier álcali retenido por el tejido.

Auxiliares de lavado en concentraciones menores

Otros aditivos que se adicionan para mejorar la calidad, comerciabilidad o especializar el lavado y que se utilizan por lo general en cantidades menores al 1% son: abrillantadores ópticos, enzimas, bacteriostáticos, inhibidores de corrosión, colorantes, fragancias, reguladores de espuma, reguladores de pH, suavizantes, blanqueadores y auxiliares de procesamiento.

Agentes blanqueadores. Estos agentes proporcionan una acción blanqueadora removiendo las suciedades oxidándolas. Los blanqueadores contienen peróxido de hidrógeno, que proporciona el agente oxidante directamente que reacciona con la suciedad para decolorarlos o romperlos. Al romper las moléculas en partes diminutas se absorben por los tensoactivos y se desechan en posteriores etapas de lavado [39]. Los blanqueadores son compuestos peroxigenados inorgánicos, como el perborato de sodio tetrahidratado y el percarbonato de sodio. Cuando se disuelven, se convierten en peróxido de hidrógeno, que actúa como agente oxidante y el residuo del compuesto. El peróxido de hidrógeno proporciona una acción blanqueadora más suave que el hipoclorito de sodio utilizado en los blanqueadores con cloro [39, 44].

Abrillantadores ópticos. Los abrillantadores ópticos son tintes fluorescentes que brillan en blanco azulado con luz ultravioleta haciendo que parezcan blancas las telas amarillas mejorando su aspecto antes de salir a los mercados. Son compuestos fluorescentes que absorben radiación ultravioleta (entre 350 y 375 nm) y transmiten luz visible; mejorando así el brillo y la blancura de las fibras [39, 44].

Enzimas. El uso de enzimas en la formulación detergente ayuda a descomponer suciedades complejas, acortar tiempos de lavado, disminuir temperaturas. Estas acciones impactan en un menor consumo de agua y ahorro de energía. Por ejemplo, las lipasas hidrolizan los triglicéridos que se encuentran presentes en suciedades oleosas, como la trioleína. Otra enzima utilizada es la proteasa acelera la degradación de proteínas [39, 44].

Inhibidores de corrosión. La adición de este componente ayuda a proteger los componentes de la lavadora ante la corrosión. Usualmente se utiliza silicato de sodio [44].

Suavizantes de telas. Controlan la electricidad estática de la tela e imparten suavidad [52].

Bacteriostáticos. Los bacteriostáticos se añaden para evitar el crecimiento bacteriano cuando no se pueden eliminar por altas temperaturas. Entre sus características debe tener actividad antibacteriana de amplio espectro, estabilidad química, adaptabilidad al olor y color de los productos terminados, economía satisfactoria, seguridad y suavidad para el uso y no reactividad con otros componentes de la formulación. Un ejemplo de un bacteriostático famoso es el hexaclorofeno [39].

Colorantes. Los colorantes se agregan para dramatizar un aditivo o individualizar el producto. El uso de colorantes azules puede impartir un color azulado/blanco que beneficia el aspecto de las telas blancas [44].

Fragancias. Las fragancias son utilizadas para cubrir el olor químico del detergente y el olor de la suciedad en el lavado. Además, el percibir un aroma agradable, refuerza la idea de limpieza [44].

Auxiliares de procesamiento. Los auxiliares de procesamiento suministran a la formulación las propiedades físicas necesarias para el uso previsto. Se utilizan numerosos ingredientes como por ejemplo sulfato de sodio, agua, alcohol o hidrótropos como el sulfonato de xileno. El primero proporciona polvos crujientes y fluidos. En productos líquidos los alcoholes se utilizan como disolventes para algunos ingredientes de la formulación, evitan la separación del producto, ajustan la viscosidad y brindan protección a la formulación en condiciones extremadamente frías de almacenamiento al reducir el punto de congelación [44]. La incorporación de agentes hidrótropos ayudan al manejo de la viscosidad, del punto de enturbiamiento y la estabilidad de las formulaciones líquidas concentradas, mejorando la solubilidad de los tensoactivos y regulando la tendencia a la gelificación [53].

Reguladores de pH. Para aumentar la basicidad del medio se suelen agregar aminas como las alquilaminas que son agentes neutralizantes para ácidos grasos y ácidos alquibencenosulfónicos [39].

Reguladores de espuma Los reguladores de espuma se emplean como estabilizadores o supresores de la espuma. Los tensoactivos que se suelen utilizar para controlar la formación de espuma son aquellos de cadena larga como el etoxilato de alquilo [39, 44].

2.2. Detergencia

La detergencia es el proceso por el cual un líquido, que se le denomina baño, desprende de una superficie sólida, llamada sustrato, cualquier material indeseable, suciedad, por medio de llevarlos a un estado de solución o dispersión. Este resultado se obtiene por la acción de varios fenómenos fisicoquímicos [54, 39].

2.2.1. Determinación del poder deterativo

La eficiencia del proceso está influenciada por factores como lo son la naturaleza de los tres elementos esenciales de la detergencia: sustrato, suciedad y baño. Pero también impactan las condiciones en las que se realiza el lavado y la interacción que existe entre todos los factores. Algunas consideraciones que impactan dentro de la detergencia de cada elemento se muestran en la imagen 2.11 [39, 40].

Factores que impactan en la eficiencia de la detergencia

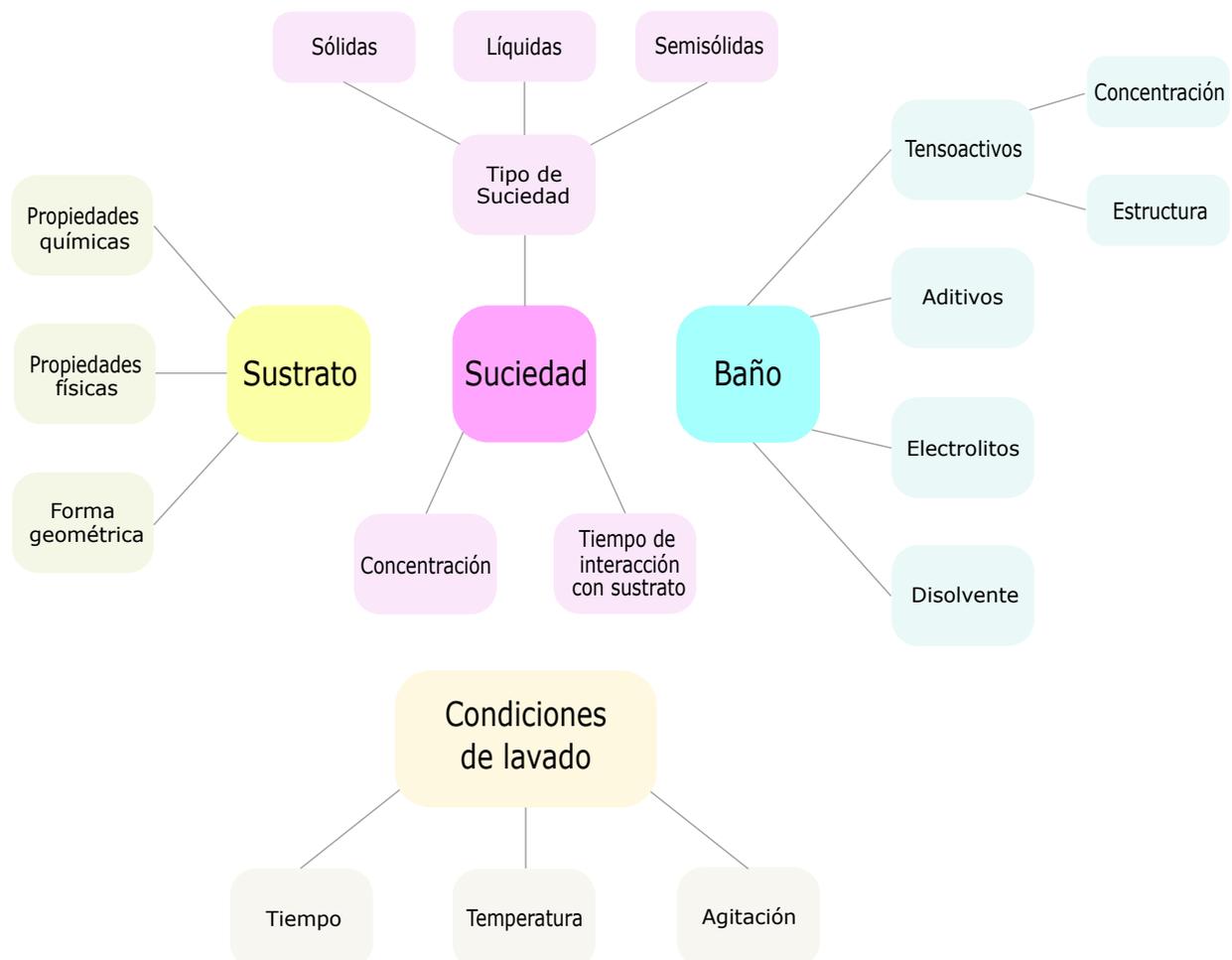


Figura 2.11: Factores que impactan en la eficiencia de la detergencia. Elaboración propia

Sustrato

Al material sólido que se limpia en un proceso detergente se le denomina “sustrato” [40]. En la presente investigación este sustrato es la tela de algodón debido a:

1. Su importancia dentro de la economía
2. El impacto que tiene su proceso de limpieza en el medio ambiente
3. Es representante de las fibras naturales hidrofílicas [55].

La fibra es la unidad estructural básica de la tela. Es importante conocer las propiedades de la estructura tanto químicas, físicas o geométricas debido a que pueden influir sobre el proceso detergente al hincharse, ser permeables o relativamente reactivas [40].

Configuración o forma geométrica. La configuración geométrica de la superficie de las fibras puede provocar que la suciedad se retenga pese a las fuerzas mecánicas o fisicoquímicas durante el lavado.

Propiedades físicas y químicas El algodón contiene fibras hidrófilas con morfología superficial enrevesada y con un área de microsuperficie mayor que las fibras sintéticas o a comparación de aquellas que han sido hiladas [56], como se muestra en la imagen 2.12a. El principal componente de esta fibra es el biopolímero celulosa, la cual tiene grupos hidroxilos, como se muestra en la imagen 2.12b, proporcionando al algodón propiedades hidrofílicas. Si bien este es el principal componente del algodón (88 – 96 % m/m), en la fibra podemos encontrar otras estructuras. En la tabla 2.1 se muestra los porcentajes en peso de los constituyentes la fibra de algodón y los compuestos químicos que se encuentran presentes tanto de la fibra que se necesita de algodón como de algunas suciedades que se adhieren en el proceso, como los lubricantes y aceites de tejer. Los porcentajes de los componentes que se suelen encontrar en la fibra varían de acuerdo con diversos factores como: la madurez de la fibra, la geología de la zona de cultivo, la constitución del suelo, las condiciones climáticas durante el periodo de maduración, la técnica de cultivo, el tratamiento del algodón crudo, etcétera [11].

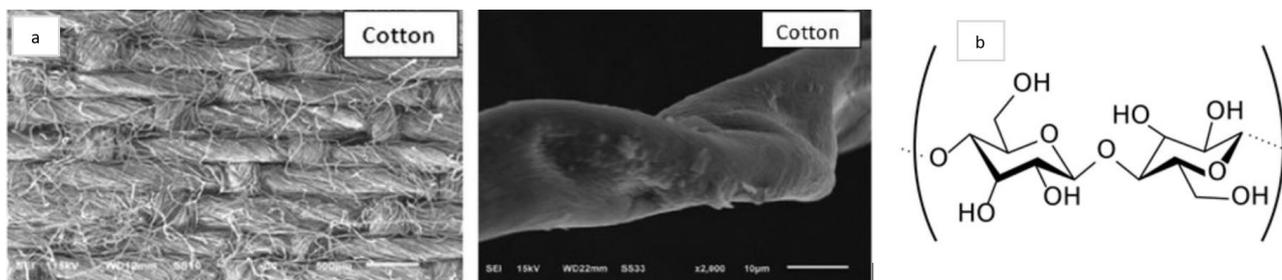


Figura 2.12: a) Imágenes SEM de tejidos de algodón (izquierda) con un aumento de 30× y estructura de una sola hebra (derecha) con un aumento de 2000×. Saini, 2016 [56] b) Estructura química de la celulosa

Tabla 2.1: Proporción de composición en toda la fibra de algodón. Elaborada con datos de Karmakar, 1999 [11]

Constituyentes	Porcentaje en peso	Componentes
Celulosa	88 – 96	α -Celulosa
Proteínas	1.1 – 1.9	Leucina, valina, prolina, alanina, oxiproteína, treonina, ácido glutámico, glicina, serina, ácido aspártico, aspergina, lisina y arginina.
Ceras	0.4 – 1.0	Mezclas de alcoholes grasos, ácidos grasos y ésteres de estos carbohidratos. Éster de cera, fitosteroles, politerpenos, hidrocarburos, alcoholes libres de cera, saponificable, no saponificable, inerte.
Sales inorgánicas	0.7 – 1.2	Cationes (K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} , Mn^{2+} , Cu^{2+} , etc.) y aniones (Cl^- , CO^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , etc.).
Pectinas	0.7 – 1.2	Ácido poli-D-galacturónico en forma de sales insolubles de Calcio, Magnesio y Hierro.
Lubricantes/Aceites de tejer	-	Aceites para máquinas, alquitranes, grasas, etc. En su mayoría ésteres, generalmente en forma de triglicéridos.
Otros	0.5 – 8.0	Resinas, pigmentos, hemicelulosas (arabane, xileno, galactano, manano, galactomanano, arabinomanano, monosacáridos, disacáridos y digosacárido), azúcares reductores (hexosas, pentosas, glucosa libre, etc.), ácidos orgánicos y sustancia leñosa incrustada.

Suciedad

Se denomina “suciedad” al material indeseado que se encuentra inicialmente adherido al sustrato y que se desea remover en el proceso detergente. La influencia de la suciedad en la eficiencia del proceso detergente dependerá de la fuerza de interacción Sustrato-Suciedad que se forme por factores como el tipo de suciedad, la concentración y el tiempo que se encuentre en contacto con el sustrato [41]. La suciedad puede ser inerte o reactiva al entrar en contacto con el baño. Esta puede constar de uno o más tipos de fases como las que se muestran a continuación:

- Suciedades aceitosas como las grasas líquidas de aceites vegetales e hidrocarburos líquidos

como lo son los lubricantes utilizados durante el proceso textil.

- Suciedad grasas mezclados con materia orgánica sólida o semisólidas.
- Suciedades particuladas, orgánicas o inorgánicas que pueden ser de varios tamaños y su comportamiento depende del tamaño de las partículas. Algunos ejemplos son el hollín y los minerales arcillosos entre otros [41].
- Suciedades gomosas o plásticas dependerán de sus fuerzas interfaciales en las condiciones y dentro de los límites de tiempo del proceso de lavado, si son fácilmente deformables pueden considerarse líquidas. De no ser así, se deben considerarse sólidos [40].
- Manchas. Se les llama manchas a las suciedades que son fácilmente desprendibles, por medios como la oxidación o al ser solubles en medios acuosos como algunos colorantes [41].

Las fibras de algodón maduras contienen impurezas que van del 4 al 12% en peso entre las que se encuentran grasas y ceras; pectinas y sustancias afines; minerales y metales pesados; aminoácidos o proteínas; y lubricantes y aceites de tejer. En la tabla 2.2 se describe el método de remoción de impurezas que se suele utilizar para la limpieza en la fabricación la tela. En las impurezas de grasas y ceras; y lubricantes y aceites de tejer se utilizan tensoactivos como detergentes, sobre todo en el caso de grasas y ceras. En ambos casos donde se utilizan los tensoactivos son suciedades hidrofóbicas. Es por este motivo, que en el presente estudio se enfoca en suciedades oleosas [11].

Tabla 2.2: Métodos de remoción de impurezas del algodón. Traducido de Karmakar, 1999 [11]

Impurezas	Método de remoción
Grasas y ceras	Los niveles se reducen a límites aceptables por la acción de álcalis y productos tensoactivos, en casos extremos puede ser necesario el uso de mezclas de solventes y tensoactivos
Pectinas y sustancias afines	Solubilizado por la acción de un álcali, generalmente sosa cáustica, que también actúa como agente de hinchamiento para facilitar su eliminación
Minerales y metales pesados	(a) Produciendo sales más solubles, ej. desmineralización ácida (b) mediante el uso de agentes secuestrantes
Aminoácidos o proteínas	Solubilizado produciendo la sal de sodio correspondiente
Lubricantes y aceites de tejer	La formulación moderna de aceite mineral generalmente contiene su propio sistema de auto emulsificación

La suciedad artificial utilizada para esta investigación consta de una fase líquida insoluble en agua “ácido oleico” y un tinte lipofílico “rojo Nilo” para poder observar y medir la detergencia por medio de la blancura. Las características de estos materiales se describen a continuación.

Ácido Oleico. El ácido oleico es un líquido aceitoso incoloro a amarillo pálido con un olor suave a manteca de cerdo. Es un ácido carboxílico de cadena larga, figura 2.13. Su fórmula molecular es $C_{18}H_{34}O_2$ con un peso molecular de 282.5 g/mol. Tiene una densidad de 0.895 g/ml a 25 °C. Contiene un doble enlace entre carbono C9 y C10 con la configuración cis. Es insoluble en agua, pero soluble en etanol [57].

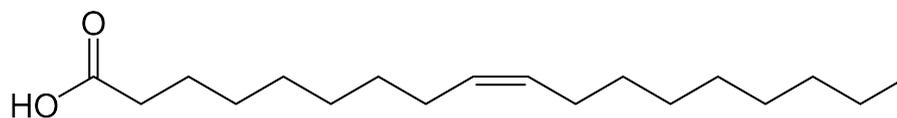


Figura 2.13: Estructura química del ácido oleico

Rojo Nilo. El rojo Nilo es un tinte lipofílico que suele utilizarse como fluorocromo y colorante histológico. Es un compuesto orgánico heterotetracíclico sustituido en la posición 9 por un grupo dietilamino. Este compuesto orgánico heterotetracíclico es una cetona cíclica, una amina aromática y un compuesto amino terciario, figura 2.14. Su fórmula molecular es $C_{20}H_{18}N_2O_2$ con un peso molecular de 318.4 g/mol.

El rojo Nilo es solvocrómico, es decir, su emisión y longitud de onda de excitación cambia en función de la polaridad del medio que rodee a la molécula. En medios polares raramente emitirá fluorescencia, aunque cuando el medio es rico en lípidos puede ser intensamente fluorescente con colores desde rojo hasta amarillo [58, 59].

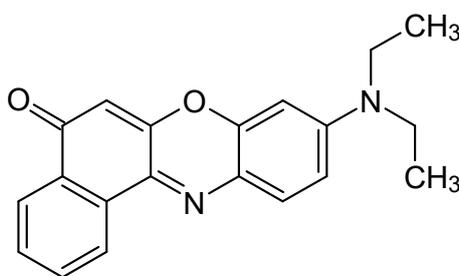


Figura 2.14: Estructura química del Rojo Nilo

Baño

Se le denomina “Baño” a la disolución donde se realiza el proceso detergente y a donde se añade el sustrato sucio. El disolvente puede ser acuoso o no acuoso o incluso ser formado por varias fases, pero debido al impacto ambiental del proceso en húmedo del algodón, en esta investigación solo se considerará el baño acuoso. Los solutos que se encuentran en esta disolución pueden ser muy variados. Algunos de estos solutos son detergentes (tensoactivos), coadyuvantes,

polímeros dispersantes, agentes alcalinos y auxiliares de lavado en concentraciones menores [39, 41, 40]. En la sección 2.1.2 se describen estos solutos. Pero también existen componentes indeseados que afectan negativamente a la detergencia como las sales de calcio y magnesio.

Dureza del agua. El agua dura es aquella que tiene minerales disueltos. Los principales iones responsables de la dureza del agua son los iones calcio, Ca^{2+} , y magnesio, Mg^{2+} . Si el resultado de la interacción de los iones con los tensoactivos, la suciedad o la tela. Si el resultado de la interacción de los iones con la suciedad o a la tela es la disminución de los potenciales eléctricos negativos, se favorece la formación de un complejo Suciedad-Sustrato; entonces la remoción de la suciedad disminuye y aumenta la redeposición. La interacción de los iones cationicos con los tensoactivos aniónicos puede propiciar la precipitación de estos últimos, disminuyendo la capacidad de limpieza.

