



CIENCIA Y TECNOLOGIA



POSGRADO INTERINSTITUCIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA A. C.

*“Obtención de una Correlación entre la Norma AATCC 16-E,
Solidez del Color a la Luz en Fibras Textiles, y la Degradación
de Color con Láser”*

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el grado de

MAESTRÍA EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA
(Opción: Ingeniería Óptica y Tecnología de láseres)

PRESENTA:

ING. MA. ROSARIO GONZÁLEZ MOTA

ASESOR:

DR. JUAN JOSÉ SOTO BERNAL

Aguascalientes, Ags. Marzo del 2004

DEDICATORIAS

A MI ESPOSO GUSTAVO:

Por su gran apoyo, paciencia, comprensión y amor que me ha brindado durante todo este tiempo y que se hizo mas palpable durante el tiempo que duraron mis estudios de maestría.

A MIS HIJOS:

EMILIANO:

Por que con su inocencia y espontaneidad me hace recordar la bello que puede ser la vida.

GUSTAVO:

Por que cuando yo inicié los estudios de maestría, él era un pequeño capullo dentro de mí.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente quiero agradecer al Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología del Estado de Aguascalientes (CONCYTEA), por el apoyo económico brindado durante la duración de mis estudios de maestría.

Agradezco infinitamente el apoyo del Centro de Tecnología Textil, S.A. de C. V. por haberme permitido realizar una parte de este proyecto en sus instalaciones. Quiero mencionar en especial a Clarita Tovar, por la amistad que me ha brindado durante este tiempo, y por su invaluable ayuda y consejos durante la realización de las pruebas comparativas.

Quiero agradecer al Centro de Investigaciones en Óptica A. C. por haberme brindado la oportunidad de realizar mis estudios de maestría en sus instalaciones; agradezco en especial al Dr. Juan José Soto Bernal, por la supervisión y consejos durante el desarrollo del presente trabajo, y al Ing. Carlos Javier Martínez Castro, por su gran motivación al inicio de este reto; ya que sin el, esto no hubiese continuado.

Finalmente y aunque con igual importancia, agradezco a mi familia y amigos que de una u otra forma me apoyaron en la realización del presente trabajo.

ÍNDICE

DEDICATORIAS	i	
AGRADECIMIENTOS	ii	
ÍNDICE	iii	
INTRODUCCIÓN	viii	
CAPÍTULO I EL LÁSER		
1.1	Introducción	1
1.2	Interacción de la Radiación con la Materia	2
1.2.1	Coeficientes de Einstein	3
1.3	Inversión de Población	6
1.4	¿Qué es un láser?	7
1.4.1	Características de la Radiación Láser	8
1.4.2	Elementos de un Láser	10
1.4.3	Oscilación Láser	11
1.5	Sistemas Láser Específicos	12
1.5.1	Láseres de Estado Sólido	12
1.5.2	Láseres de Gas	14
1.5.3	Láseres de Líquidos	15
1.5.4	Láseres de Semiconductores	16
1.6	Referencias Bibliográficas	18

CAPÍTULO II FIBRA ACRÍLICA

2.1	Introducción	19
2.2	Clasificación de las Fibras Textiles	20
2.3	Desarrollo de la Fibra Acrílica	22
2.4	Poliacrilonitrilo	23
2.4.1	Polimerización del Acrilonitrilo	24
2.5	Síntesis del Poliacrilonitrilo Para Uso Como Fibra Textil	27
2.5.1	Hilatura	28
2.6	Enlaces Químicos en las Fibras Textiles	30
2.6.1	Enlaces Primarios	31
2.6.2	Enlaces Secundarios	31
2.7	Estructura Química y Morfología de la Fibra Acrílica	33
2.8	Propiedades de la Fibra Acrílica	35
2.8.1	Propiedades Físicas	35
2.8.2	Propiedades Tensiles	36
2.8.3	Propiedades Ópticas	39
2.8.4	Propiedades Químicas	42
2.8.5	Propiedades Térmicas	42
2.8.6	Interacción de la Fibra con la Humedad	45
2.8.7	Propiedades Espectroscópicas	46
2.9	Efectos de la Radiación en la Estructura del Acrílico y sus Propiedades	48
2.10	Fibras “Outdoors”	50
2.10.1	Pigmentos para Fibras “Outdoors”	51
2.11	Referencias Bibliográficas	55

CAPÍTULO III SOLIDEZ DEL COLOR

3.1	Introducción	59
3.2	Solidez del Color	60
3.2.1	Factores que Afectan las Solideces	60
3.3	Evaluación de la Solidez del Color	61
3.3.1	Escala de Grises para el Cambio de Color	62
3.3.2	Escala de Grises para la Transferencia de Color	63
3.3.3	Solidez del Color Determinada por Medio de Espectrocolorímetro	64
3.4	Solidez del Color a la Luz	64
3.4.1	Variables que Afectan la Solidez del Color a la Luz	66
3.4.2	Contenido de la Norma AATCC-16 Solidez del Color a la Luz	71
3.4.3	Estándares de Lana Azul para Solidez del Color a la Luz	76
3.4.4	Evaluación de la Solidez del Color a la Luz	77
3.5	Referencias Bibliográficas	78

CAPÍTULO IV DESARROLLO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1	Introducción	81
4.2	Desarrollo Experimental	82

4.2.1	Arreglo Experimental	82
4.2.2	Condiciones de Irradiación con Láser de Nd:YAG	84
4.2.3	Condiciones de Irradiación con Láser de Ho:YAG	85
4.2.4	Condiciones de Prueba en la Cámara de Envejecimiento Acelerado	85
4.2.5	Evaluación del Cambio de Color en las Muestras Irradiadas	87
4.3	Análisis de Resultados	88
4.3.1	Resultados Obtenidos de las Muestras Irradiadas con Láser de Nd:YAG	89
4.3.2	Resultados Obtenidos de las Muestras Irradiadas con Láser de Ho:YAG	105
4.3.3	Resultados Obtenidos de las Muestras Sometidas a Envejecimiento Acelerado	119
4.3.4	Conclusiones del Análisis Estadístico	131
4.4	Obtención de la Correlación	131
4.4.1	Escala de Grises Contra el Cambio Total de Color, ΔE^* .	132
4.4.2	Obtención de la Función Polinomial de la Gráfica de Número de Pulsos Contra ΔE^* Obtenida con el Láser de Nd:YAG	132
4.4.3	Obtención de la Función Polinomial de la Gráfica de ΔE^* Contra Número de Horas de Exposición en el “Weather-o-meter”	134
4.5	Referencias Bibliográficas	139

CAPÍTULO V IMPACTO ECONÓMICO

5.1	Estado de Resultados de la Solidez del Color en Cámara de Envejecimiento	140
5.2	Estado de Resultados de la Degradación de Color con Láser	141

CAPÍTULO VI CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

6.1	Conclusiones	143
6.2	Trabajo Futuro	145

	APÉNDICE I	146
--	------------	-----

	APÉNDICE II	164
--	-------------	-----

	APÉNDICE III	169
--	--------------	-----

	APÉNDICE IV	179
--	-------------	-----

	APÉNDICE V	199
--	------------	-----

INTRODUCCIÓN

La evaluación de la calidad del color de los productos textiles, ya sea en prendas de vestir, artículos de decoración, de uso en exteriores o "outdoors", etc., son pruebas de suma importancia, ya que definen la permanencia del color original en la fibra textil antes de que se de una degradación del mismo y aparezca como una prenda muy usada o maltratada.

Las fibras textiles para uso en el exterior, o también llamadas "outdoors", son fibras especialmente diseñadas para soportar gran cantidad de energía solar sin que el color o la fibra misma se degraden; su uso principal es en productos lonas, toldos, carpas, etc. Estas fibras deben tener una alta estabilidad del color a la luz debido al alto nivel de exposición a la radiación solar a la que están expuestas.