La detergencia presenta una disminución significativa a concentraciones superiores a 150 partes por millón (ppm) de CaCO_3 . Es por esto por lo que se suelen añadir aditivos como zeolita o STPP que atrapan iones catiónicos [28, 39, 51].

Condiciones de lavado

Además de los elementos esenciales de la detergencia (sustrato, suciedad y baño), hay otras consideraciones físicas y mecánicas en el sistema que también afectan a la eficiencia del poder detergente. Entre las más importantes se encuentran la temperatura, la agitación y la duración del proceso.

Temperatura. La temperatura puede afectar a los tres elementos esenciales del sistema detergente y proporciona energía térmica para la remoción de suciedad [28]. Las fibras son más rápidamente penetradas e hinchadas por agua tibia que por agua fría, esto ayuda a la liberación más rápida de la suciedad [60]. Las suciedades pueden cambiar sus propiedades físicas como lo es la viscosidad. En el baño, los tensoactivos también se ven afectados por la temperatura, siendo así que algunos de ellos podrían incluso llegar a precipitar si disminuye por debajo de su punto de Krafft [28] en tensoactivos iónicos o si la temperatura se encuentra por arriba de la temperatura de enturbiamiento (punto de nube, “cloud point”) en tensoactivos no iónicos [61].

Agitación. La agitación es útil en la capa límite del sustrato ayudando a la transferencia de masa [28]. La manera en que se producirán las corrientes hidráulicas también afecta, ya que se debe cuidar de no ser muy vigorosa que dañe al textil. Entre los beneficios de la agitación se

encuentra: proporcionar energía mecánica, mantener homogénea la disolución, desflocular (si se llega a dar el caso), evitar la sedimentación de la suciedad y alejarla del sustrato [41].

Tiempo. La duración del proceso permite la interacción de todos los factores involucrados. Si los tiempos son muy prolongados algunos tensoactivos aniónicos con grupo esterres pueden llegar a hidrolizarse con el tiempo. O bien, puede verse afectada la apariencia de la tela por la acción de algunos componentes del baño. En cambio, si los tiempos son muy cortos, puede que no se realice una eficiente separación de la suciedad del sustrato. El tiempo ideal del proceso de lavado dependerá de los factores que lo integren, figura 2.11.

En la imagen 2.15 se presentan la detergencia en el transcurso del tiempo. En una primera etapa comienza la adsorción del detergente sobre el sustrato y la suciedad hasta alcanzar un punto máximo. A partir de este punto, la adsorción comienza a disminuir y la detergencia inicia. Al transcurrir el tiempo la velocidad de detergencia disminuye hasta alcanzar un máximo de eficiencia deterativa donde se mantiene constante. Por otro lado, la redeposición también aumenta con el tiempo y alcanza igualmente un máximo estacionario después de que la eficiencia deterativa lo hace [41].

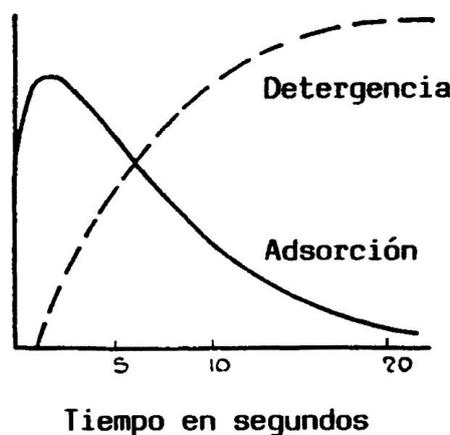


Figura 2.15: Detergencia y adsorción de tensoactivos durante el transcurso del tiempo. Gómez, 1996 [41]

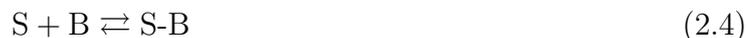
2.2.2. Mecanismos de detergencia

La variabilidad de mecanismos de detergencia que existen se debe a las diferentes características e interacciones que pueden existir entre los distintos tipos de sustrato, de suciedad, baño y condiciones de lavado. Varios autores describen a la detergencia con una expresión general, ecuación 2.2, que desglosan en dos procesos sucesivos alternos, ecuación 2.3 y 2.4, donde, D es suciedad, S sustrato y B baño [40, 41].

Ecuación general de la detergencia:



Procesos sucesivos alternos:



La ecuación 2.2 se expresa con flechas de equilibrio porque es así como se espera que sea la pseudo reacción detergencia. La flecha hacia el lado derecho expresa la actividad detergencia y el lado izquierdo la redeposición. Aunque esta última puede expresarse como inversa a la detergencia, no siempre es así. La redeposición es el efecto de que una suciedad que ya había sido despreñada del sustrato vuelve a depositarse. Sin embargo, cuando se desprende la suciedad puede cambiar de composición, por ejemplo, oxidarse. La competencia entre las pseudo reacciones directas y opuestas determina la eficiencia del proceso. El proceso depende de que en los procesos sucesivos alternos se obtengan complejos estables como la suspensión de la suciedad en el baño, ecuación 2.3. En el proceso existen efectos competitivos como la interacción de sales de calcio y magnesio con los tensoactivos, la suciedad o la tela; haciendo que el curso de la reacción se vea afectada. Es decir, la reacción se verá influenciada por las condiciones de reacción y la naturaleza de las sustancias que reaccionan [40, 41].

Inicialmente la suciedad se encuentra adherida al sustrato (S-D) donde los tipos de interacción que pueden ocurrir dependen de la naturaleza de ambos componentes. Estas fuerzas deberán debilitarse durante el proceso detergencia. Las interacciones pueden ser: [40]

- Fuerzas de atracción intermolecular de van der Waals. Tienen mayor importancia en suciedades líquidas.
- Fuerzas coulombicas o electrostáticas. Predominantes en suciedades sólidas.
- Fuerzas mecánicas de yuxtaposición. Tienen mayor importancia en suciedades sólidas gruesas donde será fácil removerlas con agitación mecánica.

A continuación, se describen los mecanismos de remoción de suciedad limitándose únicamente a suciedades líquidas oleosas, que son las de interés para esta investigación. Los fenómenos que ocurren en el proceso detergencia dependiendo de las interacciones y condiciones que se tengan son: humectación, enrollamiento, solubilización, emulsificación y microemulsión bicontinua [39, 40, 41].

Humectación

Inicialmente la suciedad oleosa se encuentra humedeciendo al sustrato con un ángulo de contacto que dependerá de la interacción de las fuerzas interfaciales de los componentes en un ambiente de aire (A). Donde las fuerzas que intervienen son: tensión interfacial entre el sustrato (S) y suciedad (D), γ_{SD} ; tensión interfacial entre sustrato y aire, γ_{SA} ; y tensión interfacial entre aire y suciedad, γ_{DA} , como se muestra en la imagen 2.16.

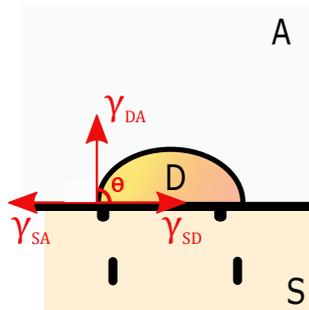


Figura 2.16: Ángulo de contacto de una gota de aceite (D) en un sustrato (S) en una atmósfera de aire (A). Elaboración propia

La relación entre la fuerza interfacial y el ángulo de contacto, es descrito por la ecuación de Young, ecuación 2.5.

$$\cos\theta = \frac{\gamma_{AS} - \gamma_{DS}}{\gamma_{DA}} \quad (2.5)$$

Cuando el pseudo complejo S-D se sumerge en el baño, el tensoactivo se presenta en la interfase del textil y la suciedad. Si bien en la expresión de Young, ecuación 2.6, únicamente cambia la expresión de A (aire) por B (baño), cambian las fuerzas interfaciales. La tensión interfacial entre el sustrato y la suciedad (γ_{SD}) aumenta o si los tensoactivos son muy poco solubles en la fase orgánica esta tensión no se ve afectada. Por otro lado, las tensiones entre la suciedad y el baño (γ_{DB}) y entre el sustrato y el baño (γ_{SB}) disminuyen debido a que el tensoactivo se adsorbe en estas interfases. Este cambio de tensiones tiene como consecuencia que θ aumente provocando una interacción preferencial del sustrato por el baño (γ_{BS}), es decir, la mojabilidad del baño aumenta provocando que haya un remplazo de la interfase S-D por S-B [39, 40, 62].

$$\cos\theta = \frac{\gamma_{BS} - \gamma_{DS}}{\gamma_{DB}} \quad (2.6)$$

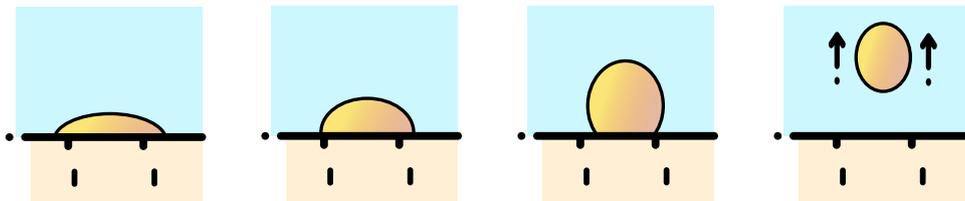
Dependiendo del cambio de ángulo de contacto entre las fuerzas interfaciales de las fases sustrato, suciedad y baño será el ángulo de humectación que se obtenga y el fenómeno que ocurra, estos se describe en la tabla 2.3 [63].

Tabla 2.3: Desplazamiento de la suciedad oleosa de acuerdo a los ángulos de contacto

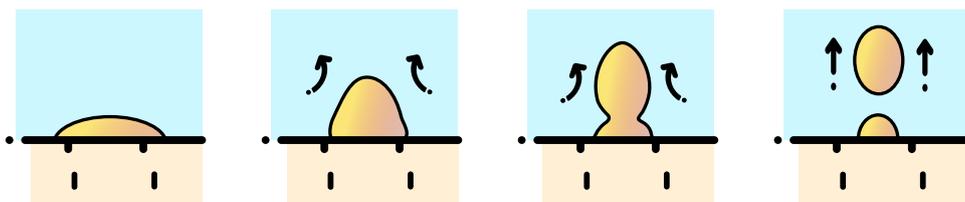
θ	Suciedad
180°	Se desplaza de la fibra
$180^\circ > \theta > 90^\circ$	No se desplaza espontáneamente, pero se puede remover por fuerzas hidráulicas
$\theta < 90^\circ$	Quedarán remanentes en la fibra

Enrollamiento

En este mecanismo las tensiones superficiales son clave para el proceso. Al aplicar agitación mecánica el ángulo de contacto entre la suciedad (D) y el sustrato (S) aumenta a valores cercanos a 180° , haciendo que la suciedad se enrolle en forma de gota separándose de la superficie, como se muestra en la imagen 2.17 [63]. Para que este mecanismo suceda la suciedad no se debe encontrar en forma de película sobre el sustrato y el ángulo de contacto debe ser mayor a 90° .

Figura 2.17: Mecanismo Rolling up. Ángulo de contacto mayor a 90° . Elaboración propia

Por otro lado, cuando el ángulo de contacto es menor a 90° ocurre un fenómeno llamado “necking”. En este efecto la reducción de la tensión superficial entre el sustrato y baño no es suficiente y únicamente ocurre un alargamiento de la suciedad oleosa formando una gota con un “cuello” debido a las corrientes hidrodinámicas que arrastran la gota de manera perpendicular sin cambiar el ángulo de contacto. El “cuello” se rompe por el proceso de arrastre y se separa la gota del sustrato. Esta última deja remanentes en el sustrato, necesitando de otros mecanismos para una óptima detergencia [63].

Figura 2.18: “Necking”. Ángulo de contacto menor a 90° . Elaboración propia

Solubilización

Pese a que la suciedad es aceitosa e insoluble en agua, puede ser susceptible de solubilización parcial en el baño si este último contiene un agente tensoactivo libre y formando micelas; el tensoactivo libre abate la tensión superficial y las micelas solubilizan a la suciedad en centro hidrofóbico. En este mecanismo es clave la presencia de micelas, por tanto, la concentración de tensoactivo debe ser superior a la concentración micelar crítica (CMC). El proceso de solubilización se puede describir en cinco pasos que se explican a continuación y se muestran esquemáticamente en la imagen 2.19 [39].

1. Los agregados micelares se difunden a la superficie de la suciedad.
2. Los tensoactivos se adsorben en la superficie de la suciedad.
3. Los agregados micelares adsorbidos se mezclan con la suciedad produciendo un agregado.
4. El nuevo agregado se desorbe de la superficie.
5. Los agregados mezclados se difunden de regreso al seno de la disolución. La suciedad queda envuelta por grupos hidrofílicos del tensoactivo que se solvatan en el baño y se repelen entre sí, impidiendo su reagrupación y estabilizando la dispersión.

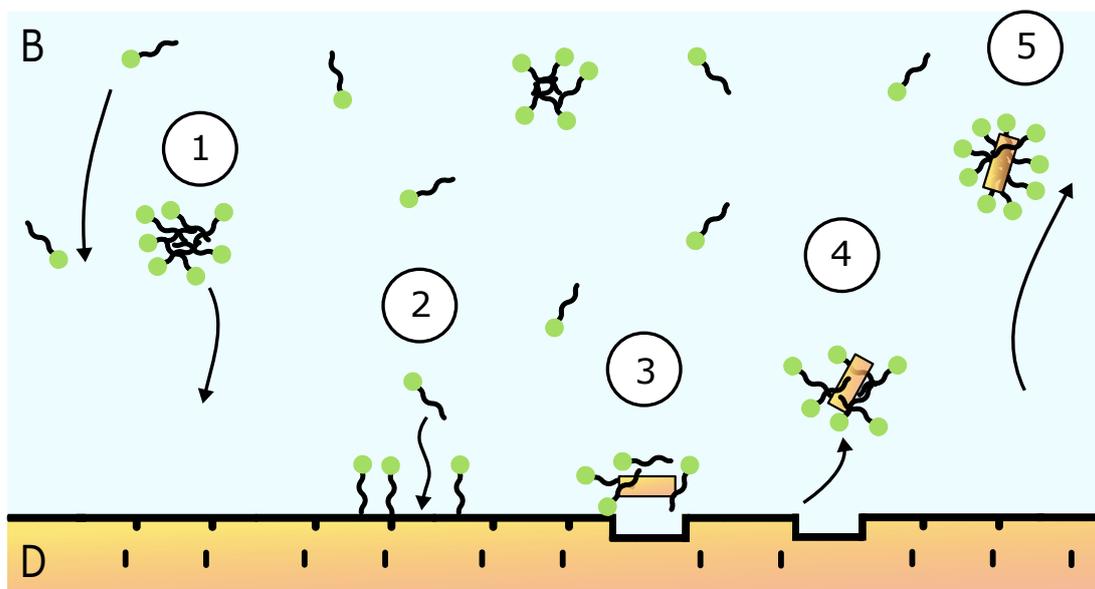


Figura 2.19: Mecanismo de solubilización. Adaptado de Shaeiwitz, 1981 [64]

Cuando la suciedad es enteramente apolar la solubilización ocurre en el centro de la micela, imagen 2.20a. Por otro lado, si la suciedad posee carácter polar, como ácidos o alcoholes, la solubilización ocurre por el proceso de comicelización, es decir, la parte polar de la suciedad se solubiliza en la superficie de la micela, imagen 2.20b [62]. Este mecanismo suele ocurrir en suciedades no polares y no se obtiene una gran remoción de la suciedad. Suele mejorar si se forma una fase rica de tensoactivo de naturaleza isotrópica o cristalina líquida ya que en estos incorporan una mayor cantidad de suciedad.

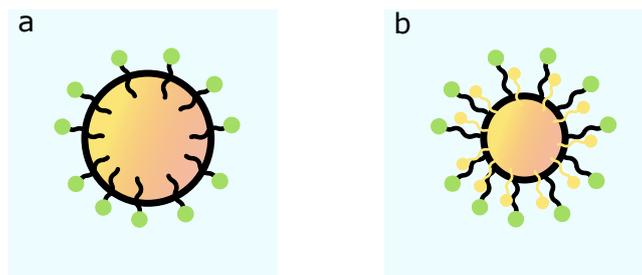


Figura 2.20: a) Solubilización b) Comicelización. Elaboración propia

Emulsificación

En la emulsificación una capa gruesa de suciedad se vuelve gotas. Para que esto pueda realizarse se necesita de agitación. La agitación debe ser capaz de deformar la interfase aceite-agua en gotas. Para que esta acción pueda facilitarse se necesita una tensión interfacial baja.

La emulsificación también se puede dar de forma espontánea, es decir sin necesidad de agitación. Esta puede producirse cuando el baño se encuentra en condiciones alcalinas que propicien la formación de tensoactivos en la interfase debido a la saponificación de ácidos grasos [65]. En este mecanismo la detergencia no suele ser la mejor por que a entrar en contacto la gota emulsionada con el sustrato, se queda adherida al sustrato ya que su ángulo de contacto con la suciedad es menor a 180° [41].

Microemulsión bicontinua

Las microemulsiones bicontinuas son estructuras formadas en un estado de transición entre las microemulsiones O/W y W/O donde la tensión interfacial es mínima, llamada curvatura cero o nula. Este estado combina la curvatura positiva y negativa; cuya suma de ambas curvaturas es cero [66]. En la figura 2.21 se observan estos arreglos. La formación de estas estructuras provoca la separación espontánea de la suciedad y su emulsificación en el baño en una microemulsión termodinámicamente estable.

La formación de estas estructuras va a depender de la naturaleza y carga de los tensoactivos que participen. En los tensoactivos no iónicos se obtiene por cambio de temperatura. La temperatura ideal para una óptima detergencia se obtiene con temperaturas cercanas o superiores al PIT (temperatura de inversión de fase, por sus siglas en inglés) pero por debajo del punto de enturbiamiento del tensoactivo. Por otro lado, con los tensoactivos aniónicos con dos cadenas lipofílicas o mezclas de tensoactivos y cotensoactivos la microemulsión bicontinua se puede obtener con un cambio de salinidad de la fase acuosa [41].

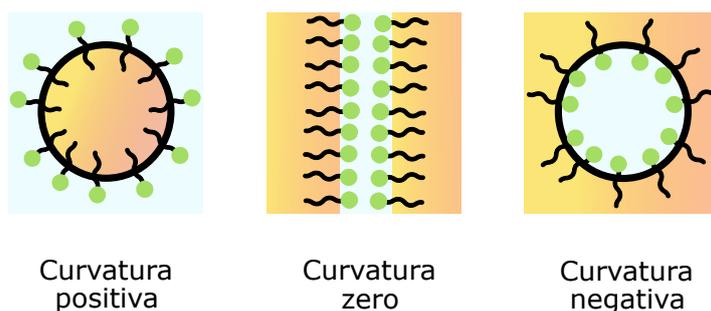


Figura 2.21: Curvatura de las estructuras formadas en la transición de las microemulsiones O/W y W/O. Elaboración propia

Capítulo 3

Objetivos

3.1. Objetivo general

Proponer el mecanismo deteritivo de la tela de algodón y verificarlo experimentalmente, relacionando las propiedades fisicoquímicas del baño, sustrato y la suciedad con la detergencia.

3.2. Objetivos particulares

- Conocer el impacto de la industria textil en México, en el mundo.
- Conocer el efecto ambiental de los tensoactivos con capacidad detergente.
- Realizar una búsqueda bibliográfica sobre los mecanismos de detergencia.
- Realizar una propuesta del mecanismo de detergencia en telas de algodón.
- Proponer una metodología experimental que verifique la propuesta del mecanismo deteritivo.
- Sentar las bases para que en caso de que otra investigación requiera realizar el cambio de un tensoactivo dañino al medio ambiente utilizado en la limpieza de algodón lo pueda cambiar con mayor facilidad por un biotensoactivo conociendo las propiedades fisicoquímicas que tienen un mayor impacto en el proceso.

Capítulo 4

Materiales y Métodos

El procedimiento experimental se realizó en dos partes: comparación del método y verificación experimental del mecanismo de detergencia. En estos procesos el sustrato se ensució, se lavó y se secó. Entre las mediciones utilizadas son: Blancura, masas, dispersión de luz dinámica, microscopía electrónica de barrido y turbidez. Los materiales y métodos utilizados se encuentran a continuación.

4.1. Reactivos

- Dodecilsulfato de sodio $\geq 98.5\%$ (GC), marca Sigma-Aldrich®
- Ácido oleico puro, marca Droguería Cosmopólita®
- Rojo de Nilo, marca Sigma-Aldrich®
- Agua destilada
- 2-Propanol $\geq 99.5\%$, marca J.T.Baker®
- Tela de Algodón WFK 10A cortada en rectángulos de 10 x 11 cm con bordes en zigzag, marca Testfabrics, Inc.®

4.2. Material y equipo

- Balanza analítica Mettler Toledo® PM400. Intervalo de uso: 0.000 - 120.000 g. Incertidumbre tipo B ± 0.001 g
- Cámara de celular motorola moto x4, 12 megapíxeles, apertura focal f/2 con un formato de 3.99 mm e ISO 50

- Foco de 470 mA 127 V \sim 60 Hz 30 W 6500 K
- Refrigerador, temperatura: 5.9 a 6.5 °C
- Turbidímetro, modelo 2100N, marca HACH®. Intervalo de uso: 0.200 - 3.000 NTU
- Tacómetro, modelo B-891, marca Power Instruments, Inc.® Intervalo de uso: 0 - 1000 rpm
- Mini centrífuga, modelo 10, marca Costar®
- Micropipeta de 1000 μ L, marca Accumax®
- Vasos de precipitado
- Tubos de ensayo
- Frascos de 250 mL con tapa
- Secadora de aire, modelo 32100A, marca Hamilton Beach®
- Microscopía Electrónica de Barrido, marca JEOL®
- Dispersión de luz dinámica, modelo 380 ZLS, marca PSS NICOMP®
- Baño ultrasónico marca Cole-Parmer® 110 W 40 KHz +/- 6 %

4.3. Sistema de ensuciamiento

Se colocaron cuatro soportes universales con pinzas de tres dedos en las cuales se colocaron clips con los que se sujetaron las telas prístinas suspendidas horizontalmente en el aire, donde se aplicó la disolución ensuciadora [67], imagen 4.1. Se realizó de esta manera para asegurar que la suciedad adicionada se mantuviera en la tela y no se transfiriera a alguna superficie.

4.4. Equipo de lavado

El lavado se realizó durante 10 minutos. Se utilizaron cuatro condiciones de lavado: sin perturbación, con agitación, con ultrasonido y con agitación-ultrasonido. La primer condición consistió de un vaso de precipitados de 2 litros donde se adicionó la disolución acuosa, imagen 4.2 a. En la segunda condición se colocó un equipo de agitación formado por un motor y una propela, la cual se colocó dentro del vaso de precipitados que contenía la disolución acuosa del



Figura 4.1: Sistema de ensuciamiento

baño, imagen 4.2 b. Para la tercera condición se colocó el vaso de precipitados la disolución acuosa dentro del baño ultrasónico y dos esponjas a sus lados para que no se calentara y derritiera el plástico del vaso de precipitados por las ondas ultrasónicas y evitar el movimiento no deseado del vaso, imagen 4.2 c. La última condición constó de las dos anteriores juntas, imagen 4.2 d.

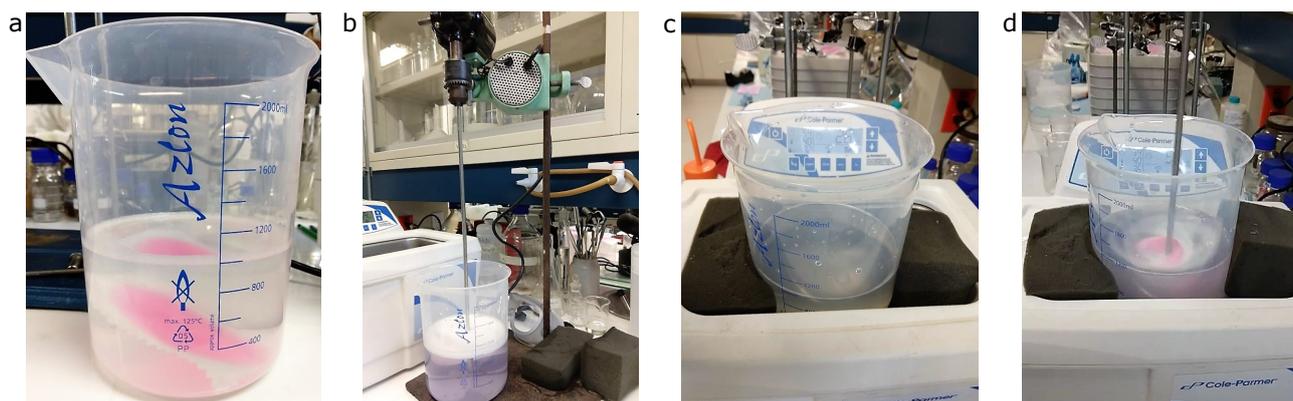


Figura 4.2: Equipo de lavado: a) Sin perturbación b) Con agitación c) Con ultrasonido d) Con ultrasonido y agitación.

4.4.1. Agitación

Se utilizó una propela marina para la agitación, imagen 4.3a. Para medir las revoluciones por minuto de la propela de agitación se utilizó un tacómetro B-891, Power Instruments, Inc.®), imagen 4.3b.

4.5. Secado

El secado de las telas se realizó en una secadora de aire Hamilton Beach® 32100A previamente lavada y enjuagada para asegurar que no tuviera residuos de tensoactivos. El tiempo de



Figura 4.3: a) Propela marina b) Tacómetro B-891, Power Instruments, Inc.®

secado por tela fue de aproximadamente 2 horas. Las telas se colocaron en la quinta bandeja apilable sobre una malla fina de plástico, imagen 4.4. La rejilla se llegó a pigmentar ligeramente, por lo que se enjuagaba y se dejaba secar para colocar otra tela en el mismo lugar.



Figura 4.4: Telas en secadora de aire Hamilton Beach® 32100A

4.6. Blancura

La determinación de la detergencia se realizó por la ecuación de Kubelka-Munk (KM) [68], ecuación 4.1, cambiando la reflectancia (R) por la blancura. La medición de blancura de las telas se realizó con imágenes digitales de las telas tratadas con el programa imageJ [69].

$$\%Detergencia = \frac{(K/S)_D - (K/S)_W}{(K/S)_D - (K/S)_S} \times 100 \quad (4.1)$$

con

$$K/S = \frac{(1 - R)^2}{2R} \quad (4.2)$$

Donde:

R: Reflectancia, D: Tela sucia, W: Tela sucia después del lavado y S: Tela original

Las imágenes se obtuvieron a través de fotografías tomadas con una cámara de celular motorola moto x4. Para las fotografías se implementó un sistema fotográfico, imagen 4.5, sobre la caja Petri se colocó la tela a tratar. La fotografía se tomó de lado izquierdo del foco y con las luces del laboratorio apagadas.

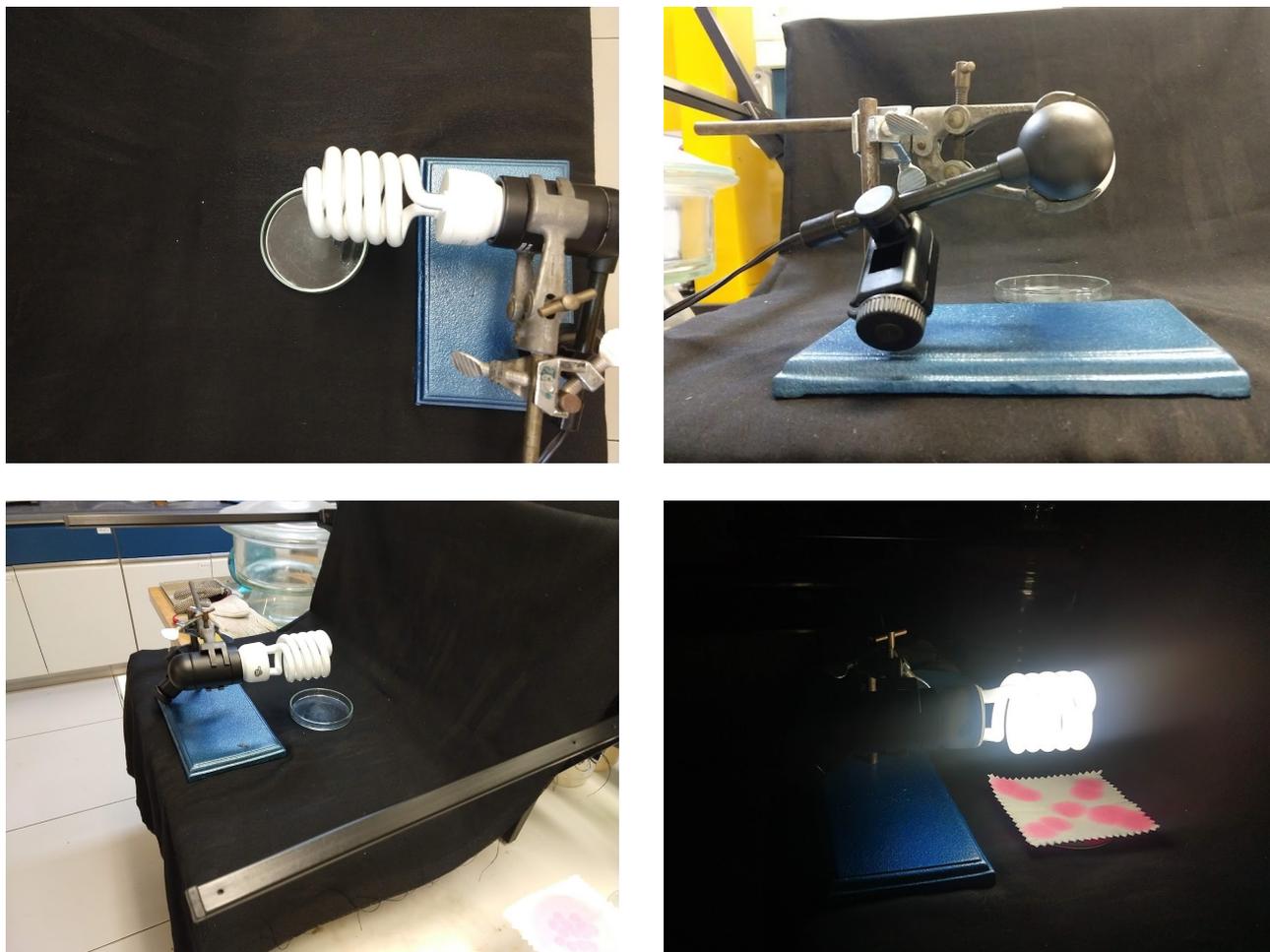


Figura 4.5: Sistema de fotográfico

Las imágenes obtenidas se trataron en el programa ImageJ donde se transformaron a 32-bit cambiando el color a blanco y negro. Se analizaron las imágenes digitales a través de su histograma de escala de grises. Se obtuvo información como máximo, mínimo, promedio, desviación estándar, entre otros; los histogramas se encuentran en el apéndice C. A medida que el valor en la escala de grises aumenta indica una mayor blancura de la tela, por tanto el valor promedio en la escala de grises puede sustituir el valor R de la ecuación 4.2, el cuál también está vinculado con la blancura de la tela. El valor de blancura obtenido con el análisis de las fotografías se sustituyó en la ecuación de Kubelka-Munk, ecuación 4.1, para obtener el porcentaje de detergencia del lavado de la tela.

4.7. Dispersión de luz dinámica

La dispersión de luz dinámica o DLS, por sus siglas en inglés, es una técnica no invasiva que se utiliza para estudiar la CMC, el tamaño, la forma y el número de agregación de los tensoactivos. La técnica de DLS se basa en que las micelas dispersan órdenes de magnitud de luz con más fuerza que otras especies en solución, como los monómeros tensoactivos libres o los contraiones [70]. Para esta técnica se tomó una pequeña cantidad del baño y se colocó en una celda para su análisis con el objetivo de identificar a los agregados moleculares cargados con la suciedad.

4.8. Microscopía Electrónica de Barrido

La Microscopía Electrónica de Barrido o SEM, por sus siglas en inglés, es una técnica que por medio del barrido de un haz de electrones en una muestra se generan imágenes tridimensionales de la superficie. La interacción del haz de electrones con los átomos de la superficie de la muestra genera señales que proporcionan información topográfica de la superficie. La emisión de rayos X resultantes del bombardeo de electrones permite identificar la composición elemental de manera cualitativa y semicuantitativa de la muestra analizada, de boro hasta americio. Las características del equipo utilizado se encuentran en la tabla 4.1 [1]. Para enviar la muestra a este análisis se recortó una porción de tela de aprox. 1 cm x 0.5 cm.

Tabla 4.1: Características del microscopio electrónico de barrido [1]

Barrido:	JEOL JSM-5900-LV (presión variable)	JEOL JSM-5910 (alto vacío)
Resolución:	3.0 nm HV, 5.0 nm LV	3.0 nm HV
Voltaje de aceleración:	0.3 a 3kV (pasos de 100V), 3 a 30kV (pasos de 1kV)	0.3 a 3kV (pasos de 100V), 3 a 30kV (pasos de 1kV)
Amplificación:	18X - 300,000X	18X - 300,000X
Cañón:	Termoiónico W	Termoiónico W
Microanálisis (EDS):	Oxford Aztec 100	Oxford Aztec 100
Bajo vacío:	10 a 270 Pa	10 a 270 Pa

En este estudio se utiliza esta técnica con el objetivo de identificar los pseudo-complejos propuestos en el mecanismo de detergencia, sección 5.1, identificando si existe tensoactivo y/o suciedad sobre la tela durante distintas etapas de la detergencia.

4.9. Turbidez

El turbidímetro mide el efecto de la luz refractada del fluido de trabajo. Con la medición de la turbidez se puede conocer la presencia de emulsiones aceite en agua, que se encuentra en función de la concentración y el tamaño de las partículas, por lo que también se puede medir la estabilidad de esta [71, 72].

El objetivo de la medición de turbidez fue poder identificar si se forma una emulsión en el baño debido a la detergencia. La turbidez se midió tomando una pequeña cantidad del baño y se colocó en una celda para su análisis. El equipo utilizado, Turbidímetro HACH® 2100N, se muestra en la imagen 4.6. Los valores obtenidos se muestran en NTU, por sus siglas en inglés Nephelometric Turbidity Unit.



Figura 4.6: Turbidímetro, HACH® 2100N

Capítulo 5

Resultados y discusión

5.1. Mecanismo de detergencia en tela de algodón

Un sistema deteritivo típico consta de Sustrato (S), Suciedad (D) y Baño (B). Antes de la detergencia, la suciedad se puede encontrar tanto adsorbida como absorbida sobre el sustrato. Para esta investigación el sustrato es una tela de algodón, la suciedad es ácido oleico y colorante insoluble en agua, rojo Nilo, y el baño es disolvente agua (B_A) con detergente como un solo tensoactivo, SDS. El tensoactivo puede estar presente en forma de micelas (B_M), tensoactivo libre (B_T) o formando un sistema disperso por la interacción suciedad-Baño como emulsiones (B_E) o micro-emulsiones.

En el lavado de textiles se utiliza el detergente a concentraciones entre el 0.05 % m/m y el 0.4 % m/m [38]. Para el planteamiento del mecanismo deteritivo se plantean tres casos de acuerdo como se encuentra el tensoactivo en la disolución.

- **Tensoactivo libre:** La suciedad se encuentra adherida al sustrato dentro del baño de lavado. Los tensoactivos se adsorben en la superficie del sustrato y del contaminante.
- **Tensoactivo libre y micelas:** La suciedad hidrofóbica se solubiliza en el interior de la micela quedando residuos de esta sobre la tela. Considerando un sustrato polar puede haber transferencia del contaminante a la micela debido a la diferencia de potencial químico. Para que se verifique el proceso de detergencia el potencial químico de la suciedad en el sustrato $\hat{\mu}_D^S$, debe ser mayor que el potencial químico de la suciedad en la micela, $\hat{\mu}_D^M$.
- **Micelas:** El hinchamiento de las micelas por la suciedad y el agitado propicia la formación de una emulsión.

A partir de los del análisis bibliográfico se propone el siguiente mecanismo de la detergencia en algodón que, para comprenderlo se ha desglosado en las etapas que lo componen, descritos a continuación.

5.1.1. Suciedad adherida al sustrato

El sustrato es una tela de algodón y se encuentra unida a una suciedad oleosa; a esta unión le llamaremos pseudocomplejo Sustrato-Suciedad (S-D). La interacción entre estos dos se puede describir por la ecuación 5.1.

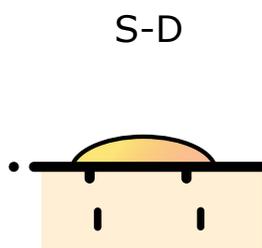


Figura 5.1: Interacción Sustrato-Suciedad

Esta etapa no corresponde al proceso detergente, pero el proponer esta primera pseudoreacción permite analizar la magnitud de la interacción sustrato-suciedad para tener una medición energética de esa unión y poder reducirla, así como también esta etapa es indispensable para que ocurra la detergencia. Las mediciones que ayudan a identificar esta etapa son:

- La SEM proporcionó información sobre la topografía de la superficie de la tela y su composición elemental con y sin suciedad.
- Blancura del sustrato antes del proceso de ensuciamiento y después del enjuague. Proporciona información sobre la cantidad de suciedad que quedó como remanente.

5.1.2. Interacción Sustrato-Suciedad-Baño

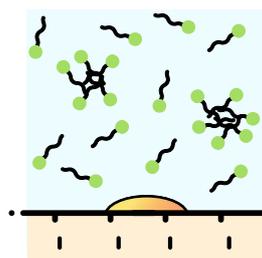


Figura 5.2: Sustrato-Suciedad en el Baño. La cabeza polar del tensoactivo es indicada en verde y la cadena hidrocarbonada en negro.

Entra en primer contacto el pseudocomplejo S-D con el baño que se compone de tensoactivo monomérico (B_T), agregados moleculares en forma de micelas (B_M) y disolvente agua (B_A). La interacción del pseudocomplejo S-D se puede dar con B_T , con B_M , o con ambas sin requerir que una ocurra antes o después de otra. Es decir, puede ocurrir primero la interacción con B_T y luego con B_M , de manera contraria o ambas a la vez. Los componentes que se encuentran son:



Interacción Sustrato-Suciedad-Tensoactivo monomérico

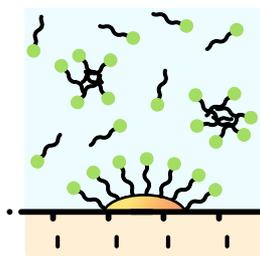


Figura 5.3: Sustrato-Suciedad-Tensoactivo monomérico

El pseudocomplejo S-D interactúa con los monómeros libres del tensoactivo de manera que su cadena hidrocarbonada se orienta a la suciedad oleosa formando el complejo D-S- B_T .

Dependiendo de la naturaleza del textil y la suciedad será la orientación de los tensoactivos. Cuando la suciedad o el sustrato sea apolar, la parte hidrofóbica del tensoactivo se orientará hacia ella, imagen 5.4 b. Por otro lado, cuando la estructura sea polar, se orientará la parte hidrofílica del tensoactivo hacia la estructura, figuras 5.4. La mayoría de sustratos adquieren carga negativa en el baño por lo que al poseer tensoactivos aniónicos se espera que haya repulsión y no se adsorba el tensoactivo en el sustrato, imágenes 5.4 a y c.