Las pruebas de estabilidad del color a las que son sometidas las fibras "outdoors" están regidas bajo normas internacionalmente aceptadas, desarrolladas por asociaciones especializadas en el área textil; la asociación de normalización mas aceptada a nivel mundial es la AATCC ("American Association of Textiles, Chemists and Colourists"), La norma AATCC 16 es la norma utilizada para determinar la solidez del color en fibras "outdoors", con una duración de 2000 horas de tiempo real de exposición, lo que representa 83 días, o casi tres meses, en espera de resultados. Este tiempo de espera es demasiado, sobre todo cuando se tienen lotes de producto en espera de ser entregados al cliente.

La norma AATCC 16 consiste en someter la muestra de prueba en una cámara de envejecimiento acelerado, con determinadas condiciones de temperatura y humedad y con una lámpara de xenón como fuente de radiación. La energía irradiada es absorbida por los colorantes y pigmentos presentes en la fibra, la acumulación de dicha energía o una gran cantidad de ésta, puede romper los enlaces químicos de los colorantes o pigmentos contenidos en las fibras, ocasionando la degradación de éstos, lo que se manifiesta como un cambio de color en la muestra.

La propuesta del presente trabajo de tesis es degradar el color por medio del láser y obtener una correlación entre la degradación de color utilizando el láser y la degradación de color con el método bajo norma.

La degradación de color por medio de láser se realizó probando cuatro láseres diferentes; el láser de Nd:YAG con “Q-Switching”, se descartó porque fundía la fibra, El láser de CO₂ también fue utilizado, siendo descartado porque evaporaba la fibra, haciendo que el tejido pareciera más abierto. Los láseres de Ho:YAG y Nd:YAG, en forma pulsada, cada láser se operó a condiciones diferentes teniendo cuidado de no degradar la fibra.

Las pruebas comparativas de estabilidad del color se realizaron en la cámara de envejecimiento acelerado o “weather-o-meter” bajo las condiciones que marca la norma.

La degradación del color se cuantificó usando la ecuación de color CIEL*a*b*, tomando como parámetro principal el cambio total de color, ΔE^* .

Para obtener la correlación entre ambos métodos, se graficó el número de pulsos láser depositados en la tela contra el ΔE^* , obteniendo su función polinomial que nos describe el comportamiento de ΔE^* en función del número de pulsos depositados. Además se graficó el tiempo de exposición en la cámara de envejecimiento acelerado contra ΔE^* , obteniendo la función polinomial de ΔE^* en función del tiempo de exposición.

El ΔE^* del método de degradación de color con láser, se relaciona directamente con el ΔE^* de la cámara de envejecimiento, con lo cual conocemos el tiempo de exposición en la cámara de envejecimiento acelerado que causaría el mismo cambio de color.

Al lograr obtener la correlación entre el método propuesto y el método bajo norma, se tiene un método para evaluar estabilidad del color a la luz más rápido que el método bajo norma, pero igual de confiable, ya que ambos están relacionados.

El estudio económico comparativo realizado entre la prueba bajo norma y el método propuesto en la presente investigación, se demuestra que de implementarse esta propuesta, se tendría un ahorro de más del 90%. Este ahorro indica que el método también es económicamente viable.

ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

El presente trabajo de tesis esta organizado en seis capítulos. El primer capítulo contiene una breve descripción del funcionamiento del láser, de los elementos que lo componen y finalmente una descripción de algunos sistemas láser específicos.

En el capítulo dos se describen las características más importantes de la fibra acrílica, su desarrollo a nivel mundial, el método de polimerización, sus propiedades más importantes, además de las características de las fibras “outdoors”.

El capítulo tres contiene los aspectos básicos de las solideces en general y de la solidez a la luz en particular, se describen los factores que afectan las solideces, la forma de evaluarlas, además se citan los aspectos más importantes de la norma utilizada para evaluar la solidez del color a la luz.

El capítulo cuatro contiene la descripción del experimento realizado, el análisis estadístico de los resultados obtenidos con los diferentes láseres usados y con la cámara de envejecimiento acelerado. Contiene además la función polinomial obtenida de la gráfica de número de pulsos contra la diferencia total de color, y la función polinomial de la gráfica de tiempo de exposición en la cámara de envejecimiento acelerado contra la diferencia total de color.

El capítulo cinco contiene el estado de resultados del estudio económico realizado para la prueba de solidez del color bajo norma y la degradación de color con láser.

El capítulo seis contiene las conclusiones del presente trabajo de tesis y finalmente se plantea parte del trabajo futuro que complementarí­a este primer estudio sobre la solidez del color a la luz por medio de láser.

CAPÍTULO I

EL LÁSER

1.1 INTRODUCCIÓN

La palabra láser es un acrónimo de los aspectos mas significantes de la acción láser: amplificación de la luz por emisión estimulada de la radiación (“Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”). Existen diferentes tipos de láseres, pero todos ellos comparten un elemento crucial: cada uno contiene un material capaz de amplificar la radiación. Este material es llamado medio de ganancia, o medio activo, porque la radiación gana energía, o se amplifica, cuando pasa a través de él. El principio físico responsable de esta amplificación es la emisión estimulada, descubierta por Albert Einstein en 1916 [1].

En 1954 se realizaron los primeros esfuerzos para usar la emisión estimulada con el fin de construir dispositivos prácticos, originando la invención de un amplificador de microondas llamado máser (“Microwave Amplification by the Stimulated Emission of Radiation”). Estos desarrollos se dieron de manera simultánea pero independiente en Estados Unidos, por C.H. Townes, y en Rusia, por A.M. Prokhorov y N.G. Basov.

Después de la construcción de los primeros máser, los científicos se dieron cuenta que las condiciones para producir emisión estimulada en la región visible del espectro eran muy diferentes de las requeridas en un máser. Nuevamente en forma independiente y simultánea A.M. Prokhorov en Rusia y C.H. Townes y A.L. Schawlow en Estados Unidos, desarrollaron, en 1958, los conceptos que describen el láser.

Tres años después, en 1961, T. H. Maiman, de Estados Unidos, construyó físicamente el primer láser usando como medio activo cristales sintéticos de rubí [2].

Desde esta fecha hasta la actualidad se tiene un especial interés por desarrollar nuevos láseres, mejorar los existentes y ampliar sus aplicaciones.

1.2 INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA MATERIA

Para entender la operación de un láser, debemos conocer algunos principios que gobiernan la interacción de la radiación con la materia.

Los sistemas atómicos tales como átomos, iones y moléculas pueden existir solamente en estados discretos de energía. Un cambio de un estado de energía a otro, llamado transición, es asociado con la emisión o absorción de un fotón. La longitud de onda de la radiación absorbida o emitida esta definida por la relación de frecuencia de Bohr:

$$E_2 - E_1 = h\nu_{21} \quad (1.1)$$

donde E_2 y E_1 son los dos niveles discretos de energía, ν_{21} es la frecuencia del fotón y h es la constante de Planck. Una onda electromagnética cuya frecuencia ν_{21} corresponde a la banda de energía de un sistema atómico, puede interactuar con él.

La operación de un láser requiere que la energía de equilibrio de un material láser sea cambiada de tal forma que la energía sea almacenada en los átomos, iones o moléculas de este material. Esto se logra usando una fuente de bombeo externa, la cual transfiere electrones de un nivel más bajo de energía a un nivel más alto, causando una inversión de población. Una onda electromagnética de frecuencia apropiada, incidente en el material láser con población invertida, será amplificada porque los fotones incidentes causarán que los átomos en el nivel más alto de energía caigan al nivel más bajo con la consecuente emisión de fotones adicionales. La liberación de la energía almacenada debido a la interacción con una onda electromagnética está basada en la emisión estimulada.

Los fundamentos de la emisión estimulada han sido descritos por A. Einstein y M. Planck

1.2.1 COEFICIENTES DE EINSTEIN.

Para simplificar la discusión sobre los coeficientes de Einstein vamos a considerar un material ideal, con dos niveles de energía no degenerativos, 1 y 2, los cuales tienen poblaciones de N_1 y N_2 respectivamente. Se supone que el número total de átomos en estos dos niveles es constante

$$N_1 + N_2 = N_{\text{tot}} \quad (1.2)$$

Son permitidas las transferencias radiativas entre los dos niveles de energía, las cuales difieren por $E_2 - E_1 = h\nu_{21}$. Los átomos emiten energía al pasar del estado E_2 al estado base E_1 ; e inversamente las transiciones del estado E_1 al estado E_2 son posibles cuando se absorbe energía. La energía removida o adicionada al átomo aparece como un cuanto de energía $h\nu_{21}$. Es posible identificar tres tipos de interacción entre la radiación electromagnética y un sistema atómico: absorción, emisión espontánea y emisión estimulada, los cuales se explican a continuación.

a) Absorción. Si una onda electromagnética cuasimonocromática de frecuencia ν_{21} pasa a través de un sistema atómico con una banda de energía $h\nu_{21}$, entonces la población del estado de mas baja energía, E_1 pasará al nivel de mas alta energía E_2 a una tasa proporcional a la densidad de radiación $\zeta(\nu)$ y a la población N_1 del nivel E_1 .

$$\delta N_1 / \delta t = -B_{12} \zeta(\nu) N_1 \quad (1.3)$$

Donde B_{12} es el coeficiente de Einstein conocido como la constante de proporcionalidad con dimensiones $\text{cm}^3/\text{s}^2 \text{ J}$.

El producto $B_{12}\zeta(\nu)$ puede ser interpretado como la probabilidad por unidad de frecuencia que las transiciones son inducidas por efecto del campo.

La absorción se da cuando un fotón, un cuanto de radiación cuyo contenido de energía y longitud de onda son características, colisiona con un átomo en un estado de energía E_1 y es absorbido por dicho átomo. El fotón deja de existir y su energía aparece como un incremento de energía en el átomo, que se mueve al estado de

energía E_2 . El proceso de absorción reduce la energía del rayo láser y es ilustrado en la Fig. 1.1

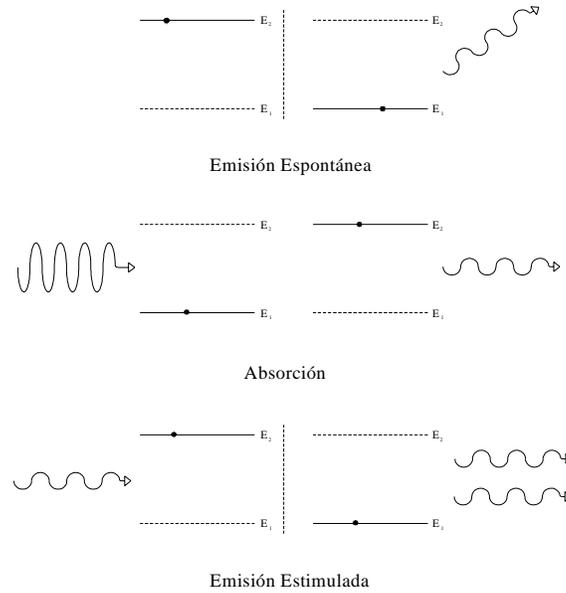


Fig. 1.1 Procesos elementales de interacción entre la radiación electromagnética y un sistema atómico.

- b) Emisión Espontánea. Un átomo excitado, es decir en un nivel energético superior debido al fenómeno de la absorción, es inestable y liberará espontáneamente su exceso de energía para regresar el estado base o E_1 , como se ilustra en la Fig. 1.1. La velocidad de decaimiento es proporcional a la población del nivel de más alta energía.

$$\delta N_2 / \delta t = -A_{21} N_2 \quad (1.4)$$

Donde A_{21} es el coeficiente de Einstein conocido como la constante de proporcionalidad con dimensiones de s^{-1} . La cantidad A_{21} , que es característica del par de niveles de energía en cuestión, es conocida como la probabilidad de transición espontánea porque a partir de ella se obtiene la probabilidad de cambio espontáneo de un átomo en el nivel E_2 al nivel E_1 en una unidad de tiempo.

La emisión espontánea es una función estadística de espacio y de tiempo. No existe una relación de fase entre los procesos de emisión individual, es decir, los cuantos emitidos son incoherentes. La emisión espontánea es caracterizada por el tiempo de vida de un electrón en estado excitado, después del cual espontáneamente decaerá al estado E_1 y liberará energía. En muchos casos, este exceso de energía aparece como un fotón.

- c) Emisión estimulada. La radiación coherente de un láser es producida por el proceso de emisión estimulada. En este caso los átomos excitados son estimulados por una influencia externa para emitir fotones de acuerdo a

$$\delta N_2 / \delta t = -B_{21} \zeta(\nu_{21}) N_2 \quad (1.5)$$

Donde B_{21} es otro coeficiente de Einstein y representa la constante de proporcionalidad.

El agente estimulante es un fotón cuya energía ($E_2 - E_1$) es exactamente igual a la diferencia de energía entre el presente estado de energía del átomo, E_2 y el nivel de energía más bajo, E_1 . Este fotón estimula al átomo a decaer al estado más bajo de energía y emitir un fotón idéntico al fotón estimulante, ambos en fase, ver Fig. 1.1. El fotón emitido tiene la misma energía, la misma longitud y la misma dirección de viaje que el fotón estimulante y los dos están exactamente en fase. Por lo tanto la emisión estimulada produce radiación monocromática, direccional y coherente.

La radiación emitida por un sistema atómico en presencia de un agente estimulante externo, consiste de dos partes. La parte cuya intensidad es proporcional a A_{21} es la emisión espontánea; su fase es independiente del fotón estimulante. La parte cuya intensidad es proporcional a $\zeta(\nu) B_{21}$ es la radiación estimulada.

La probabilidad de la transición inducida es proporcional a la densidad de energía del agente estimulante.

Los coeficientes B_{12} , B_{21} y A_{21} son parámetros útiles en la acción láser. El coeficiente A_{21} representa un término de pérdidas e introduce al sistema fotones que no están en

fase con el fotón estimulante, es decir, la emisión espontánea representa una fuente de ruido en el láser.

Si consideramos simultáneamente la absorción, la emisión espontánea y la emisión estimulada, ver Fig. 1.2, expresadas por las ecuaciones (1.3), (1.4) y (1.5), obtendremos la ecuación de balance que describe la evolución temporal del número de átomos en los niveles superior e inferior del sistema atómico

$$\delta N_2/\delta t = -\delta N_2/\delta t = B_{21}\zeta(\nu)N_2 - B_{12}\zeta(\nu)N_1 + A_{21}N_2 \quad (1.6)$$

El término negativo describe la disminución del nivel de población en N_1 , aumento en N_2 , y los términos positivos describen el aumento en N_1 , disminución de N_2 [3].

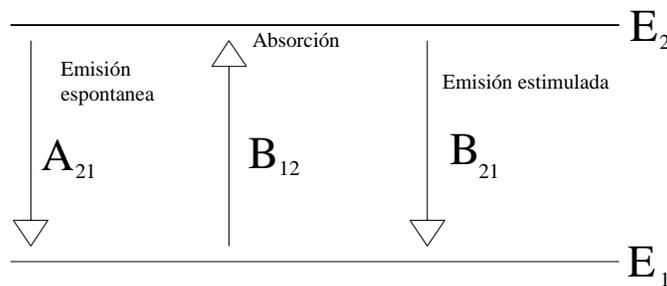


Fig. 1.2 Procesos simultáneos de absorción, emisión espontánea y emisión estimulada.

1.3 INVERSIÓN DE POBLACIÓN

En cualquier sistema atómico, a cualquier temperatura, la mayoría de los átomos se encuentran en el estado base y la población atómica de cada nivel más alto de energía es menor que en los niveles más bajos de energía. Esto es llamado “distribución de población normal”; en la cual las transiciones de absorción son mayores que las transiciones de emisión, lo que origina una disminución de la radiación.

Para que el proceso de emisión estimulada ocurra, es necesaria la inversión de población, es decir, que la población del nivel mas alto de energía sea mayor a la del nivel mas bajo de energía

$$N_2 > N_1 \quad \text{si} \quad E_2 > E_1 \quad (1.7)$$

como se ilustra en la Fig. 1.3, la inversión de población es una situación anormal, que nunca es observada en equilibrio térmico.