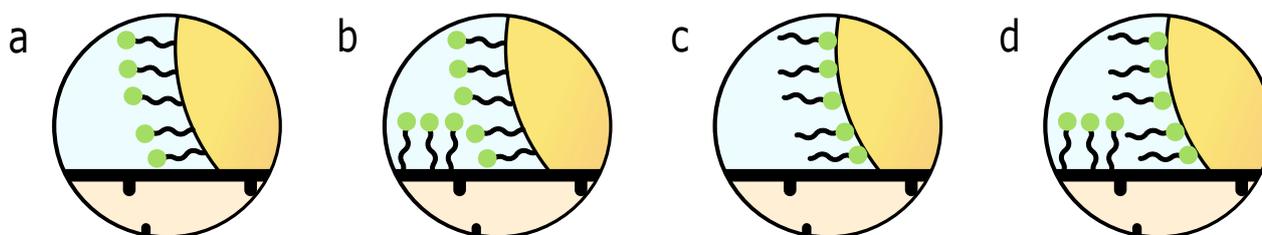


Figura 5.4: Interacción del Tensoactivo con el sustrato y suciedad. a) Sustrato polar y suciedad apolar b) Sustrato apolar y suciedad apolar c) Sustrato polar y suciedad apolar d) Sustrato apolar y suciedad polar

El algodón es una fibra hidrofílica y al encontrarse en medio acuoso tiene una carga negativa. Por lo que al tener un tensoactivo aniónico se espera que no se adsorba el tensoactivo sobre la tela y haya una repulsión de cargas, resultado que el tensoactivo únicamente se absorba en la interfase de la suciedad. La suciedad al ser hidrofóbica interactúa con la parte lipofílica del tensoactivo, imagen 5.4 a. La interacción de esta etapa se describe por la ecuación 5.3.



La obtención del nuevo pseudocomplejo $S-D-B_T$ aumenta la tensión entre el sustrato-suciedad y disminuye entre el sustrato-baño, lo que propicia un cambio de ángulo de contacto. Si el ángulo entre la suciedad con el tensoactivo adsorbido y el sustrato es cercano a 180° la suciedad junto con el tensoactivo se desprende del sustrato, lo que se conoce como enrollamiento [73]. Las mediciones que ayudan a identificar esta etapa son:

- El estudio SEM proporciona información sobre la presencia del tensoactivo en la tela. Se compara la SEM del sustrato sin tratamiento con una tela lavada y enjuagada para asegurar que en el análisis no haya residuos que se encontraban suspendidos y verificar la formación del nuevo pseudocomplejo $S-D-B_T$.
- Medición de blancura del sustrato antes y después del proceso de lavado para observar el cambio de detergencia previo al enjuague por la cantidad de pseudocomplejo $S-D-B_T$ que quedó en el sustrato.

Interacción Sustrato-Suciedad-Micelas

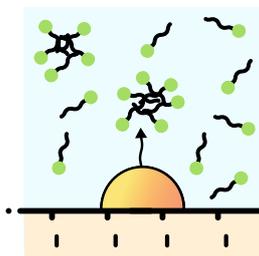


Figura 5.5: Sustrato-Suciedad-Micelas

En cuanto la suciedad D del pseudocomplejo $S-D$ se introduzca en el baño va a tender a separarse por el efecto hidrofóbico lo que la hará dirigirse al centro de la micela. Este efecto de difusión puede explicarse con los potenciales químicos. Para el caso del sustrato algodón (superficie hidrófoba) y una suciedad hidrófoba, el potencial químico de la suciedad será mayor

en el sustrato que en la micela $\hat{\mu}_D^S > \hat{\mu}_D^M$. La solubilización del aceite dentro de la micela proporciona evidencia de la formación del pseudocomplejo $D-B_M$ esperando tamaños de partículas no mayores a 6 nm [74]. Esta etapa se describe por la ecuación 5.4.



Las mediciones que ayudan a identificar esta etapa son:

- La dispersión de luz comparando la disolución del baño anterior y posterior del lavado ayudando a identificar si la micela se ha hinchado debido a la solubilización de la suciedad.
- La turbidez del baño antes y después del lavado puede identificar el cambio de tamaño de los agregados en la disolución debido a la encapsulación del aceite en las micelas.

5.1.3. Emulsificación

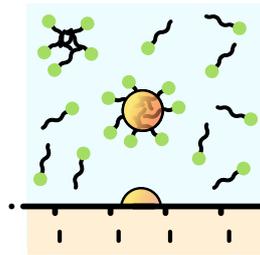


Figura 5.6: Emulsificación

Los productos de las etapas anteriores que resultan de la interacción Sustrato-Suciedad-Baño: $S - D - B_T$ y $D - B_M + B_T + B_M$; los componentes del baño B_T y B_M ; y los residuos del pseudocomplejo S-D interactúan formando agregados de mayor tamaño que en su interior contienen suciedad oleosa, este nuevo pseudocomplejo formado es $B_T - D - B_M$. A este proceso se le denomina emulsificación. La formación de este pseudocomplejo puede o no requiere energía mecánica en forma de agitación. Para fines de este trabajo se considera a la emulsión como la formación de gotas mayores a 6 nm. Este proceso se describe en la ecuación 5.5.



Las mediciones que ayudan a identificar esta etapa son:

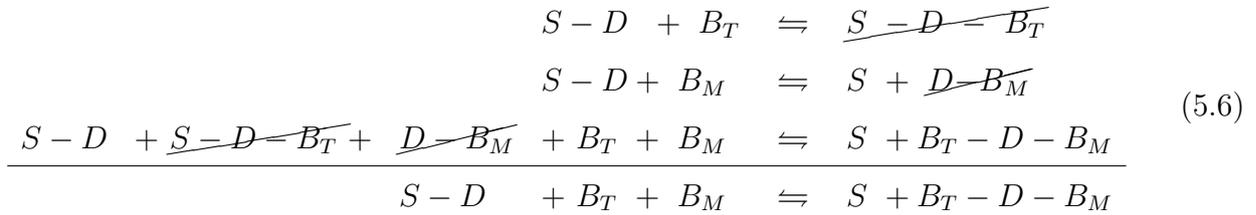
- La dispersión de luz comparando la disolución del baño antes del lavado, después del

lavado y después de la centrifugación para observar el cambio y tamaño de las micelas, se esperan mayores tamaños que en las etapas anteriores.

- La turbidez del baño antes y después del lavado puede identificar la formación de emulsiones.
- La centrifugación acelera la precipitación de gotas de aceite en caso de existir en forma de emulsión.

5.1.4. Proceso general de detergencia

Las pseudoreacciones descriptivas del mecanismo deterativo, ecuaciones 5.3, 5.4 y 5.5, se pueden sumar para obtener una expresión del proceso global del fenómeno, ecuación 5.6.



Las ecuaciones expresadas en forma de reacciones de equilibrio químico describen un comportamiento físico, por lo que sus coeficientes carecen de significado y no se colocan ni se realiza balanceo alguno.

La expresión del proceso global de detergencia, ecuación 5.6, describe al fenómeno de la siguiente manera: Un sustrato acomplejado con una suciedad que se adiciona a una disolución compuesta por tensoactivos en forma monomérica o micelar (baño), propicia que la suciedad se remueva del sustrato y se suspenda en la disolución, haciendo que el sustrato quede limpio de suciedad. Esta expresión resultante de la suma de las etapas coincide con lo que previamente autores como McBain [51] o Schwartz [40] han concluido sobre la obtención de sustratos limpios después de ser sometidos a procesos deterativos. La diferencia principal de este trabajo con estos dos autores es que aquí se plantean las ecuaciones separando al tensoactivo en las formas en las que puede encontrarse (monomérico o micelar); así como las expresiones que plantean McBain y Schwartz lo hacen de manera general para telas y este estudio se especializa en la tela de algodón.

5.1.5. Eficiencia termodinámica

Contemplando la ecuación general obtenida de la detergencia (ec.5.6) se puede describir la ecuación de eficiencia termodinámica de la detergencia, ecuación 5.7. La eficiencia aumenta cuando el valor φ tiende a uno, debido a que hay una disminución del pseudocomplejo Suciedad-Sustrato y mayor sustrato libre de suciedad por los fenómenos previamente descritos.

$$\varphi = 1 - \frac{[S - D]}{[S]} \quad (5.7)$$

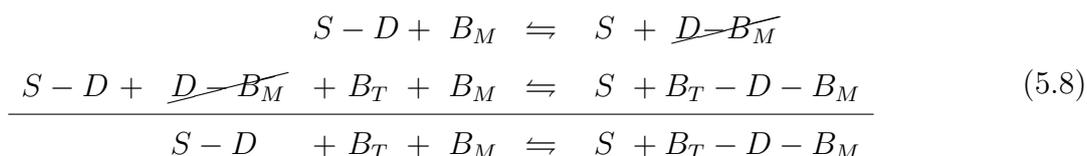
5.1.6. Casos de la Detergencia

La expresión 5.6 es el proceso general de detergencia que se puede particularizar en casos de que una etapa no se presente. En estas situaciones cambiará el mecanismo por el cual se lleve a cabo, pero no el resultado final que es la ecuación general.

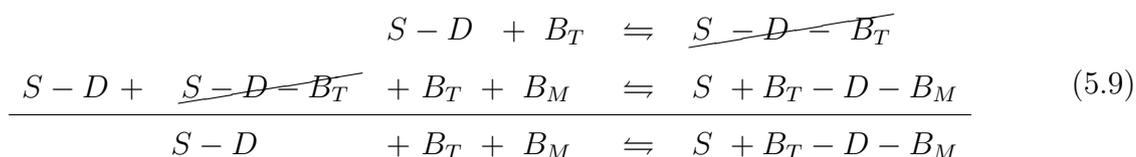
En todos los casos se espera cierto grado de interacción Suciedad-Sustrato para que ocurra el proceso de detergencia. En caso contrario se desprendería la suciedad del sustrato sin necesidad de someter al proceso deterensivo.

No ocurre la interacción S-D-B

Si durante el desarrollo del mecanismo no ocurre la interacción S-D- B_T el mecanismo resultante es el siguiente:

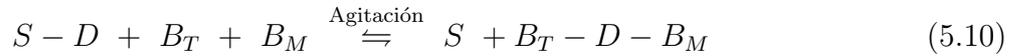


Si no ocurre la interacción S-D- B_M el mecanismo resultante es:



Interacción S-D débil

Cuando la interacción S-D es débil no ocurrirá el pseudocomplejo S-D-B, necesitando únicamente de agitación para formar la encapsulación de la suciedad, ecuación 5.10.



5.2. Propuesta Experimental

5.2.1. Comparación del método de medición de la detergencia

Se realizó una propuesta experimental para la verificación del mecanismo deteritivo, y para comprobar su funcionamiento se realizó la metodología de medición de la detergencia descrita en la imagen 5.7, cuyos datos se compararon con de los experimentos realizados por Gotoh en 2015 [68] donde las condiciones de lavado son similares.

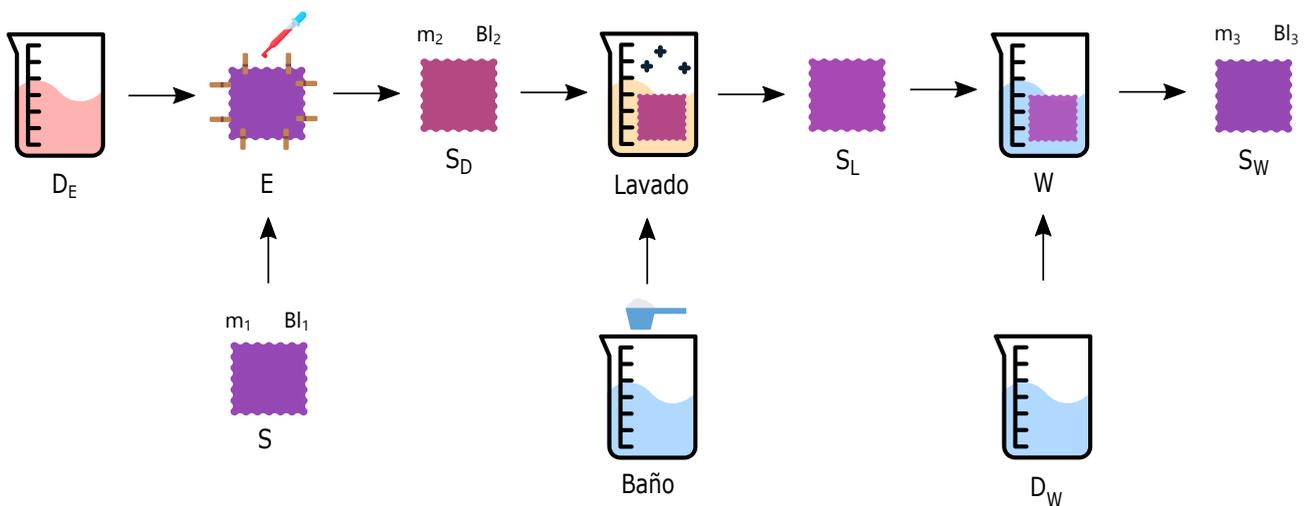


Figura 5.7: Metodología para la verificación del procedimiento de la medición de la detergencia

Donde:

D_E : Disolución ensuciadora, E: Ensuciamiento, S_D : Sustrato con suciedad, S_L : Sustrato lavado, S_W : Sustrato enjuagado, D_W : Disolución enjuagadora, W: Enjuague, Bl: Blancura, y m: Masa.

Preparación del sustrato, S

La tela de algodón se marcó del lado a ensuciar (cara frontal) con un lápiz para identificar el lado por el cual se hicieron las mediciones de blancura. Posteriormente el sustrato se pesó y se midió su blancura, m_1 y Bl_1 respectivamente.



Figura 5.8: Tela de Algodón WFK 10A cortada en rectángulos de 10 x 11 cm con bordes en zigzag (Sustrato).

Preparación de la suciedad, D_E

Se pesaron 0.020 g de rojo Nilo y 8.039 g de ácido oleico y se agitó para que se disolviera el colorante en el aceite.



Figura 5.9: Rojo Nilo + ácido oleico (Suciedad)

Adición de la suciedad al sustrato, E y S_D

La tela se suspendió en el aire de forma horizontal con el centro relativamente tenso y con una micropipeta se le adicionaron 0.25 mL de suciedad, imagen 5.10. Después el sustrato con suciedad se dejó “envejecer” durante 12 a 13 horas a temperatura de refrigeración de 5.9 a 6.5 °C [67]. Previo a emplearse los sustratos se sacaron de refrigeración para estar a temperatura ambiente para su uso. Posteriormente el sustrato se pesó y se midió su blancura, m_2 y Bl_2 respectivamente.

Lavado

Se añadieron 3 g de SDS y 1 L de agua destilada en el equipo de lavado, sometiéndose a ultrasonido hasta que se disolviera el SDS. Una vez disuelto el SDS se agitó el baño a 140 rpm



Figura 5.10: Adición de la suciedad al sustrato

y se añadió el sustrato sucio. Pasados 10 minutos el sustrato se extrae del baño y se adiciona a la disolución de enjuague. El proceso se realizó a temperatura ambiente.

Enjuage, W

Transcurridos los 10 minutos de lavado el sustrato se colocó dentro de la disolución enjuagadora por 3 minutos a temperatura ambiente. La disolución enjuagadora estaba compuesta por 1 L de agua destilada colocada en un vaso de precipitados de 2 L.

Secado

Una vez pasados los 3 minutos en la disolución enjuagadora, se sacaron los sustratos del enjuague y se colocaron en una secadora de aire hasta que el sustrato se mantuvo a masa constante, decir, hasta que el sustrato se secó.

Determinación de la detergencia

En cuanto el sustrato se encontró seco se pesó y se midió su blancura. La determinación de detergencia por blancura se realizó como se describe en la sección 4.6. Por su parte, la determinación de la detergencia por masas se realizó pesando el sustrato prístino (S , m_0), el sustrato ensuciado (S_D , m_1) y el sustrato limpio posterior al lavado (S_W , m_2).

La masa m_1 corresponde al sustrato y a la cantidad de suciedad adicionada y la masa m_2 al sustrato y a la cantidad de suciedad retenida en el mismo posterior al lavado. $m_1 - m_0$ corresponde a la cantidad de suciedad adicionada al sustrato y $m_1 - m_2$ a la cantidad de suciedad que se separó del sustrato posterior a haber sido lavado. La relación entre la cantidad de suciedad que se separó por el lavado y la adicionada inicialmente, al multiplicarla por cien

proporciona el porcentaje de detergencia. Esta expresión se encuentra en la ecuación 5.11, en donde se sustituyeron los valores de peso de los respectivos sustratos.

$$\%Detergencia = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \times 100 \quad (5.11)$$

5.2.2. Verificación experimental del mecanismo de detergencia

En la imagen 5.11 se describe la metodología experimental realizada para la verificación del mecanismo detergente de acuerdo con las semi-pseudoreacciones discutidas en la sección 5.1. El procedimiento de preparación del sustrato, preparación de la suciedad, adición de la suciedad al sustrato, lavado, enjuague, secado y determinación de la detergencia se realizaron de la misma manera que en la sección 5.2.1 a excepción de dos diferencias. La primera diferencia es que no se realizaron mediciones de masa del sustrato y en su lugar se recortaron muestras que se mandaron a SEM. La segunda diferencia es que el sustrato que se lavó se dejó secar para medir su blancura y se recortó una muestra para mandar a SEM, realizado esto se continuó con el enjuague. Este procedimiento que es similar a la sección 5.2.1 se realizó dos veces, una vez con agitado y una vez sin agitado.

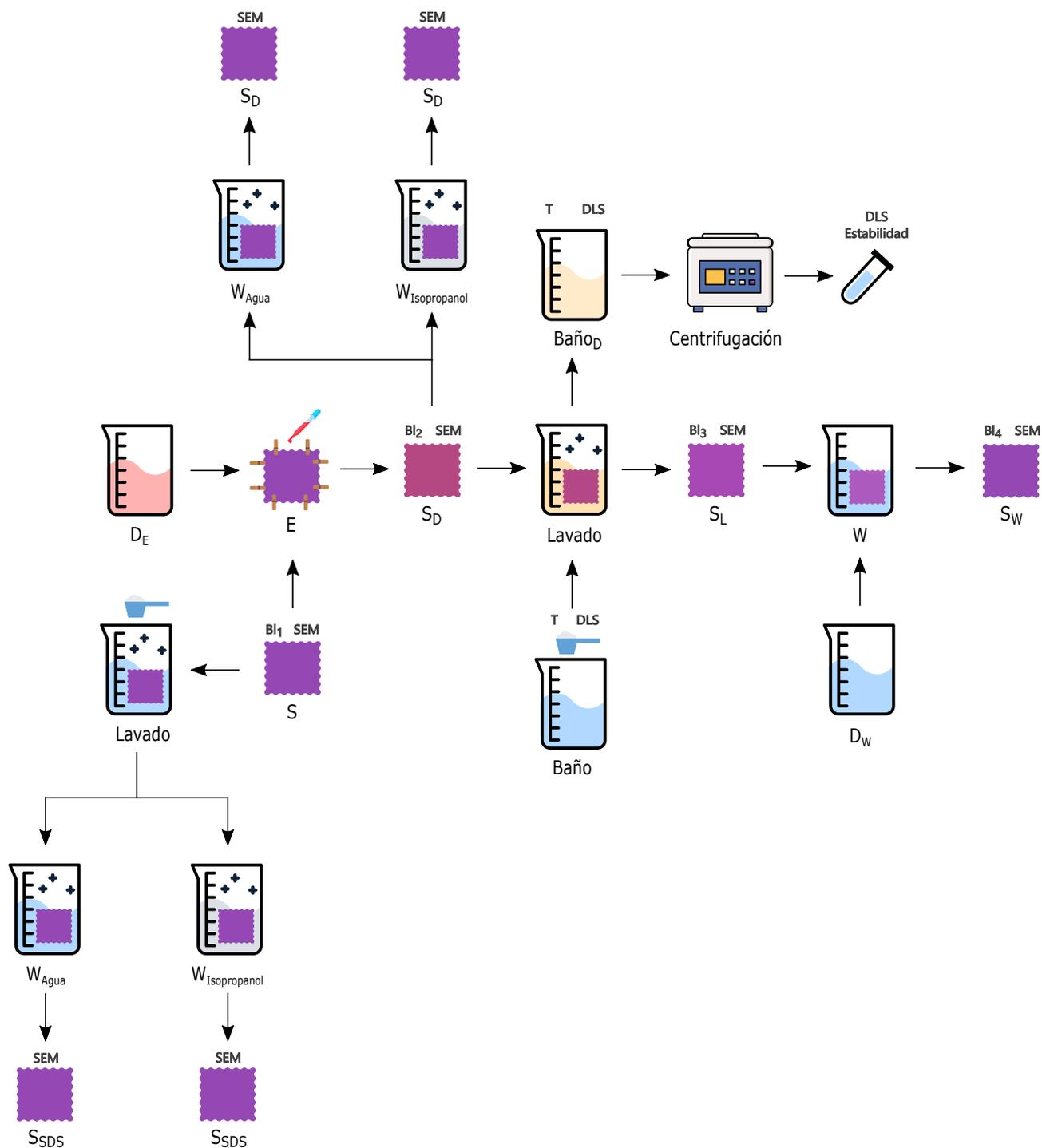


Figura 5.11: Metodología para la verificación del mecanismo detergente

Donde:

T: Turbidez, S_{SDS} : Sustrato con dodecilsulfato de sodio y Baño $_D$: Baño con residuos de suciedad después del lavado.

Interacción del Sustrato con SDS

La tela de algodón prístina se sometió a lavado como se describe en la sección 5.2.1. Transcurridos los 10 minutos de lavado la tela se colocó dentro de un frasco con aproximadamente 75 mL de agua que cubría el sustrato. La tela permaneció en la disolución durante 12 horas a temperatura ambiente, imagen 5.12. Se repitió el mismo procedimiento cambiando el disolvente de agua por 2-propanol.

Al terminar las 12 horas que las telas estuvieron en disolución se retiraron del frasco y se colocaron en el equipo de secado por aire hasta que el sustrato se secó. Seco el sustrato se recortó una muestra y se envió a SEM para su análisis.



Figura 5.12: Sustrato con SDS en agua y 2-propanol

Interacción del Sustrato con la Suciedad Oleosa

La tela se ensució como se describe en la parte de adición de la suciedad al sustrato de la sección 5.2.1. El sustrato con suciedad se colocó dentro de un frasco que se cubrió con aproximadamente 75 mL de agua. La tela permaneció en la disolución durante 12 horas a temperatura ambiente, imagen 5.12. Se repitió el mismo procedimiento cambiando el disolvente de agua por 2-propanol.

Al terminar las 12 horas que las telas estuvieron en disolución se retiraron del frasco y se colocaron en el equipo de secado por aire hasta que el sustrato se secó. Seco el sustrato se recortó una muestra y se envió a SEM para su análisis.



Figura 5.13: Sustrato con Suciedad en agua y 2-propanol

Interacción del Baño con la Suciedad Oleosa

Previo a realizar el lavado se tomó porción del baño que contenía 3 g/L de SDS disuelto en agua a la cual se le midió turbidez y DLS. Posterior al lavado, Baño_D, se volvieron a realizar las mismas mediciones de turbidez y DLS. De la disolución Baño_D se tomó una muestra y se centrifugó por 30 minutos. La centrifugación se realizó para separar cualquier partícula sólida del sustrato que quedara residual en la disolución, para medir la estabilidad de la disolución observando acelerar la separación de fases formación de gotas aceitosas; a esta muestra centrifugada se le midió DLS.

5.3. Resultados Experimentales

5.3.1. Comparación de la medición de detergencia por blancura y por diferencia de masas

Determinación de la detergencia por medición de la blancura

Los resultados del porcentaje de detergencia obtenidos de la medición de blancura se muestran en la tabla 5.1. En esta tabla se observa que los porcentajes de detergencia entre el sonicado y el blanco (sin agitado y sin sonicado) son muy cercanos; de igual manera, agitación + sonicado y si únicamente se agita. Los resultados también muestran que al adicionar agitación al baño la detergencia mejora alrededor de 50 %. Esto puede deberse a que las acciones mecánicas favorecen la solubilidad de la suciedad al promover la transferencia de masas, proporcionan energía mecánica y evita la sedimentación de la suciedad.

Tabla 5.1: % Detergencia obtenida por blancura

Experimento	% Detergencia	Desv. Std.
-	34.810	3.079
Sonicado	38.142	3.498
Ag + Son	68.274	20.003
Agitado	69.835	5.697

Los resultados muestran que las desviaciones estándar aumentan cuando se adicionan acciones mecánicas, ya sean de sonicado o agitación, sobre todo cuando sonicado y agitado se proporcionan a la vez. Este efecto se puede deber a que las acciones mecánicas, sobre todo cuando se juntan sonicado y agitado, propicia que la suciedad suspendida llegue a chocar con el sustrato y se deposite nuevamente.

Cuando los resultados de la tabla 5.1 se comparan con los resultados reportados por K. Gotoh et al. [68] se obtiene la gráfica 5.14. En esta gráfica se observa que la desviación estándar del agitado y del agitado + sonificado se encuentran sobre el mismo intervalo de porcentaje de detergencia; de la misma manera el sonificado y la condición sin efecto mecánico, por tanto el efecto del sonificado es mínimo.

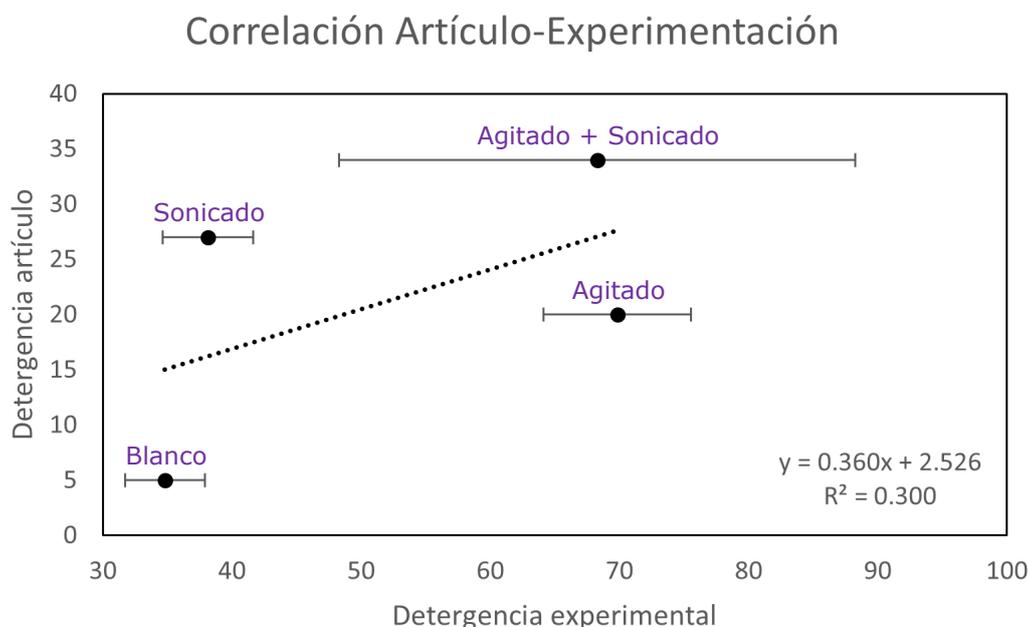


Figura 5.14: Correlación del % Detergencia entre el artículo "Combination effect of ultrasound and shake as a mechanical action for textile cleaning" por Gotoh K., Harayama K. y Handa K. (2015) y la experimentación del presente trabajo.

Por otra parte, el valor del coeficiente de determinación, R^2 , que proporciona información sobre la variación con respecto a la variable de respuesta es baja, por lo que pareciera no haber una correlación entre los datos del artículo y los obtenidos experimentalmente. Sin embargo, al tratar los datos extraídos del artículo [68], las gráficas se encuentran en el apéndice A, se compararon los datos de detergencia contra la potencia de sonificado o las revoluciones por minuto (RPM) del agitado. Las pendientes de las ecuaciones de las rectas que corresponden al sonificado tienen una orden de magnitud de 10^{-2} , mientras que las correspondientes al agitado tienen una orden de magnitud alrededor de 10^{-1} , es decir, el fenómeno de detergencia tiene una mayor sensibilidad al proceso de agitado que al sonificado, tendencia que es observada en los datos experimentales de este trabajo. En este trabajo, al igual que en el artículo, la detergencia aumentó aún más en presencia de agitado manteniéndose esta tendencia mostrada en el trabajo de K. Gotoh. Cabe destacar que los datos tratados del artículo [68] se observa que, cuando se mantienen las condiciones de acción mecánica y suciedad, la tela de algodón suele tener valores

de detergencia menores a comparados con la detergencia del poliéster, en la mayoría de los casos es de alrededor de 10 unidades de detergencia. La tela de algodón 10A que se utilizó en el artículo [68] también se utilizó en este estudio.

En el último caso, se mantienen constantes el sustrato y las condiciones de acción mecánica, pero cambia el tipo de suciedad. Para el caso del artículo [68] las suciedades son: Negro de carbón y ácido oleico + sudan III. Estas suciedades se graficaron juntas, ver apéndice A, y se observa que para el poliéster se mantiene para todos los casos un mayor porcentaje de detergencia para la suciedad de ácido oleico + sudan III que para el negro de carbón. Esta tendencia evidencia la influencia de la suciedad sobre el fenómeno detergente. En el presente trabajo, se cambió las suciedades utilizadas en el artículo [68] de ácido oleico + Sudan III por ácido oleico + rojo Nilo. El Sudan III y el rojo Nilo son muy parecidos en características. Ambos son tintes lipofílicos pero el primero en disolventes polares tiene dos estructuras resonantes con cargas positivas [75] que pueden interactuar con la tela de algodón, que se encuentra cargada negativamente en agua, haciendo que sea más difícil su remoción a comparación del rojo Nilo que solo tiene una estructura resonante con carga positiva [76]. Esta diferencia hace que los porcentajes de detergencia sean mayores para el rojo Nilo en comparación con el Sudan III.

Pese a que los resultados de este estudio comparados con los del artículo [68] no tienen un coeficiente de determinación cercano a 1, las tendencias principales se mantienen, como el aumento de la detergencia con el agitado. También afectaron en la variación de manera significativa el tipo de suciedad y su interacción con el sustrato.

Detergencia por medición de diferencia de masas

En la tabla 5.2 se muestran los resultados de detergencia obtenidos de las mediciones de masas. En esta tabla se observa que, de igual manera que en blancura, el experimento sin acción mecánica es muy similar a la que tiene sonificado, incluso al considerar la desviación estándar los datos se encuentran en el mismo rango. Los experimentos de agitado y agitado + sonificado tienen una ligera diferencia en sus porcentajes detergentes, pero al ser únicamente en este caso y no ser una diferencia significativa, se sigue considerando que el sonificado no tiene efecto en la detergencia.

En el primer experimento que es sin acción mecánica se observó ligeramente mayor desprendimiento de pelusas, estas telas fueron las que se tomaron de la parte de arriba del empaque, esto repercutió en un aumento en la desviación estándar. En los siguientes experimentos el desprendimiento de pelusa era menor, esto se observa disminuyendo la variación y haciendo insignificante el desprendimiento de pelusa. De igual manera que en blancura, la desviación estándar aumenta cuando se adicionan los dos tipos de acciones mecánicas utilizadas: agitado + sonificado.

Tabla 5.2: Remoción de suciedad obtenida por masas.

Experimento	% Detergencia	Desv. Std.
-	54.775	8.117
Sonificado	62.216	0.184
Ag + Son	70.538	5.563
Agitado	80.299	1.000

Relación masas - blancura

Al comparar la relación que existe entre la detergencia obtenida de los datos experimentales por masas y por blancura, gráfica 5.15, se observó una buena correlación entre los experimentos con el coeficiente de determinación (R^2) de 0.845, es decir, existe consistencia interna de los experimentos. Uno de los factores que hace la diferencia entre las mediciones de masa y de blancura, es que el primero puede llegar a desprender pelusas afectando el porcentaje detergente, fenómeno que no afecta las mediciones de blancura. Los dos primeros experimentos (sin acción mecánica y sonificado) es ligeramente mayor a las de los obtenidos por blancura, el motivo se debe a que en estas primeras muestras se observó un mayor desprendimiento de pelusa. En los dos últimos experimentos, los resultados de blancura y masas son más similares entre sí.

Al comparar los resultados experimentales obtenidos con los del artículo [68], se mantienen las tendencias principales donde hay un aumento de la detergencia al utilizar agitado, pero hay factores como el tipo de suciedad y su interacción con el sustrato que hacen que los resultados se diferencien de los reportados por K. Gotoh. Los resultados tienen consistencia interna ya que los datos por masas y por blancura tienen la misma tendencia y un coeficiente de correlación de 0.845 que puede mejorar si se prelava la tela para remover la pelusa.

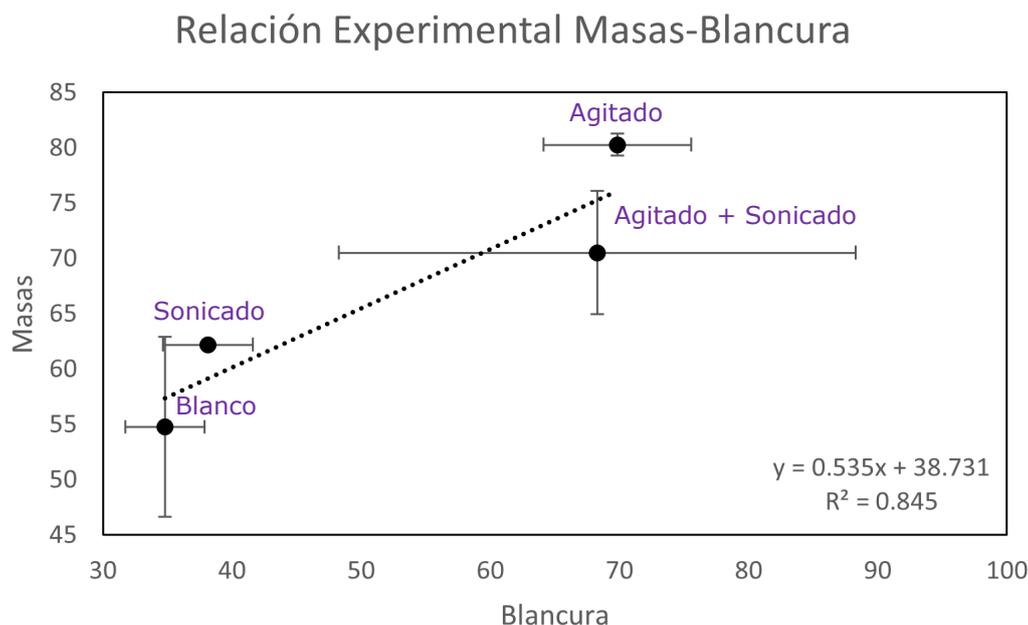


Figura 5.15: Relación Experimental Masas-Blancura

5.3.2. Verificación experimental del mecanismo de detergencia

Determinación de la detergencia por medición de la blancura

Los resultados obtenidos de % Detergencia para la verificación experimental del mecanismo de detergencia se encuentran en la tabla 5.3. La detergencia obtenida posterior al lavado con enjuague (%D (S_W)) del sustrato S_W (ver figura 5.11) se encuentra dentro de los intervalos obtenidos en la sección 5.3.1 de medición de detergencia por blancura donde se verificó la metodología, tabla 5.1.

Tabla 5.3: % Detergencia obtenida por blancura

Experimento	%D (S_L)	%D (S_W)
Agitado	50.281	68.178
No agitado	32.206	32.797

En la tabla 5.3 para el experimento con agitado se observa que la detergencia medida posterior al lavado pero sin enjuague (%D (S_L)) es casi 20 unidades de detergencia menor en comparación cuando se enjuaga (%D (S_W)). Esto indica que existe primeramente una remoción de la suciedad oleosa por efecto del agitado debido a la interacción con las moléculas de SDS, descritas en la sección 5.1. Al enjuagar el sustrato se remueven suciedades que quedaron redepositadas y que con diluir se desprenden.

Por otro lado, cuando el lavado se realiza sin acción mecánica la diferencia entre % D(S_L) y % D(S_W) es insignificante. Esto indica que cuando no hay acción mecánica, la detergencia está determinada por la solubilización o dispersión de la suciedad en el baño de lavado. Al no encontrar diferencias significativas entre la detergencia sin enjuague y con enjuague, indica que la dispersión es estable y no hay redeposición en el sustrato.

El aumento de la detergencia por la agitación mecánica probablemente se debe al incremento de la transferencia de materia y adición de energía mecánica que promueve la formación de los pseudocomplejos.

Dispersión de luz dinámica

Cuando las muestras del baño se colocaban en el equipo de DLS no hubo una lectura del equipo, indicando una dispersión de cero en todos los casos y en ocasiones daba una unidad en la lectura, lo que podría indicar la presencia de pelusas desprendidas del sustrato al lavarlo, pero esta técnica no permite evaluar el hinchamiento de las micelas por la solubilización de la suciedad.

Microscopía Electrónica de Barrido

En los espectros de emisión de electrones del sustrato antes y después del lavado, ver apéndice D, se verifica la presencia del azufre y su contraión sodio en el sustrato S_W , el cual no se encontraba previo al lavado; por lo que se puede concluir que hubo interacción entre el sustrato y el tensoactivo.

Turbidez

Los resultados obtenidos de la medición de la turbidez se muestran en la tabla 5.4. La turbidez del baño posterior al lavado, B_D , es ligeramente superior en ambos casos, agitado y no agitado, sobre todo para la condición de agitado con una diferencia de dos unidades de NTU. Sin embargo, como estas diferencias no son significativas, no se puede concluir sobre el cambio de tamaño de los agregados en la disolución debido a la encapsulación del aceite en micelas.

Tabla 5.4: Turbiez

Mecanismo	Baño	Turbidez (NTU)
Agitado	Baño	0.270
	Baño _D	2.61
No agitado	Baño	0.245
	Baño _D	0.837

Capítulo 6

Conclusiones

Entre los factores físicos que afectan el porcentaje de detergencia se encuentran:

- **Acciones mecánicas.** La agitación afecta de manera positiva a la detergencia, favoreciendo la remoción de la suciedad. La acción mecánica aumenta desviación estándar en los resultados. No existe una diferencia significativa en el poder detergente al utilizar sonificado como acción mecánica.
- **Elementos esenciales del sistema detergente.** El porcentaje detergente es influenciado de manera significativa por el tipo de sustrato, la suciedad y la interacción de ambos.

La agitación toma un papel importante dentro del mecanismo y todas sus fases, observándose algunos efectos como:

- Aumento de la detergencia, incluso, de 2 a 3 veces mayor sobre aquellas que no tienen agitación. La agitación promueve una mayor transferencia de suciedad al medio y promueven la dispersión de la suciedad.
- Aumento en el desprendimiento de la suciedad y disminución de la redeposición de la misma sobre el sustrato. Las partículas dispersadas mediante la agitación mecánica son inestables, por lo que es fundamental el enjuague para evitar la redeposición de las mismas sobre el sustrato.

Por otro lado, las mediciones de la dispersión de luz dinámica y la turbidez, no permiten distinguir el hinchamiento de las micelas debido a la encapsulación del aceite.