Una vez que el sistema atómico tiene la condición de inversión de población, el proceso de emisión predomina, lo que origina un aumento en la radiación. Esto se debe a que los fotones excitados, que se encuentran en nivel mas alto de energía son mas susceptibles a la emisión estimulada que a ser absorbidos por el nivel mas bajo, dando como resultado la amplificación de la energía o ganancia láser [4].

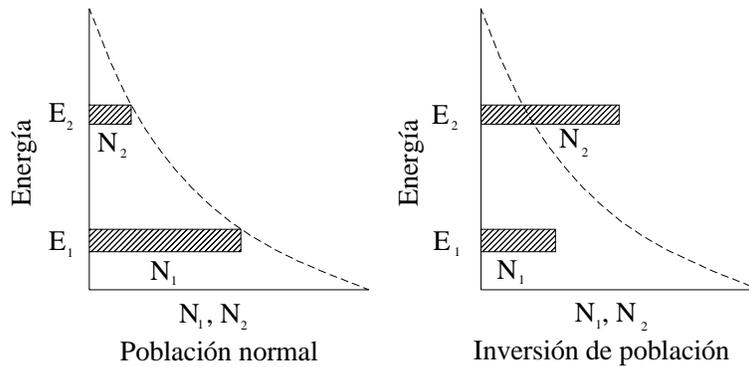


Fig. 1.3 Inversión de población

1.4 ¿QUÉ ES UN LÁSER?

Los láseres son dispositivos que generan y amplifican radiación coherente, en la región infrarroja, visible y ultravioleta del espectro electromagnético. Los láseres se encuentran en una gran variedad de formas, usan diferentes medios activos y diferentes sistemas de bombeo. La radiación que emite un láser tiene propiedades extraordinarias de

direccionalidad, pureza espectral, o monocromaticidad, coherencia e intensidad. Están constituidos por tres elementos básicos: el medio activo, el sistema de bombeo y la cavidad resonante [5].

Las características de la radiación tanto como los elementos básicos del láser se describen a continuación.

1.4.1 CARACTERÍSTICAS DE LA RADIACIÓN LÁSER

La radiación emitida por los láseres es diferente de la emitida por fuentes más comunes de luz como las lámparas incandescentes, fluorescentes o de arco, cuyas características son las siguientes:

- a) Longitud de onda (λ). La radiación de los láseres se encuentra disponible en todos los colores, desde el rojo hasta el violeta, e incluso más allá de estos límites. La longitud de onda depende de las transiciones que se realizan por emisión estimulada.
- b) Monocromaticidad. Las fuentes de radiación comunes emiten luz de diferentes colores; la luz blanca contiene la mayoría de los colores del espectro visible, sin embargo es bien conocido que los láseres producen colores espectralmente muy puros. Si se pudiera producir una radiación láser con un solo color, sería de un color completamente monocromático. Esto no es posible por razones prácticas. Designaremos $\Delta\lambda$ como el intervalo de longitudes de onda incluidos en el rayo láser de una longitud de onda media λ . Similarmente, designaremos al intervalo de frecuencias asociadas como $\Delta\nu$, es decir, el ancho de banda. En la región óptica del espectro podemos decir que $\nu = 5 \cdot 10^{14}$ Hz. En láseres un valor muy bajo de $\Delta\nu$ es 1 Hz, mientras que un ancho de banda alrededor de los 100 Hz es, en algunos casos, espectroscópicamente práctico.
- c) Coherencia. El fenómeno de emisión estimulada significa que la radiación es generada a sí misma y en consecuencia es posible tener un frente de onda continuo. La longitud del tren de ondas continuo puede ser de varios metros. Esta larga longitud de coherencia permite algunos efectos de interferencia extraordinarios, como interferometría speckle, holografía, etc. La coherencia es la propiedad fundamental de

la radiación láser, es decir el láser puede ser definido como una fuente de radiación coherente.

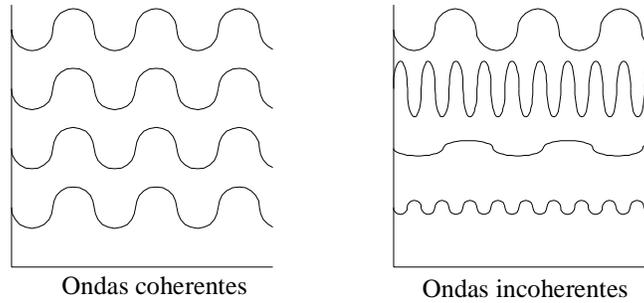


Fig. 1.4 Ondas coherentes y ondas incoherentes

- d) Direccionalidad. El rayo de salida de un láser consiste en un frente de onda plano casi ideal, provocando que la radiación láser viaje en una sola dirección dentro de un cono de divergencia muy angosto. Debido a que rayos perfectamente paralelos, o radiación colimada, no pueden ser producidos; todos los rayos divergen conforme viajan a través del espacio. Una de las características de la radiación láser es que es altamente colimada, por lo tanto es mucho más direccional o menos divergente que la radiación de fuentes convencionales [6].

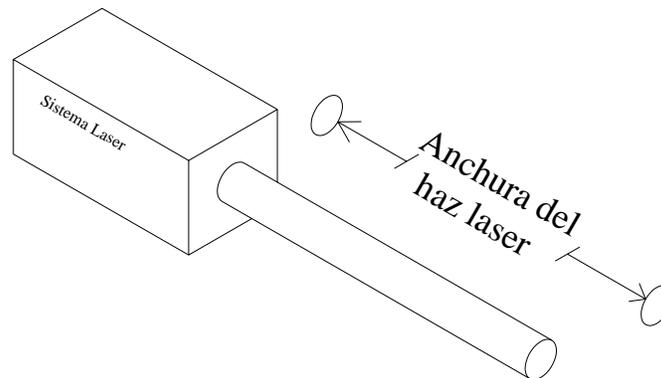


Fig. 1.5 Direccionalidad de la radiación láser

1.4.2 ELEMENTOS DE UN LÁSER

Tres elementos son necesarios en los láseres para producir luz coherente por emisión estimulada de radiación.

- a) Medio Activo. El medio activo es una colección de átomos o moléculas que puedan ser excitados a un estado de inversión de población. Los dos estados escogidos para la transición láser deben tener ciertas características. La primera es que los átomos deben permanecer en el nivel láser más alto por un tiempo relativamente largo, llamado estado metaestable, para emitir más fotones por emisión estimulada que por emisión espontánea. La segunda es que debe existir un método efectivo para bombear átomos del altamente poblado estado base al estado de más alta energía con el fin de que este tenga una población mayor a la del nivel de más baja energía.

El medio activo de un láser es como un amplificador óptico. Un rayo de luz coherente entra al medio activo y es amplificado por medio de la emisión estimulada, hasta que el rayo coherente, ya de mayor intensidad, sale por el otro lado del medio activo.

El medio activo puede ser un gas, un líquido, un material sólido o una unión entre dos piezas de materiales semiconductores.

- b) Sistema de Bombeo o Mecanismo de Excitación. Es la fuente de energía que excita, o bombea, los átomos en el medio activo, de un estado de más baja energía a uno de más alta energía, con el fin de crear la inversión de población.

En láseres de gas y de semiconductores, el sistema de bombeo consiste, usualmente, en un flujo de corriente eléctrica a través del medio activo. En láseres de estado sólido o líquido, frecuentemente emplean bombeo óptico.

- c) Cavidad Resonante o Mecanismo de Retroalimentación. Regresa una parte de la luz coherente, originalmente producida en el medio activo, al medio activo para otra amplificación por emisión estimulada. La cantidad de luz coherente producida por emisión estimulada depende del grado de inversión de población y de la fuerza de la señal estimulante.

La cavidad resonante generalmente consiste de dos espejos, uno a cada extremo del medio activo, alineados de tal forma que reflejan la radiación coherente de uno a otro espejo a través del medio activo. Uno de estos espejos es 100 % reflejante y el otro

transmite algo de radiación a la longitud de onda del láser. Esta porción de luz transmitida sale de la cavidad óptica como rayo láser y varía de un láser a otro, desde menos del uno por ciento hasta más del 80% [7].

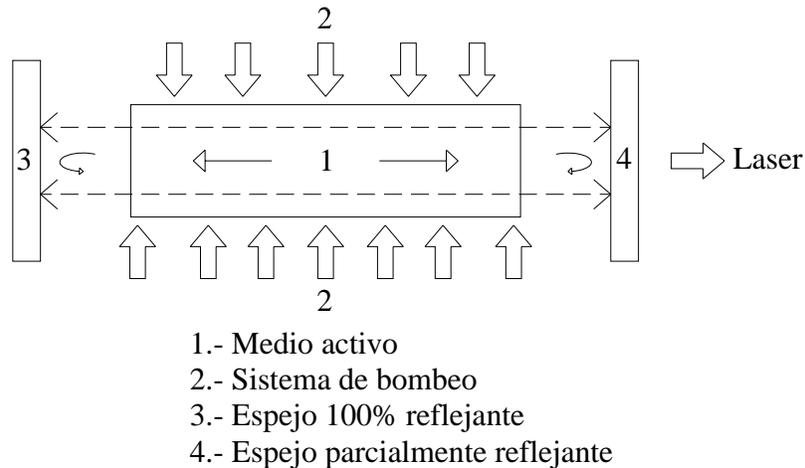


Fig. 1.6 Elementos de un láser.

1.4.3 OSCILACIÓN LÁSER

Cuando el mecanismo de excitación de un láser es activado, la energía fluye dentro del medio activo, causando que los átomos se muevan del estado base a ciertos estados excitados. De esta forma se crea la inversión de población. Algunos de los átomos en el nivel de energía más alto caen al nivel más bajo por emisión espontánea, emitiendo fotones incoherentes y en todas direcciones. La mayoría de estos fotones escapan del medio activo, pero los átomos que viajan sobre el eje de medio activo producen emisión estimulada. El rayo producido es reflejado de uno a otro espejo a través del medio activo. La porción de luz que llega al espejo que transmite parcialmente sale de la cavidad resonante como rayo láser [8].

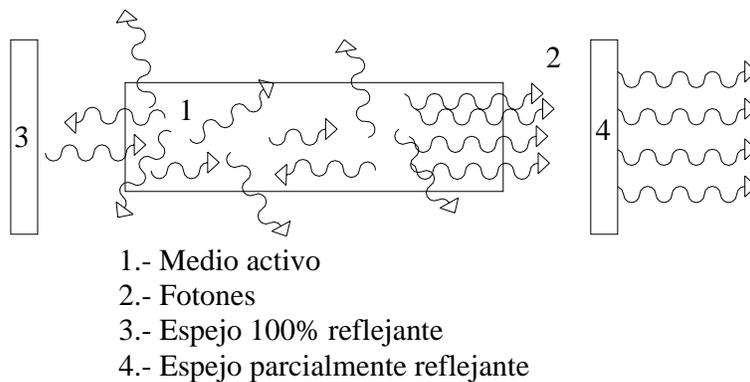


Fig.1.7 Acción láser

1.5 SISTEMAS LÁSER ESPECÍFICOS

Existen varios criterios para clasificar los láseres, aunque las más comunes son: por el estado físico del medio activo y por el sistema de bombeo. En el presente trabajo se utilizará la clasificación de los láseres por el estado físico del medio activo.

1.5.1 LÁSERES DE ESTADO SÓLIDO

Dejando a un lado los láseres de semiconductores, ya que estos por sí solos representan otra categoría de láseres de estado sólido, los láseres de estado sólido están constituidos principalmente por cristales, vidrios o cerámicas que actúan como contenedores de iones donantes, quienes son los que efectúan las transiciones de emisión láser. Dependiendo del tipo de material, estos pueden ser bombeados de modo continuo o pulsado. Generalmente se les bombea ópticamente, aunque las formas de bombear son diversas, las más comunes son usando lámparas flash, lámparas de arco continuas, luz solar, o bien otros láseres. De especial importancia en estos días son los láseres de estado sólido bombeados por diodos láser.

Los láseres de estado sólido, en particular los de Nd:YAG, son los más usados en la industria, después del láser de CO₂, con aplicaciones muy variadas como: corte, grabado,

perforado, soldadura, microsoldadura de componentes electrónicos, instrumentación biomédica, etc.

Entre los láseres de estado sólido se encuentra el láser de rubí, que fue el primer material en el cual la acción láser fue demostrada, y aun uno de los materiales láser mas usados; emite en $0.6943 \mu\text{m}$. El rubí es (Al_2O_3), donde algunos iones de aluminio, Al^{+3} , han sido reemplazados por iones cromo, Cr^{+3} , como impurezas, siendo este último el material activo del láser. Las concentraciones típicas del Cr^{+3} son de alrededor del 0.05 por ciento en peso. La mayor aplicación de los láseres de rubí es en holografía, en pruebas no destructivas, además puede registrar la densidad y temperatura de electrones en plasma de alta energía [9].

Otro láser de estado sólido es el de Nd:YAG, que es uno de los láseres de estado sólido mas importante, emite en $1.0641 \mu\text{m}$. El medio activo esta constituido por iones de neodimio trivalente, Nd^{+3} , presentes como impurezas en un material conocido como YAG, “Yttrium Aluminum Garnet”, que es un material cristalino tipo granate cuya formula química es $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$. Tiene aplicaciones en el procesamiento de materiales, medicina y equipo militar. La razón principal de la amplia gama de aplicaciones industriales de este tipo de láser es su habilidad para generar pulsos de alta potencia a longitudes de onda cercanas a $1 \mu\text{m}$. Son utilizados para taladrar materiales que reflejan la longitud de onda del láser de CO_2 , para soldar y marcar ciertos materiales. La versatilidad y potencia de este tipo de láseres, los hace ideal para varias aplicaciones en investigación científica. Han encontrado aplicaciones en metrología. Pueden evaporar pequeñas muestras para espectroscopía raman y espectroscopía de masas. además de otra amplia gama de aplicaciones. También es usado para degradar el color, sobre todo en materiales poliméricos; este efecto depende de la longitud de onda de la radiación utilizada , ya sea a $1.0641 \mu\text{m}$ o en el segundo o tercer armónico. Durante este proceso, la radiación láser penetra en el material y es absorbida por los pigmentos; como resultado de esta absorción, los enlaces químicos de lo pigmentos se rompen dando como resultado la degradación del color [10].

El láser de holmio, usa como medio activo iones de holmio Ho^{+3} que, al igual que el láser de Nd:YAG, están presentes como impurezas en YAG, “Yttrium Aluminum Garnet”, emite en $2.127 \mu\text{m}$. Es usado en medicina, como urología, odontología, ginecología, cirugías de poco sangrado, tratamiento de cálculos renales, tumores de vejiga, etc.

El láser de alejandrita es un láser de estado sólido que pertenece a la categoría de los sintonizables, emite a una longitud de onda de 730 a 810 nm. El medio activo es berilio que contiene como dopante un compuesto llamado crisoberilo (BeAl_2O_4). Su principal aplicación es en investigación, aunque por ser sintonizables son atractivos para espectroscopia, radar láser, sensores remotos y otras aplicaciones. Además se usan en medicina, comunicaciones y en la industria militar [11].

1.5.2 LÁSERES DE GAS

Los láseres con medio activo en estado gaseoso son numerosos. Existen láseres de gases atómicos, láseres de gases fuertemente ionizados, de gases moleculares y de vapores metálicos, también hay láseres de moléculas excímeras. Los láseres de gas son de los más importantes en la industria y en la investigación. El primer láser de gas fue el de Helio-Neón, luego apareció el de bióxido de carbono, el de nitrógeno molecular, etc.

La mayoría de los láseres de gas son excitados por descargas eléctricas, las cuales están basadas en el establecimiento de una corriente eléctrica través de los gases.