Apéndice A

Gráficas con datos de literatura

Graficas de Detergencia vs. Sonicado, referencia [68]

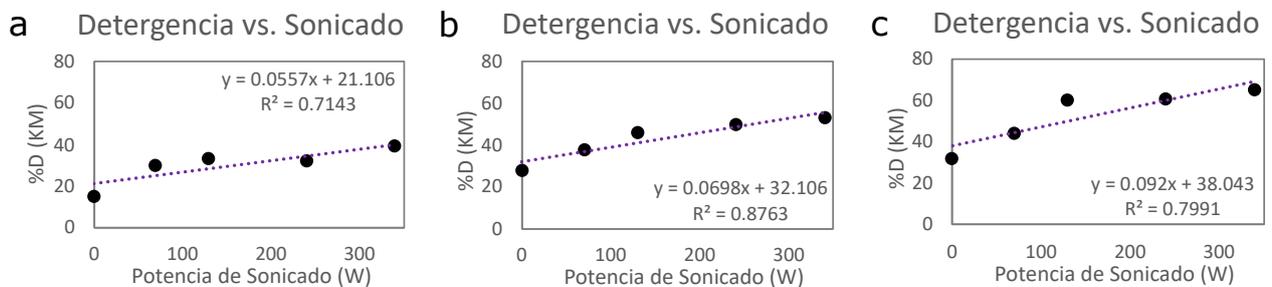


Figura A.1: Graficas Detergencia vs. Sonicado, poliéster 30A y suciedad de ácido oleico-sudan III. a) Sin agitación b) Agitación a 120 RPM c) Agitación a 160 RPM. Datos extraídos de la referencia [68]

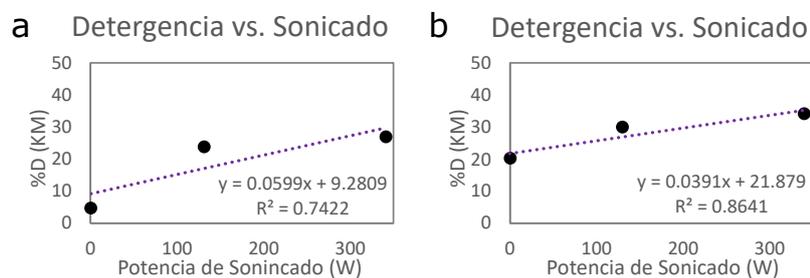


Figura A.2: Graficas Detergencia vs. Sonicado, algodón 10A y suciedad de ácido oleico-sudan III. a) Sin agitación b) Agitación a 160 RPM. Datos extraídos de la referencia [68]

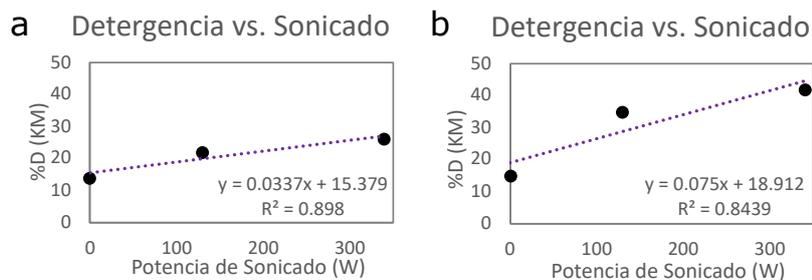


Figura A.3: Graficas Detergencia vs. Sonicado, algodón 10A y suciedad de Negro de carbón. a) Sin agitación b) Agitación a 160 RPM. Datos extraídos de la referencia [68]

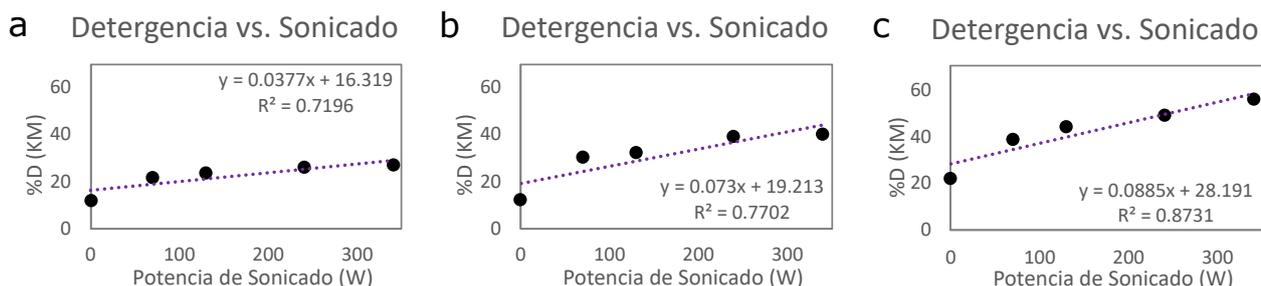


Figura A.4: Graficas Detergencia vs. Sonicado, poliéster 30A y suciedad de Negro de carbón. a) Sin agitación b) Agitación a 120 RPM c) Agitación a 160 RPM. Datos extraídos de la referencia [68]

Graficas de Detergencia vs. Agitado, referencia [68]

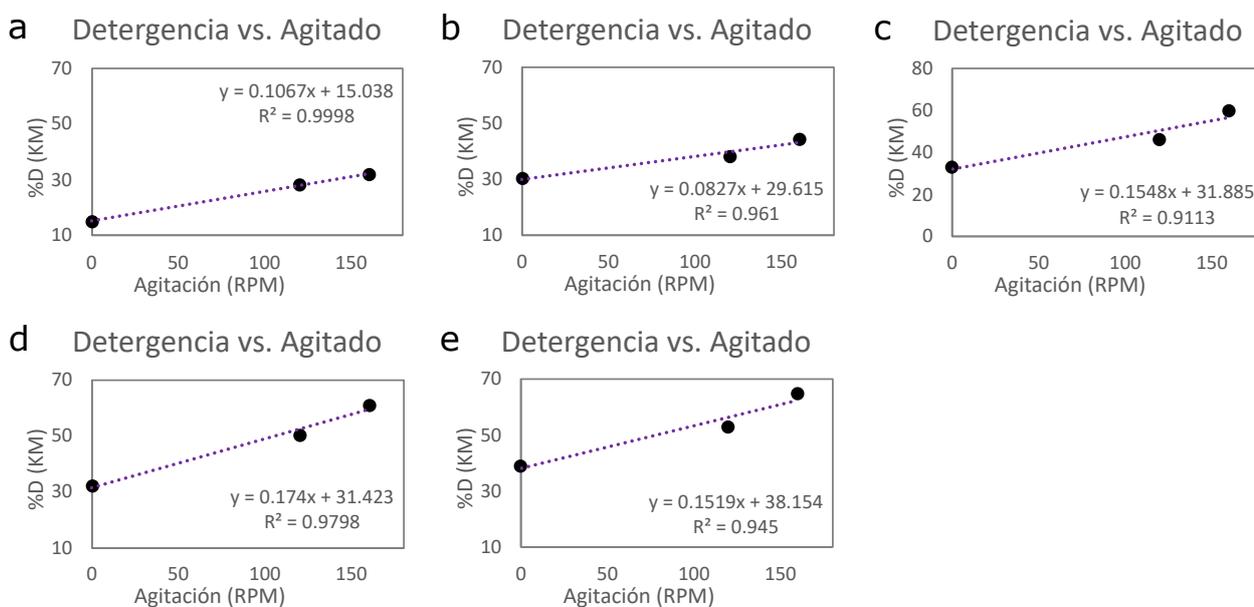


Figura A.5: Graficas Detergencia vs. Agitado, poliéster 30A y suciedad de ácido oleico-sudan III. a) Sin sonicado b) Con sonicado a 70 W c) Con sonicado a 130 W d) Con sonicado a 240 W e) Con sonicado a 340 W. Datos extraídos de la referencia [68]

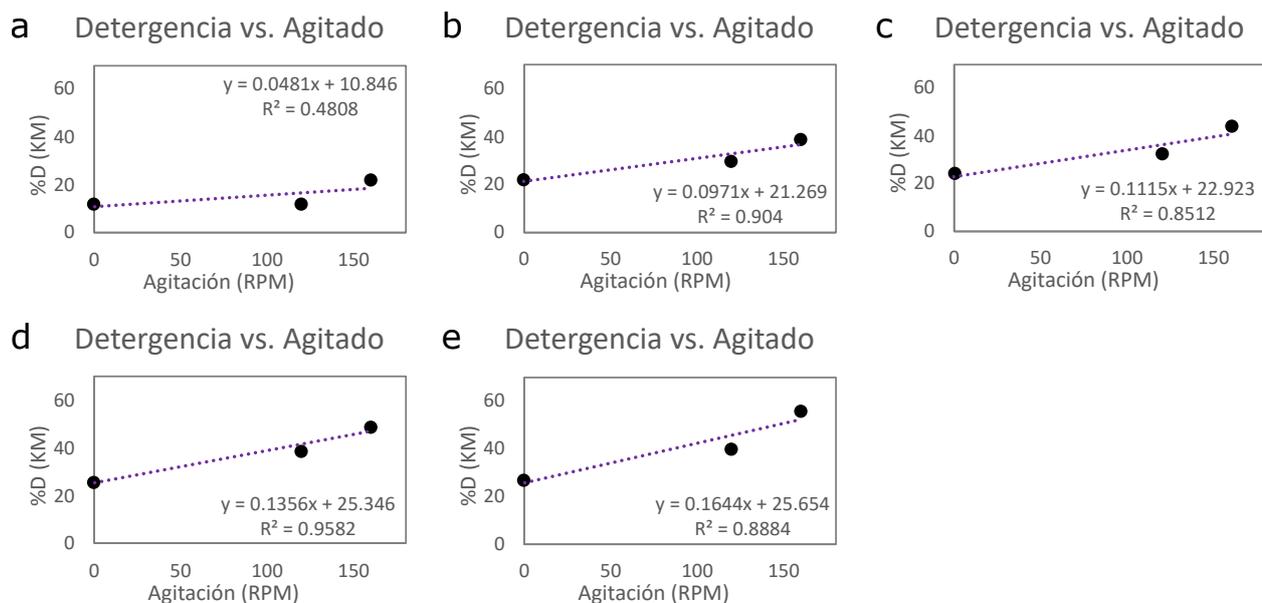


Figura A.6: Graficas Detergencia vs. Agitado, poliéster 30A y suciedad de Negro de carbón. a) Sin sonicado b) Con sonicado a 70 W c) Con sonicado a 130 W d) Con sonicado a 240 W e) Con sonicado a 340 W. Datos extraidos de la referencia [68]

Graficas de Detergencia y tipos de suciedades, referencia [68]

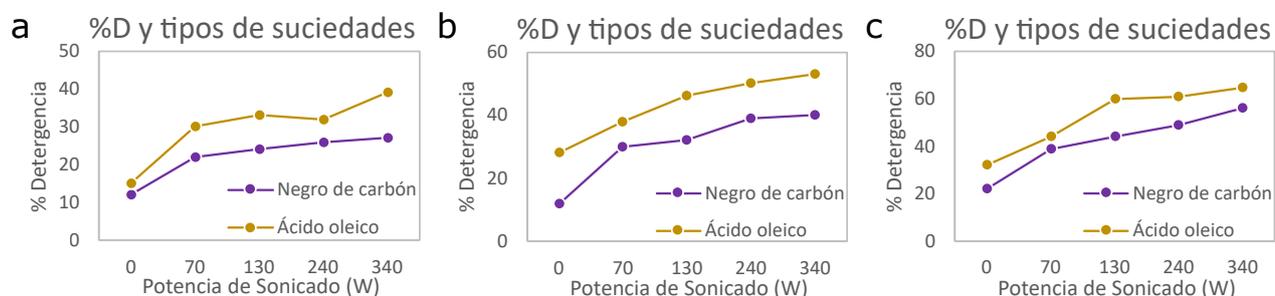


Figura A.7: Graficas Detergencia y suciedades ácido oleico y negro de carbón, poliéster 30A. a) Sin agitación b) Agitación a 120 RPM c) Agitación a 160 RPM. Datos extraidos de la referencia [68]

Apéndice B

Tablas de resultados experimentales

Tabla B.1: Masas de la parte experimental “comparación del método”.

Tela	Experimento	m_0 [S] (g)	m_1 [S_D] (g)	m_2 [S_L] (g)	$m_1 - m_2$ (g)	$m_1 - m_0$ (g)	$m_2 - m_0$ (g)	% D	Promedio (%)	Desv. Std.
1	-	1.880	2.083	1.953	0.130	0.203	0.073	63.875	54.775	8.117
2	-	1.866	2.066	1.962	0.104	0.200	0.096	52.167		
3	-	1.870	2.064	1.970	0.094	0.194	0.100	48.282		
4	Sonicado	1.878	2.066	1.949	0.117	0.188	0.071	62.411	62.216	0.184
5	Sonicado	1.869	2.071	1.946	0.125	0.202	0.077	62.046		
6	Sonicado	1.857	2.058	1.933	0.125	0.201	0.076	62.189		
7	Ag + Son	1.857	2.062	1.929	0.133	0.205	0.072	64.715	70.538	5.563
8	Ag + Son	1.849	2.052	1.908	0.144	0.203	0.059	71.100		
9	Ag + Son	1.924	2.143	1.977	0.166	0.219	0.053	75.799		
10	Agitado	1.900	2.121	1.944	0.178	0.221	0.043	80.392	80.299	1.000
11	Agitado	1.908	2.142	1.952	0.191	0.235	0.044	81.250		
12	Agitado	1.895	2.128	1.943	0.185	0.233	0.048	79.256		

Tabla B.2: Blancura y detergencia Kubelka-Munk en la parte experimental “Verificación experimental del mecanismo de detergencia”.

Experimento	Tela	Reflectancia	Desv. Std.	K/S	%D (S_L)	%D (S_W)
Agitado	S	196.436	20.766	97.221	50.281	68.178
	S_D	173.986	11.790	85.996		
	S_L	185.274	9.481	91.640		
	S_W	189.292	29.529	93.649		
No agitado	S	199.533	23.987	98.769	32.206	32.797
	S_D	169.244	20.76	83.625		
	S_L	178.999	26.373	88.502		
	S_W	179.178	26.051	88.592		

Tabla B.3: Blancura y detergencia Kubelka-Munk en la parte experimental “comparación del método”.

Tela	Experimento	In.	Reflectancia	Desv. Std.	K/S	% D(KM)	Promedio	Desv. Std.
1	-	S	220.306	13.843	109.155	31.776		
	-	S_D	160.069	15.658	79.038			
	-	S_W	179.210	28.136	88.608			
2	-	S	215.983	22.983	106.994	37.931	34.810	3.079
	-	S_D	182.852	21.848	90.429			
	-	S_W	195.419	26.113	96.712			
3	-	S	219.764	14.407	108.884	34.722		
	-	S_D	173.716	24.933	85.861			
	-	S_W	189.705	22.930	93.855			
4	Sonicado	S	220.755	21.615	109.380	41.987		
	Sonicado	S_D	156.669	12.414	77.338			
	Sonicado	S_W	183.577	27.701	90.791			
5	Sonicado	S	218.677	20.320	108.341	37.292	38.142	3.498
	Sonicado	S_D	185.946	12.065	91.976			
	Sonicado	S_W	198.152	14.029	98.079			
6	Sonicado	S	194.374	11.086	96.190	35.148		
	Sonicado	S_D	184.695	12.277	91.350			
	Sonicado	S_W	188.097	19.057	93.051			
7	Ag + Son	S	202.236	8.115	100.120	45.527		
	Ag + Son	S_D	181.734	18.097	89.870			
	Ag + Son	S_W	191.068	16.356	94.537			
8	Ag + Son	S	193.011	23.639	95.508	76.178	68.274	20.003
	Ag + Son	S_D	163.173	17.735	80.590			
	Ag + Son	S_W	185.903	27.070	91.954			
9	Ag + Son	S	219.004	10.266	108.504	83.117		
	Ag + Son	S_D	182.529	15.745	90.267			
	Ag + Son	S_W	212.846	29.247	105.425			
10	Agitado	S	195.902	15.483	96.954	69.125		
	Agitado	S_D	166.694	16.394	82.350			
	Agitado	S_W	186.884	22.985	92.445			
11	Agitado	S	206.149	10.267	102.077	64.527	69.835	5.697
	Agitado	S_D	152.125	22.070	75.066			
	Agitado	S_W	186.985	23.664	92.495			
12	Agitado	S	209.639	16.329	103.822	75.854		
	Agitado	S_D	153.237	15.440	75.622			
	Agitado	S_W	196.02	34.574	97.013			

Apéndice C

Histogramas

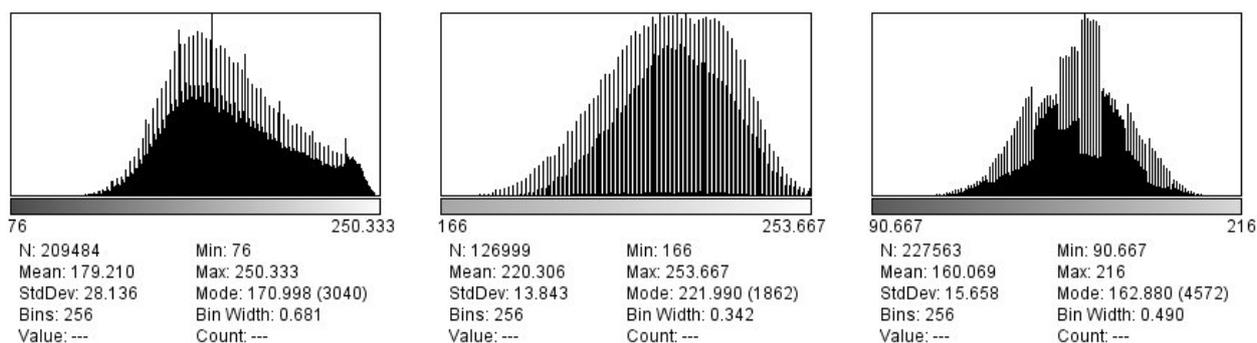


Figura C.1: Histogramas Tela 1. De izquierda a derecha Bl₁, Bl₂ y Bl₃

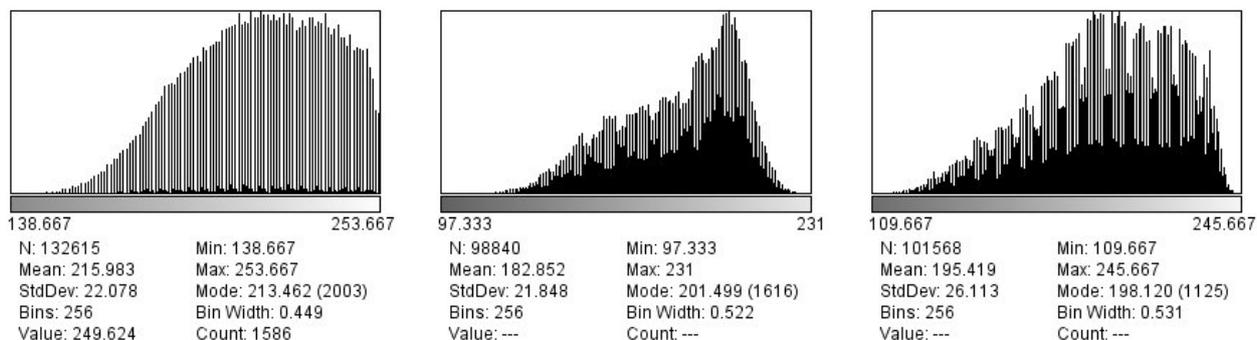


Figura C.2: Histogramas Tela 2. De izquierda a derecha Bl₁, Bl₂ y Bl₃

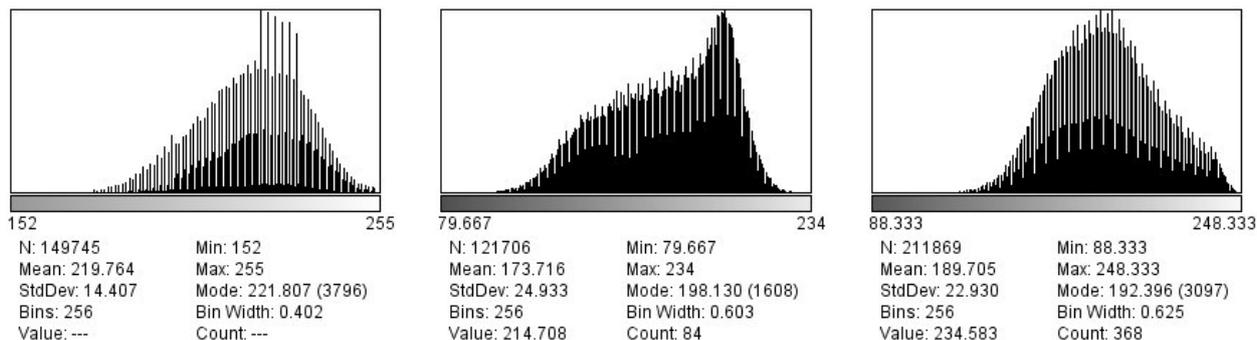


Figura C.3: Histogramas Tela 3. De izquierda a derecha Bl₁, Bl₂ y Bl₃

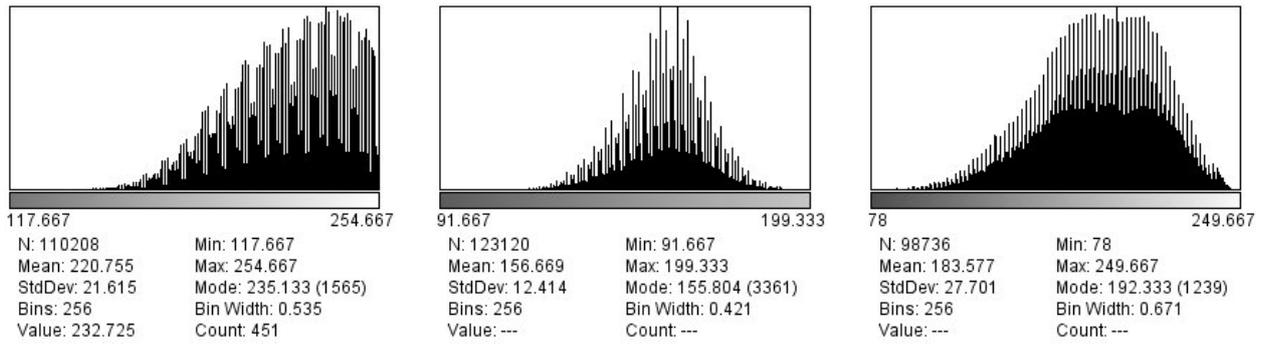


Figura C.4: Histogramas Tela 4. De izquierda a derecha Bl₁, Bl₂ y Bl₃

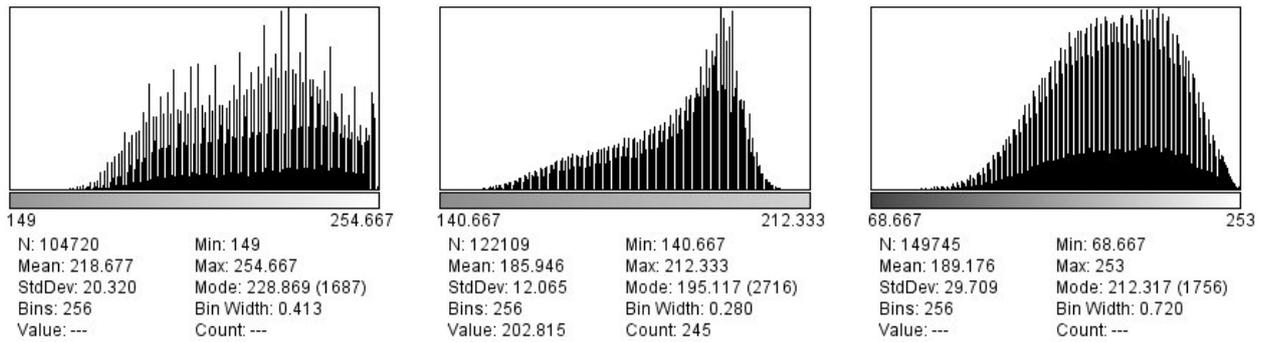


Figura C.5: Histogramas Tela 5. De izquierda a derecha Bl₁, Bl₂ y Bl₃

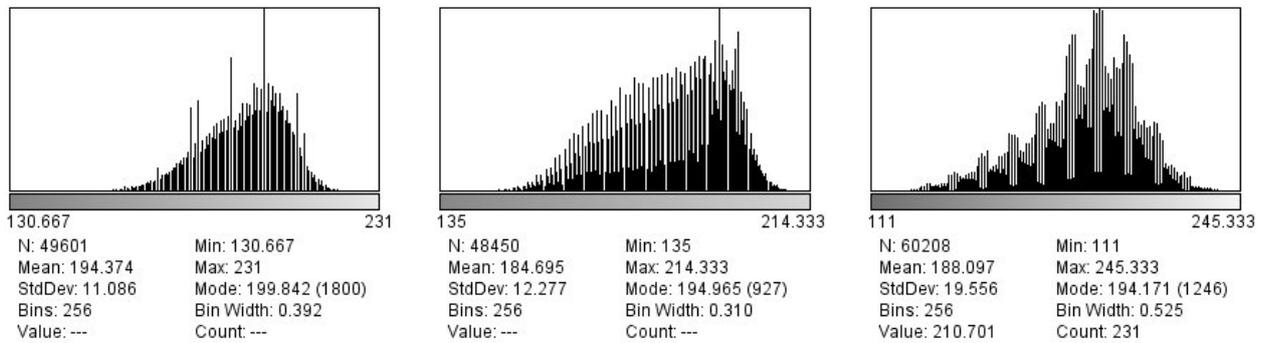


Figura C.6: Histogramas Tela 6. De izquierda a derecha Bl₁, Bl₂ y Bl₃

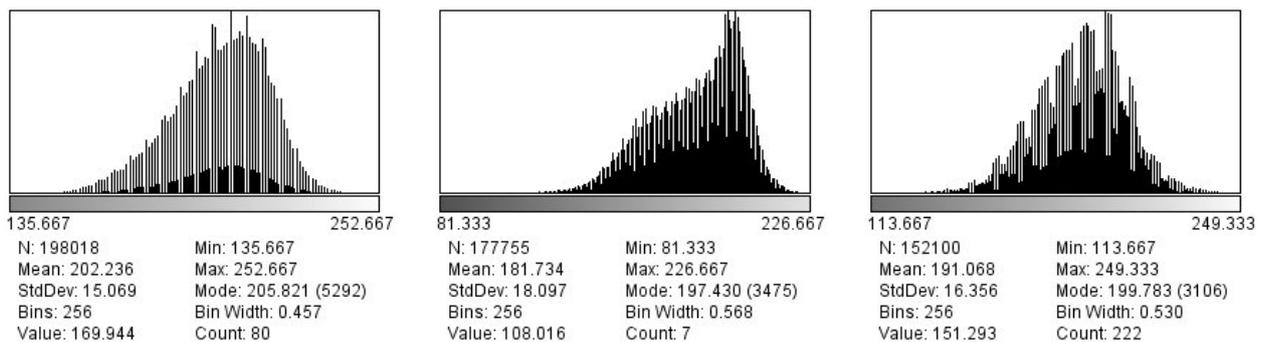


Figura C.7: Histogramas Tela 7. De izquierda a derecha Bl₁, Bl₂ y Bl₃

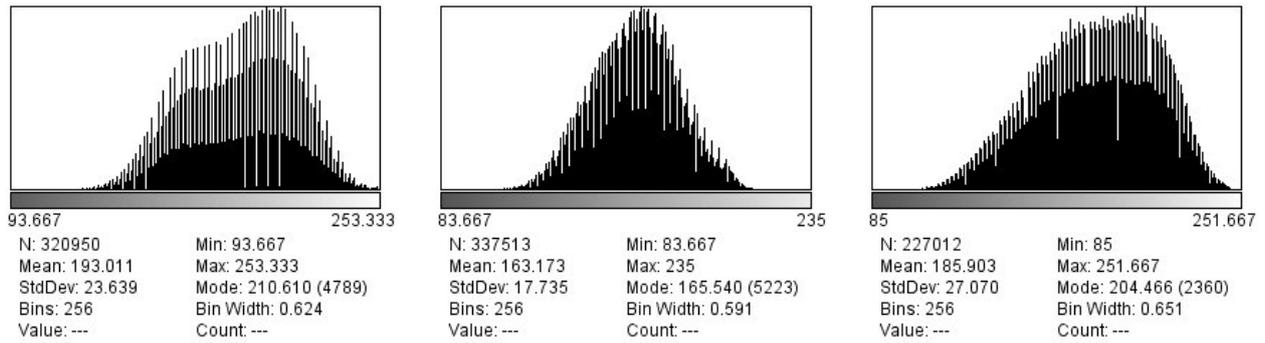


Figura C.8: Histogramas Tela 8. De izquierda a derecha Bl₁, Bl₂ y Bl₃

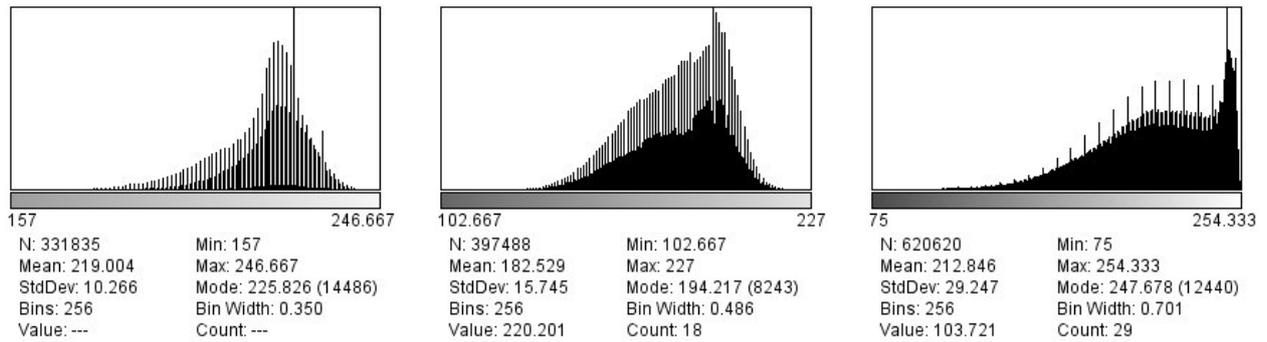


Figura C.9: Histogramas Tela 9. De izquierda a derecha Bl₁, Bl₂ y Bl₃

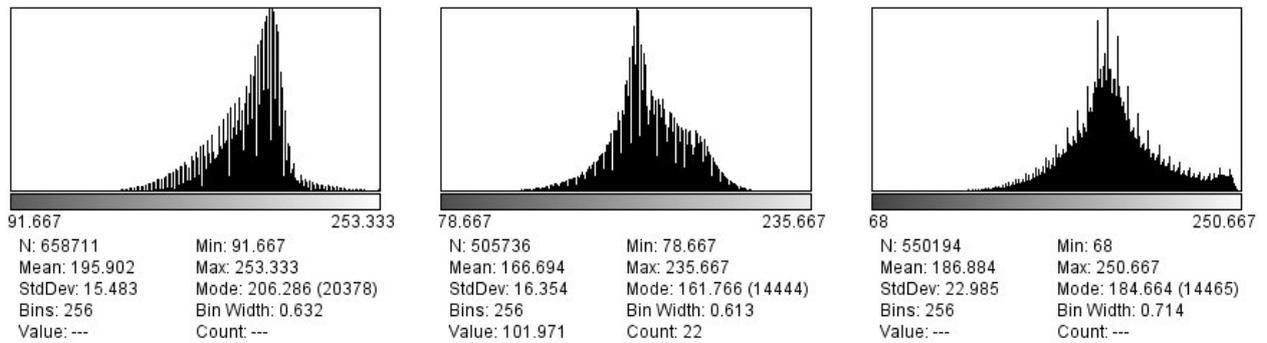


Figura C.10: Histogramas Tela 10. De izquierda a derecha Bl₁, Bl₂ y Bl₃

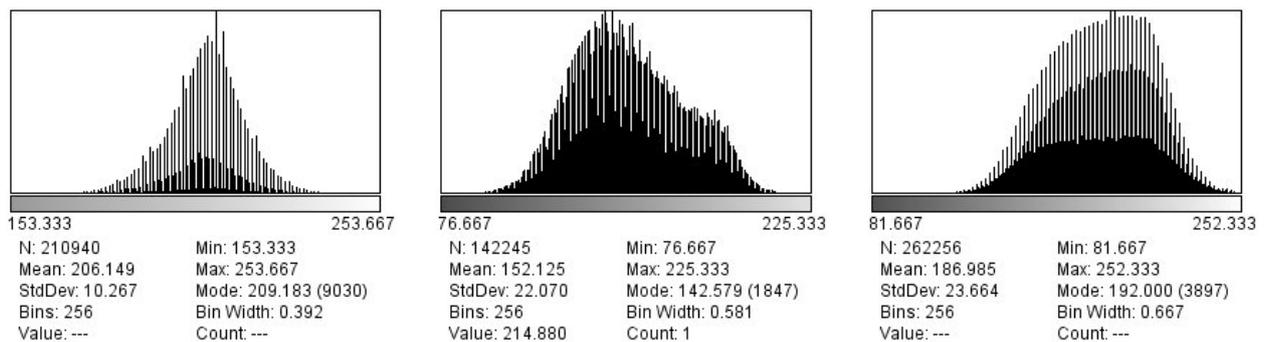


Figura C.11: Histogramas Tela 11. De izquierda a derecha Bl₁, Bl₂ y Bl₃

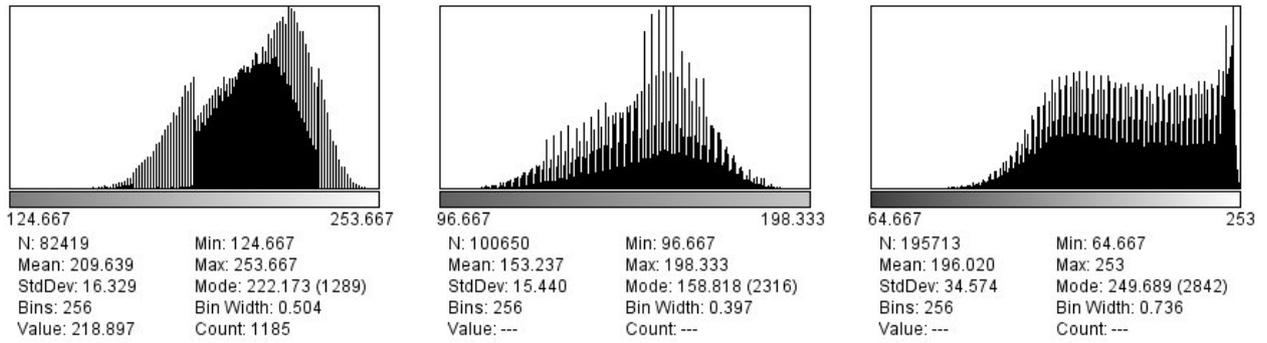


Figura C.12: Histogramas Tela 12. De izquierda a derecha Bl₁, Bl₂ y Bl₃

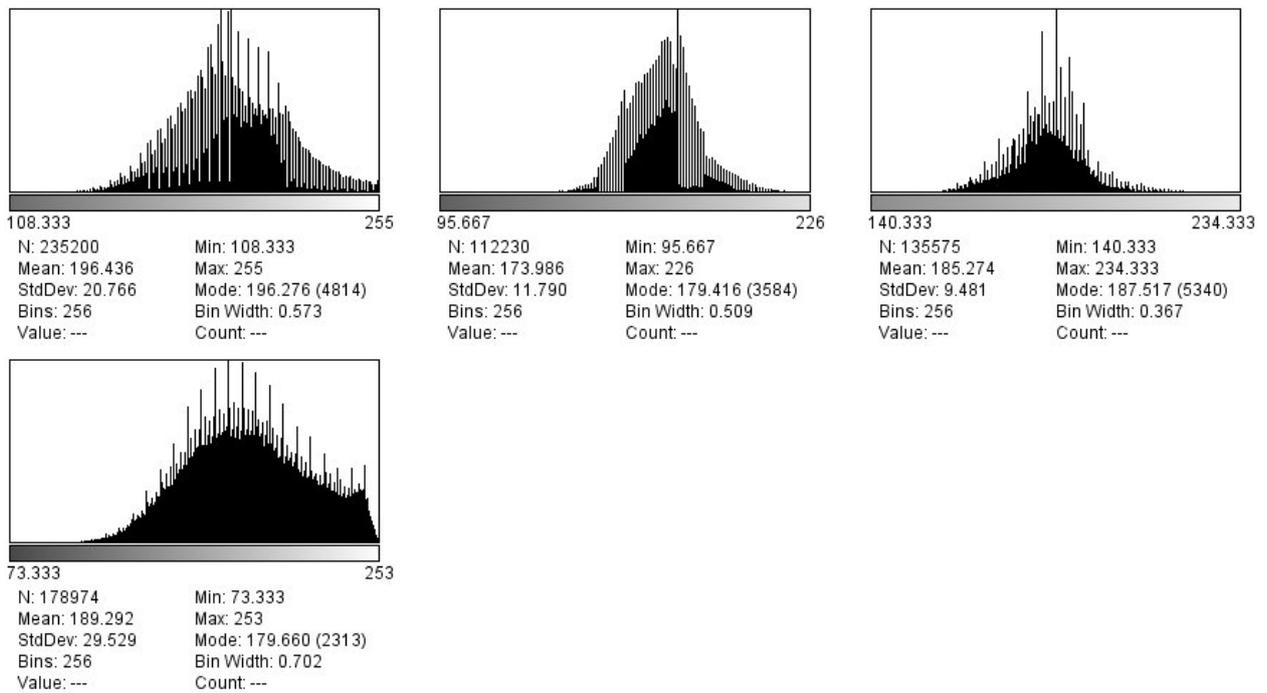


Figura C.13: Histogramas Tela Mecanismo 1. De izquierda a derecha Bl₁, Bl₂, Bl₃ y abajo Bl₄

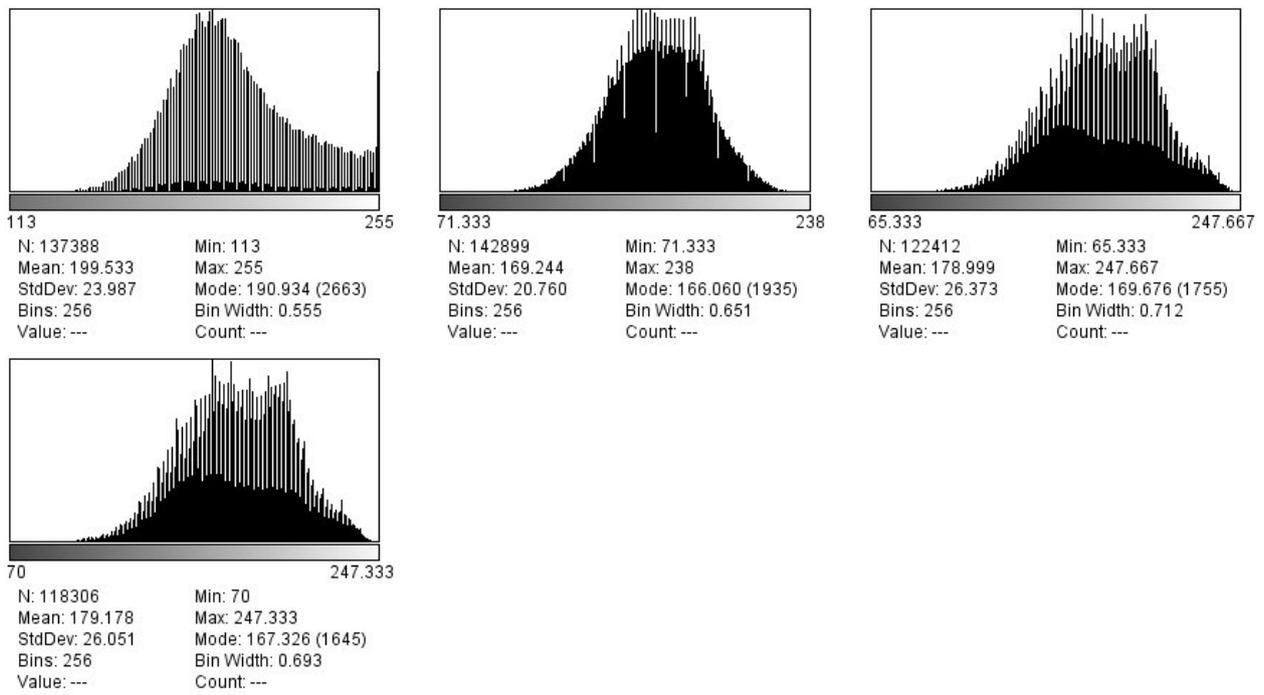


Figura C.14: Histogramas Tela Mecanismo 2. De izquierda a derecha Bl₁, Bl₂, Bl₃ y abajo Bl₄

Apéndice D

Microscopía Electrónica de Barrido

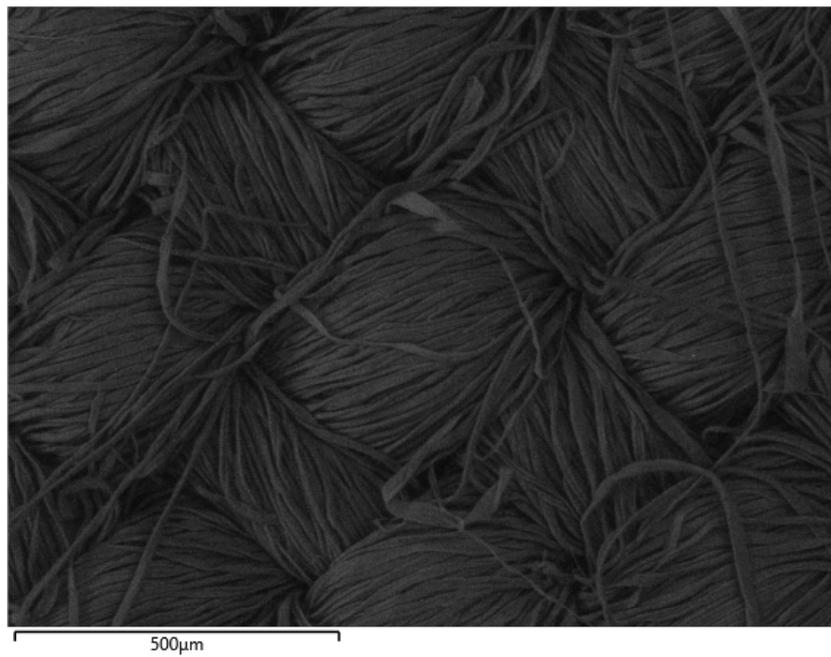


Figura D.1: Microscopía Electrónica de Barrido del Sustrato.