El tipo de descarga es diferente para los diferentes tipos de láseres, pero en general se da de la siguiente forma: el gas es sometido a una fuerte tensión eléctrica aplicada entre el ánodo y el cátodo, algunos electrones se desprenden del cátodo, los cuales son acelerados por el campo eléctrico y se mueven hacia el ánodo; al moverse chocan con los átomos o moléculas, produciendo mas electrones o bien excitando dichos átomos hacia los niveles láser superiores. La mayoría de los láseres de gas usan mezclas de gases para generar un mayor número de colisiones y tener una mejor eficiencia en la excitación de niveles láser superior.

Entre los láseres de gas se encuentra el láser de bióxido de carbono, CO_2 , que emite entre 9 y $11 \mu\text{m}$; es representativo de los láseres llamados moleculares, en los cuales los niveles

de energía involucran las vibraciones internas de las moléculas. Es uno de los láseres con más aplicaciones en la industria del procesamiento de materiales con láser como corte, taladrado, soldadura, grabado y tratamiento térmico de metales. Además es usado en cirugía, espectroscopía y fotoquímica, radar láser o lidar, producción de plasma, armas de energía direccionada, etc. El láser de CO₂ puede operar en forma continua y pulsada; de los láseres continuos existen 4 sistemas diferentes: el láser continuo clase I, cuya potencia de salida es baja, de alrededor de 50 W, siendo uno de los más comúnmente encontrados; el láser continuo tipo II con potencias de salida mayores a los 600 W; el láser continuo tipo III, denominado de transporte de gas, cuyas potencias de salida son del orden de los 10 KW.; el láser continuo de gas dinámico clase IV, con potencias de salida de decenas de KW.

Otro láser de gas es el de nitrógeno, que es uno de los primeros láseres de emisión en ultravioleta que ha alcanzado el mercado, emite en 337.1 nm. Su importancia radica en servir como láser de bombeo a los láseres pulsados de colorantes, también es usado para hacer estudios y medir efectos de fluorescencia, además pueden medir tamaños de partículas por dispersión de luz.

El láser de Helio-Neón, He-Ne, que emite en 632.8 nm, es otro láser de gas con una amplia gama de aplicaciones como es la alineación de sistemas ópticos, la lectura de códigos de barras y otros símbolos, grabado de hologramas, terapias médicas como acupuntura con láser y bioestimulación, como fuentes de luz en varios sensores ópticos; otras áreas de aplicación es la metrología, las comunicaciones, e investigación y desarrollo [12].

1.5.3 LÁSERES DE LÍQUIDOS

El láser de líquido más importante es el láser sintonizable de colorante. El medio activo es un colorante orgánico fluorescente, por ejemplo la rodamina 6G, disuelto en un solvente líquido. Como un láser de estado sólido, la única técnica razonable de excitación es el bombeo óptico, ya sea con lámparas intermitentes o con un láser externo. Las principales características de este tipo de láseres es que la longitud de onda de salida es sintonizable, ya que va desde el ultravioleta hasta el infrarrojo cercano, y su habilidad

para producir pulsos ultracortos o anchos de banda ultraangostos; estas características son muy importantes para muchas aplicaciones de tal forma que su baja eficiencia es enteramente aceptable.

La aplicación de estos láseres ha sido tradicionalmente en investigación y desarrollo, aunque su aplicación en la medicina se esta incrementando, tanto en tratamientos como en diagnósticos; otra aplicación es la inspección y pantallas de entretenimiento. Su principal aplicación científica es en espectroscopía y otros tipos de mediciones en el dominio del tiempo y la frecuencia; son útiles para estudiar la absorción y emisión de luz por varios materiales. Además los ultracortos pulsos de este tipo se láseres han sido invaluable en estudios de tiempo-respuesta, tales como las mediciones del tiempo de vida de los estados excitados y las velocidades de decaimiento [13].

1.5.4 LÁSERES DE SEMICONDUCTORES

Estos láseres son muy distintos a los láseres anteriores, la tecnología asociada a ellos esta en el ámbito de los componentes electrónicos como transistores, diodos, etc. por lo que presentan características muy especiales.

Básicamente se trata de una unión p-n en la que se crea luz cuando un electrón inyectado a una región tipo p se recombina radiativamente con un hueco, o bien cuando un hueco se recombina con un electrón en un material tipo n.

Las transiciones ópticas pueden ser banda a banda, donador a banda de valencia, banda de conducción a aceptor o donador a aceptor. La emisión de luz se da tanto en un diodo emisor, LED, como en un diodo láser; sin embargo la luz del diodo láser es generada por emisión estimulada, mientras que la del LED es mayoritariamente espontánea. La retroalimentación óptica debida al resonador y el diseño específico del área de intercambio hacen la diferencia con respecto a los LED simples, ver Fig. 1.8.

El ancho de banda de los picos de emisión para semiconductores se incrementa con la temperatura y el nivel de dopado y es más de cuatro ordenes de magnitud más grande que en láseres de gas y en muchos otros láseres.

La aplicación de los láseres de semiconductores es muy amplia, va desde el manejo de información, que incluye comunicaciones por fibra óptica, impresoras láser y

reproductores de discos compactos; hasta medición e inspección, tratamientos médicos, instrumentación en general, bombeo de otros láseres, sistemas militares, etc.

La aplicación comercial importante de los láseres de semiconductores de mas de $1.1 \mu\text{m}$ es la espectroscopia infrarroja de alta resolución [14].

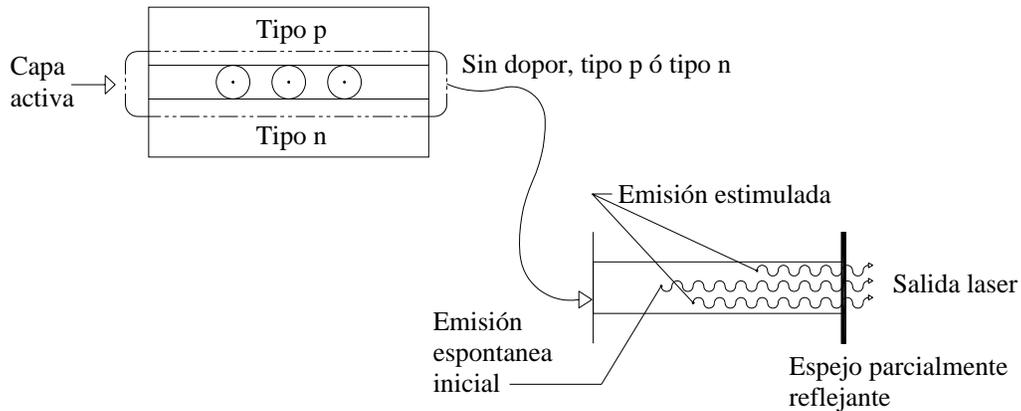


Fig. 1.8 Operación, simplificada, de un diodo láser.

Como hemos visto en los apartados anteriores, los láseres tienen bastantes aplicaciones, tanto en la industria como en la investigación. El objetivo del presente trabajo es aplicar los láseres para decolorar o degradar muestras textiles, cuya composición es 100% acrílico, cuantificar dicha pérdida de color, compararla con la pérdida de color que se tiene cuando la muestra es expuesta a una fuente de radiación que simula la radiación solar, para obtener una correlación entre ambos métodos de decoloración.

1.6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Milonni Peter W. y Eberly Joseph H., Lasers, Capítulo 1, John Wiley and Sons, USA, 1988.
- [2] Hecht Jeff, The Laser Guide Book, Capítulo 2, McGraw-Hill, USA, 1992.
- [3] Koechner Walter, Solid State Laser Engineering, Capítulo 1, Springer, Alemania, 1996.
- [4] Siegman A.E., An Introduction to Lasers and Masers, Capítulo 1, McGraw-Hill Book Company, USA, 1971.
- [5] Siegman Anthony E., Lasers, Capítulo 1, University Science Book, USA, 1986.
- [6] Milonni Peter W. y Eberly Joseph H., Lasers, Capítulo 1, John Wiley and Sons, USA, 1988.
- [7] Siegman Anthony E., Lasers, Capítulo 1, University Science Book, USA, 1986.
- [8] Hecht Jeff, The Laser Guide Book, Capítulo 3, McGraw-Hill, USA, 1992.
- [9] Koechner Walter, Solid State Laser Engineering, Capítulo 2, Springer, Alemania, 1996.
- [10] http://www.trotec.net/trotec_tc/howalaser_part2_e.php3#proz
- [11] Hecht Jeff, The Laser Guide Book, Capítulo 22, McGraw-Hill, USA, 1992.
- [12] Yariv Amnon, Optical Electronics, Capítulo 7, CBS College Publishing, 1989, China.
- [13] Yariv Amnon, Optical Electronics, Capítulo 7, CBS College Publishing, 1989, China.
- [14] Hecht Jeff, The Laser Guide Book, Capítulo 19, McGraw-Hill, USA, 1992.

CAPÍTULO II

FIBRA TEXTIL ACRÍLICA

2.1 INTRODUCCIÓN

El hombre de la prehistoria usó piel de animal para elaborar ropa y suministros que lo protegieran de los elementos climatológicos. La transición del uso de fibras naturales a fibras sintéticas fue conforme al desarrollo de técnicas de hilatura y tejido, que con el advenimiento de la revolución industrial fueron mecanizados.

Mientras se llevaba a cabo la evolución de los mecanismos de hilatura y tejido, el hombre comenzó a buscar nuevos métodos para producir fibras. En la última parte del siglo XIX, fibras regeneradas fueron introducidas en escala comercial.

La primera fibra sintética introducida al mercado fue el nylon, sintetizada por W. H. Carothers y comercializada por Du Pont en 1938. Con la comercialización del nylon se dio inicio al desarrollo de una industria mundial que en la actualidad representa un alto valor económico.

Las fibras con mayor crecimiento y presencia en el mercado fueron el nylon, poliéster, polihidrocarbano y poliacrilonitrilo. Las fibras de nylon, poliéster y polipropileno usan la tecnología de hilatura en fundido, debido a que al fundirse tienen una adecuada estabilidad que permite su extrusión para formar fibras, evitando así el uso de algún solvente y simplificando el proceso.

Sin embargo la formación de fibras a partir del poliacrilonitrilo no fue tan sencillo debido a que el polímero no es estable al calor y al fundirse se descompone, además no se tenía conocimiento de algún solvente que permitiera la hilatura en húmedo o en seco. El poliacrilonitrilo fue sintetizado por primera vez por el francés C. Moureau a finales del siglo XIX, pero fue hasta 1940 que debido a sus propiedades físicas y bajo costo se intensificaron las investigaciones para encontrar el solvente adecuado. Tanto en

Alemania, I. G. Farben, como en Estados Unidos, Du Pont, se encontraron solventes adecuados como son la dimetilformamida, el tiocianato de amonio y el cloruro de zinc. El reto siguiente fue el desarrollo de la tecnología adecuada de hilatura, para convertir la solución en fibras con las propiedades físicas deseadas [1].

2.2 CLASIFICACIÓN DE LAS FIBRAS TEXTILES

Las fibras textiles son unidades de materia caracterizadas por su flexibilidad y finura, son estructuras unidimensionales, largas y delgadas, cuya longitud es muy superior a su diámetro, se doblan con facilidad y su uso principal está en la creación de tejidos, están orientadas sobre un sólo eje, tienen una gran cohesión molecular, lo que las hace más fuertes que los plásticos [2].

Las fibras textiles se clasifican en tres clases:

- 2.2.1 Fibras Naturales: se presentan como tales en la naturaleza, se dividen en fibras de origen animal, que son proteínas complejas como la lana, mohair, seda; y fibras de origen vegetal, que son polímeros de celulosa como el algodón, lino y yute.
- 2.2.2 Fibras artificiales: son fibras cuya materia prima se encuentra en la naturaleza, pero han sido tratadas o regeneradas por el hombre; como son el rayón, acetato, triacetato, telcel, etc. [3].
- 2.2.3 Fibras sintéticas: son las llamadas fibras químicas; la ventaja de estas fibras es que no se depende de las cosechas y el volumen de producción y sus propiedades pueden ser modificadas a voluntad, como la resistencia, brillo, longitud, etc. aunque tienen desventajas como la absorción de agua [4].

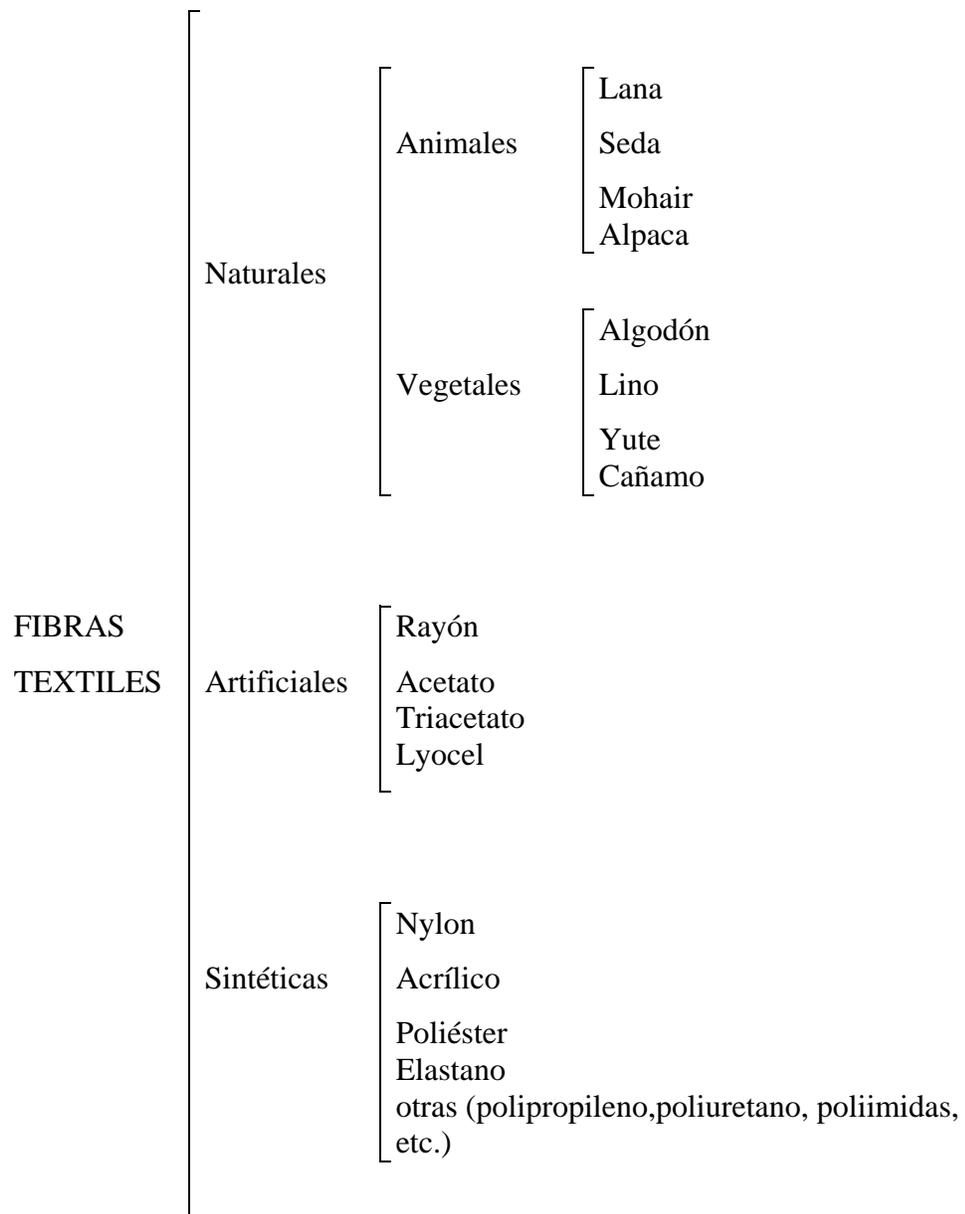


Fig. 2.1 Clasificación de las fibras textiles

2.3 DESARROLLO DE LA FIBRA ACRÍLICA

La primera fibra acrílica producida en escala comercial fue el Orlon, introducida en el mercado en 1950 por Du Pont, fue la segunda fibra sintética más comercializada, la primera fue el nylon. El descubrimiento del nylon fue el detonante del inicio de investigaciones exhaustivas sobre diferentes materiales poliméricos para desarrollarlos como fibras textiles. Uno de estos estudios fue el desarrollar una fibra textil a partir del poliacrilonitrilo. El principal obstáculo para comercializar fibras hechas de poliacrilonitrilo fue encontrar un solvente adecuado, porque el acrilonitrilo no es apropiado para la hilatura por fusión [5]. Se encontró que la dimetilformamida tenía las características necesarias para disolver el policarilonitrilo sin degradarlo.