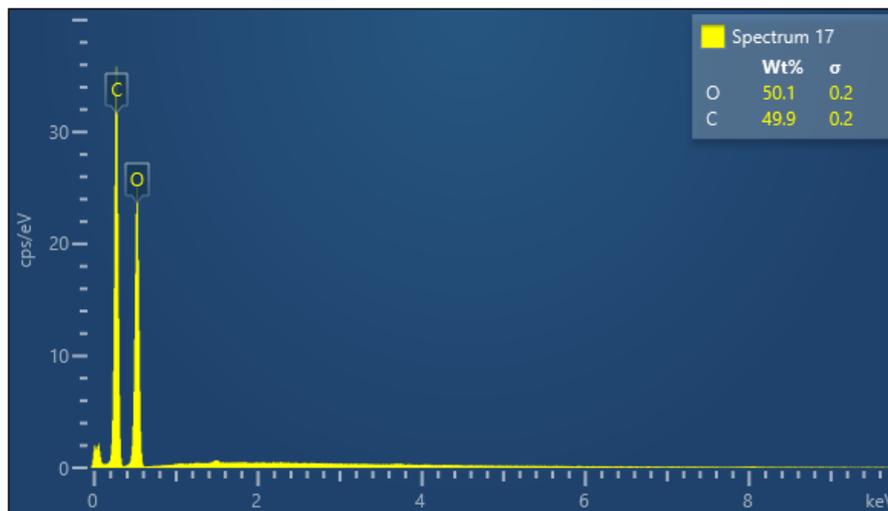


Figura D.2: Espectro de Emisión de Electrones del sustrato

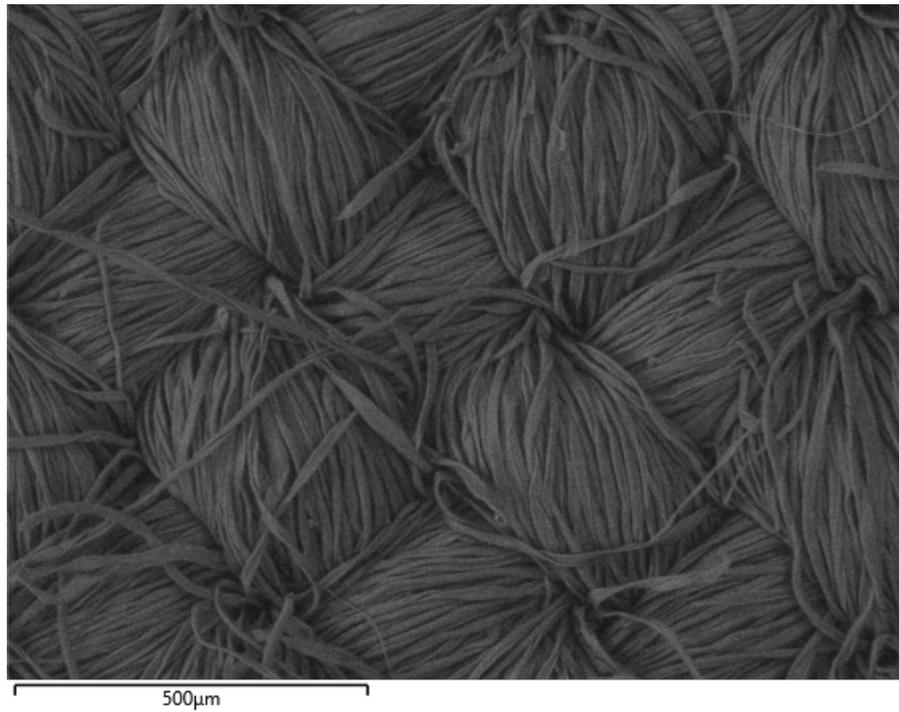


Figura D.3: Microscopía Electrónica de Barrido del sustrato lavado.

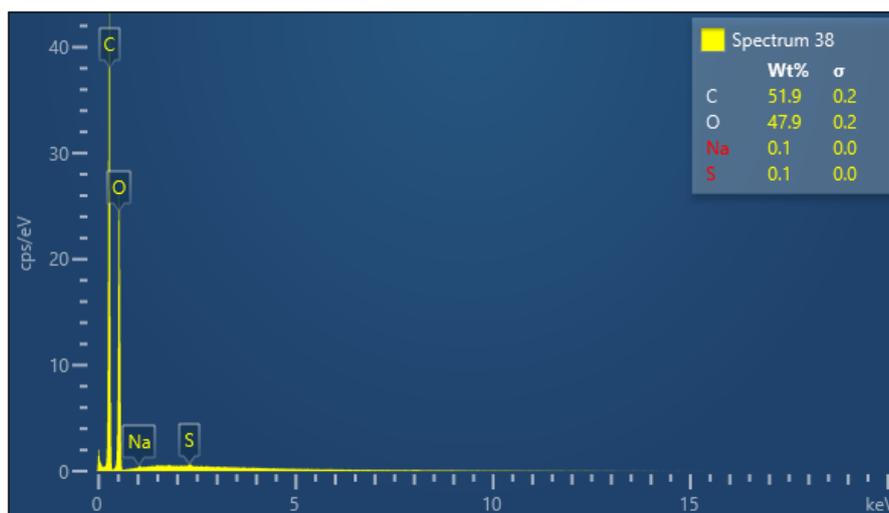


Figura D.4: Espectro de Emisión de Electrones del sustrato lavado

Referencias

- [1] Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación y a la Industria (USAI). I.Q. Rafael Iván Puente Lee. Microscopía electrónica de barrido, 2022.
- [2] Luis Spitz. *Sodeopec: Soaps, Detergents, Oleochemicals, and Personal Care Products*. AOCS Publishing, 2004.
- [3] Ana Carolina Kogawa, Beatriz Gamberini Cernic, Leandro Giovanni Domingos do Couto, and Hérica Regina Nunes Salgado. Synthetic detergents: 100 years of history. *Saudi Pharmaceutical Journal*, 25(6):934–938, 2017.
- [4] D.R. Karsa. *Industrial Applications of Surfactants IV (Special Publications) (Vol 4)*. Royal Society of Chemistry, 1 edition, 1999.
- [5] Preferred fiber & materials. market report 2021. Technical report, Textile Exchange.
- [6] Colección de estudios sectoriales y regionales. conociendo la industria textil y de la confección. In *Conociendo la industria*. INEGI y la Cámara Nacional de la Industria Textil (CANAINTEX), March 2020.
- [7] Cámara Nacional de la Industria Textil. Información estadística, agosto 2021.
- [8] Giers S. Pacifico, C. Surfactants used in textile applications. *J Am Oil Chem Soc*, (32):231–235, 1955.
- [9] A.R. Horrocks and S.C. Anand. *Handbook of Technical Textiles*. Woodhead Publishing Series in Textiles. Elsevier Science, 2000.
- [10] Xin Ren. Development of environmental performance indicators for textile process and product. *Journal of Cleaner Production*, 8(6):473 – 481, 2000.
- [11] S.R. Karmakar. *Chemical Technology in the Pre-Treatment Processes of Textiles*. Textile science and technology 12. Elsevier, 1st ed edition, 1999.
- [12] Y.L. Hsieh S. Gordon. *Cotton Science and technology*. Woodhead Publishing in Textiles. CRC Press, 1 edition, 2007.
- [13] Ravindra Adivarekar Mohammad Shahid. *Advances in Functional Finishing of Textiles*. Springer Singapore;Springer, 2020.
- [14] Anis P. Toprak T. Textile industry’s environmental effects and approaching cleaner production and sustainability, an overview. *J Textile Eng Fashion Technol*, 2017.
- [15] Norma oficial mexicana nom-cca-014-ecol/1993, establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la industria textil.

- [16] Uri Zoller. *Handbook of Detergents, Part B: Environmental Impact (Surfactant Science Series)*. CRC Press, 1 edition, 2004.
- [17] Amusa H.K. Oyehan T.A. et al. Badmus, S.O. Environmental risks and toxicity of surfactants: overview of analysis, assessment, and remediation techniques. *Environ Sci Pollut Res*, 2021.
- [18] Tanaka T. & Oya M. Fujimoto, A. Analysis of cleaning process for several kinds of soil by probability density functional method. *Journal of Oleo Science*, 2017.
- [19] Inoue Y. & Higasitsuji K. Tagaya, H. Study of soil removal mechanism using a chromatography technique. ii. the influence of substrate on the mechanism for oily soil removal. *Nippon kagaku kaishi*, 1996.
- [20] Scamehorn J. F. Sabatini D. A. & Chavadej S. Chanwattanakit, J. Laundry detergency of solid nonparticulate soil or waxy solids: Part ii. effect of the surfactant type. *Journal of Surfactants and Detergents.*, 2019.
- [21] E. Kissa. Kinetics of oily soil release. *Textile Research Journal*, 1971.
- [22] Sureeporn Rojvoranun, Sumaeth Chavadej, John F. Scamehorn, and David A. Sabatini. Mechanistic studies of particulate soil detergency: Ii: Hydrophilic soil removal. *Journal of Surfactants and Detergents*, 15(6):663–677, 2012.
- [23] Chadavipoo C. Pengjun W. Chavadej S. Scamehorn J. F. & Sabatini D. A. Rojvoranun, S. Mechanistic studies of particulate soil detergency: I. hydrophobic soil removal. *Journal of Surfactants and Detergents*, 2011.
- [24] S. K. Chi, Y. S. & Obendorf. Effect of fiber substrates on appearance and removal of aged oily soils. *Journal of Surfactants and Detergents*, 2001.
- [25] J. Obendorf, S. K. & Borsa. Lipid soil removal from cotton fabric after mercerization and carboxymethylation finishing. *Journal of Surfactants and Detergents*, 2001.
- [26] S. K. Chi, Y. S. y Obendorf. Aging of oily soils on textile materials: A literature review. *Journal of Surfactants and Detergents*, 1998.
- [27] S. K. Choe Park, E. K. & Obendorf. Chemical changes in unsaturated oils upon aging and subsequent effects on fabric yellowing and soil removal. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 1994.
- [28] Clarence A. Miller and Kirk H. Raney. Solubilization—emulsification mechanisms of detergency. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 74(2):169 – 215, 1993.
- [29] B. J. Carroll. Physical aspects of detergency. *Elsevier Science Publishers*, 1993.
- [30] H. Schott. Comments regarding the washability of cotton and the rolling-up mechanism of detergency. *Textile Research Journal*, 1969.
- [31] Hoshino E. Yokosuka M. & Suzuki A. Murata, M. New detergent mechanism with use of novel alkaline cellulose. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 1991.
- [32] Koda H. Kato A. & Koma T. Kame, M. Detergency and mechanism of soil removal in detergent-enzyme system. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 1973.

- [33] Fischer E. K. Ryan M. E. & Campbell G. H. Utermohlen, W. P. Detergency studies. *Textile Research Journal*, 1949.
- [34] E. Kissa. Kinetics and mechanisms of detergency part i: Liquid hydrophobic (oily) soils. *Textile Research Journal*, 1975.
- [35] E. Kissa. Kinetics and mechanisms of detergency part ii: Particulate soil. *Textile Research Journal*, 1978.
- [36] E. Kissa. Kinetics and mechanisms of detergency part iii : Effect of soiling conditions on particulate soil detergency. *Textile Research Journal*, 1979.
- [37] E. Kissa. Mechanisms of soil release. *Textile Research Journal*, 1981.
- [38] Eduardo José Nesakumar Sandeep Saxena. Fabric-scouring composition and method of use, 2017.
- [39] Esmat Koohsaryan y Mansoor Anbia y Mohammad Maghsoodlu. Application of zeolites as non-phosphate detergent builders: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5):104287, 2020.
- [40] Anthony M. Schwartz. Principles of detergency and their application in textile processin. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 1949.
- [41] Carlos Gómez Herrera. Detergencia. sus principales mecanismos. *Grasas y Aceites*, 1996.
- [42] Milton J. Rosen. *Surfactants and Interfacial Phenomena*. Wiley-Interscience, 3rd ed edition, 2004.
- [43] Jean Louis-Salager. Surfactantes. Technical report, Laboratorio FIRP Escuela de Ingeniería Química, 2002.
- [44] Divya Bajpai and V.K. Tyagi. Laundry detergents: An overview. *Journal of Oleo Science*, 56(7):327–340, 2007.
- [45] National Center for Biotechnology Information. Pubchem compound summary for cid 3423265, sodium dodecyl sulfate., December 2021.
- [46] Hans Schott. Extensión de la hidratación de éteres en solución acuosa. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 1966.
- [47] Ph.D. Lim, Jong-Choo. Phase equilibrium, dynamic behavior and detergency in surfactant systems. Master's thesis, Rice University, 1991.
- [48] Iram Mondaca Fernández José de Jesús Balderas Cortés Héctor Riojas González, Pablo Gortáres Moroyoqui. Sinergia en surfactantes para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos. *Anales de Química de la RSEQ*, 2011.
- [49] Sinergia en surfactantes para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos. Riojas g. h., gortáres m. p., mondaca f. i. y balderas c. j-j. *Anales de Química de la RSEQ*, 2011.
- [50] W. Presto, W. C. & Preston. Some correlating principles of detergent action. *The Journal of Physical and Colloid Chemistry*, 1948.
- [51] J. W. McBain. *Advances in Colloid Science*. Interscience Publishers, Inc., New York, 1942.

- [52] B. A. Cameron. Laundering in cold water: Detergent considerations for consumers. *Family and Consumer Sciences Research Journal*, 2007.
- [53] Chaabouni M. Sergent M. Phan-Tan-Luu R. Kamoun, A. Mixture design applied to the formulation of hydrotropes for liquid detergents. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2002.
- [54] Norma internacional ISO 862:1984(en). *Surface active agents: Vocabulary*, 1984.
- [55] ASTM D 4008-95 (2003). Standard test method for measuring anti-soil deposition properties of laundry detergents (not suitable for detergent ranking). Standard, ASTM, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003.
- [56] Amandeep Saini, Cassandra Rauert, Myrna J. Simpson, Stuart Harrad, and Miriam L. Diamond. Characterizing the sorption of polybrominated diphenyl ethers (pbdes) to cotton and polyester fabrics under controlled conditions. *Science of The Total Environment*, 563-564:99 – 107, 2016.
- [57] National Center for Biotechnology Information. Pubchem compound summary for cid 445639, oleic acid. PubChem, December 2021.
- [58] National Center for Biotechnology Information. Pubchem compound summary for cid 65182, Nile red., December 2021.
- [59] P. Greenspan. Rojo nilo: una tinción fluorescente selectiva para las gotitas de lípidos intracelulares. *The Journal of Cell Biology*,, 1985.
- [60] Jane Lewis and Dinah Eastop. Mixtures of anionic and non-ionic surfactants for wet-cleaning historic textiles: A preliminary evaluation with standard soiled wool and cotton test fabrics. *The Conservator*, 25(1):73–89, 2001.
- [61] Willie L. Hinze and Edmondo Pramauro. A critical review of surfactant-mediated phase separations (cloud-point extractions): Theory and applications. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 24(2):133–177, 1993.
- [62] Jean Louis-Salager. Detergencia: Fenómenos y mecanismos. Technical report, Laboratorio FIRP Escuela de Ingeniería Química, 1988.
- [63] T. Lynn, J. L. & Nguyen. Detergents and detergency. *Bailey's Industrial Oil and Fat Products*, 2020.
- [64] J.A Shaeiwitz, A.F-C Chan, E.L Cussler, and D.F Evans. The mechanism of solubilization in detergent solutions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 84(1):47–56, 1981.
- [65] Oscar D. Crisalle Dinesh O. Shah Juan C. López-Montilla, Monica A. James. Surfactants and protocols to induce spontaneous emulsification and enhance detergency. *Journal of Surfactants and Detergents*, 8:45–53, 2005.
- [66] Rejane de Castro Santana, Fabiana A. Perrechil, and Rosiane Lopes da Cunha. High- and low-energy emulsifications for food applications: A focus on process parameters. *Food Engineering Reviews*, 5:107–122, 2013.
- [67] ASTM D 4265-98. Standard guide for evaluating stain removal performance in home laundering. Standard, ASTM, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1998.

- [68] Keiko Gotoh, Kokoro Harayama, and Keiko Handa. Combination effect of ultrasound and shake as a mechanical action for textile cleaning. *Ultrasonics Sonochemistry*, 22:412 – 421, 2015.
- [69] Y. H. Guan, D. L. Lath, T. H. Lilley, D. R. Willmot, I. Marlow, and A. H. Brook. The measurement of tooth whiteness by image analysis and spectrophotometry: a comparison. *Journal of Oral Rehabilitation*, 32(1):7–15, 2005.
- [70] Michelle Everist y Derek G. Leaist Emily Sutherland, Sean M. Mercer. Diffusion in solutions of micelles. what does dynamic light scattering measure? *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2009.
- [71] S.R Reddy and H.S Fogler. Emulsion stability: Determination from turbidity. *Journal of Colloid and Interface Science*, 79(1):101–104, 1981.
- [72] M. Frentzel, R. Shwartz, and N. Garti. Turbidity measurements as a technique for evaluation of water-in-oil emulsion stability. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 3(2):195–207, 1982.
- [73] R.L. Kao, D.T. Wasan, A.D. Nikolov, and D.A. Edwards. Mechanisms of oil removal from a solid surface in the presence of anionic micellar solutions. *Colloids and Surfaces*, 34(4):389–398, 1988.
- [74] Mikkel Killingmoe Christensen Sigbjørn Løland Bore Gregor Diezemann Jürgen Gauss Giuseppe Milano Reidar Lund* Ken Schäfer, Hima Bindu Kolli and Michele Cascella. Supramolecular packing drives morphological transitions of charged surfactant micelles. *Angewandte Chemie*, 2020.
- [75] M.S. Zakerhamidi, S.M. Seyed Ahmadian, and R. Kian. The specific and nonspecific solvatochromic behavior of sudan dyes in different solvents. *Canadian Journal of Chemistry*, 93(6):639–647, 2015.
- [76] Marco Marazzi, Hugo Gattuso, and Antonio Monari. Nile blue and nile red optical properties predicted by td-dft and caspt2 methods: static and dynamic solvent effects. *Theoretical Chemistry Accounts*, 135:1–11, 2016.