Poco después del desarrollo del Orlon, y de haber demostrado que era adecuada para usarse en lonas, impermeables y filtros debido a su resistencia a la degradación por efectos de la luz solar y a la formación de hongos, se encontró que era difícil teñirla, y como consecuencia tuvo poca aceptación en el mercado.

El problema de teñido de las fibras de poliacrilonitrilo fue resuelto con el desarrollo de los copolímeros, la mezcla del poliacrilonitrilo con otro polímero, y con el desarrollo de los colorantes catiónicos. La selección de un copolímero adecuado fue difícil, debido a que algunas de las propiedades físicas, que hacían muy atractiva a la fibra, tenían que ser sacrificadas para alcanzar la teñibilidad comercial de la fibra. Du Pont escogió metil metacrilato sobre el acetato de vinilo, siendo en la actualidad la composición más usada. Con la introducción comercial del Orlon en 1950, no pasó mucho tiempo cuando otras compañías también entraron al mercado. En Estados Unidos, un total de seis compañías estuvieron trabajando en el desarrollo de fibras acrílicas o modacrílicas y pronto apareció Dynel de Union Carbide, Acrilán de Monsanto, Creslan de American Cyanamid, Zefran de Dow Chemical, Verel de Tennessee Eastman y Darvan de Goodrich. En varios países de Europa también nace el interés por la fibra acrílica y aparecen marcas, como el Dralon de Bayer y el Dolan de Hoechst en Alemania, en Francia la compañía Rhone Poulenc tuvo una importante participación en el negocio de la fibra acrílica; compañías inglesas como Courtaulds e italianas como Anic, Montefibre y Snia también tuvieron

gran presencia en el mercado. La industria de la fibra acrílica se extendió a Asia, con compañías como Asahi, Nippon, Exlan, Kanegafuchi, Mitsubishi Rayon, Toho Beslon, Toyo Rayon y Kanebo con una capacidad instalada de más de 800 millones de libras [6].

2.4 POLIACRILONITRILO

El poliacrilonitrilo es un polímero vinílico y un derivado de la familia de los acrilatos poliméricos. Se sintetiza a partir del monómero acrilonitrilo por medio de una polimerización vinílica de radicales libres.

Los polímeros vinílicos son obtenidos a partir de monómeros vinílicos, que a su vez son derivados del etileno, Fig. 2.2, constituidos por pequeñas moléculas que contienen dobles enlaces carbono-carbono, Fig. 2.3, [7]. Los polímeros vinílicos, tienen en su cadena principal dos átomos de carbonos, tres átomos de hidrógeno y en el lugar del cuarto hidrógeno tienen un sustituyente o radical para completar la saturación, como ejemplo tenemos el poliacrilonitrilo que tiene como sustituyente al radical nitrilo, ver Fig. 2.4 [8].

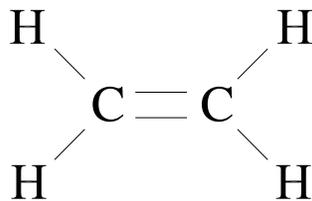


Fig. 2.2 Etileno como monómero

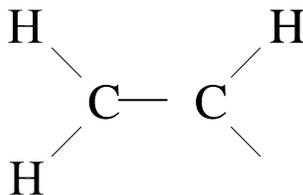


Fig. 2.3 Monómero vinílico

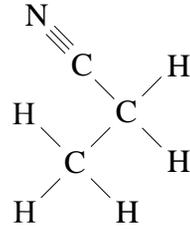


Fig. 2.4 Acrilonitrilo como monómero

Los acrilatos son una familia de polímeros del tipo de los polímeros vinílicos y son hechos de monómeros acrílicos. Los monómeros acrilatos son ésteres que contienen grupos vinílicos, esto es, dos átomos de carbonos unidos por un doble enlace, directamente adjuntos al carbono carbonilo, Fig. 2.5 [9].

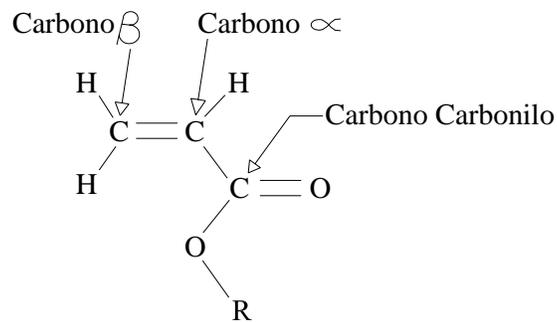


Fig. 2.5 Acrilato

2.4.1 POLIMERIZACIÓN DEL ACRILONITRILLO

La formación de polímeros o polimerización es realizada por medio de la unión de monómeros, uno a otro y se realiza en varios pasos intermedios; dos monómeros se unen para formar un dímero (dos moléculas de monómero), un dímero se une a otro monómero para formar un trímero (tres moléculas de monómero) dos moléculas de dímero se unen para formar un tetrámero (cuatro moléculas de monómero) y así sucesivamente hasta formar un polímero (muchas moléculas de monómero).

La combinación de polímeros puede ser con monómeros iguales o diferentes; los homopolímeros son polímeros compuestos por polímeros de la misma constitución química, y los copolímeros están formados por dos o mas polímeros diferentes.

La copolimerización es generalmente utilizada en la creación de fibras textiles cuando un polímero como homopolímero no presenta buenas características como fibra textil y pueden ser mejoradas como copolímero [10].

La polimerización más usada para obtener poliacrilonitrilo partiendo del acrilonitrilo es la polimerización vinílica por radicales libres, que es la más común y útil para sintetizar polímeros; sobre todo en la síntesis de polímeros partiendo de monómeros vinílicos. De hecho la polimerización por radicales libres es una reacción en cadena, donde los electrones del doble enlace de una molécula de monómero, se unen a los electrones del doble enlace de otra molécula de monómero [11]. Su mecanismo de reacción es, como su nombre lo indica, vía radicales libres la cual consta de tres etapas:

1. Iniciación. Para poder iniciar la polimerización, es necesario contar con un iniciador, puede ser un peróxido orgánico o un hidroperóxido o un compuesto azo o diazo, cuya molécula es fraccionada, por diferentes mecanismos, en radicales libres, los cuales reaccionan con el doble enlace de las moléculas del monómero; generando así otro radical. Esta generación de radicales es característica de las reacciones en cadena, Fig. 2.6.

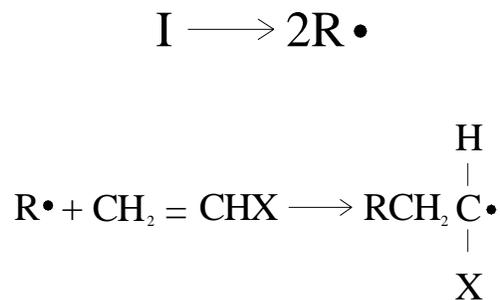


Fig. 2.6 Etapa de iniciación.

2. Propagación. En esta etapa se lleva a cabo el crecimiento de las cadenas poliméricas, ya que el nuevo radical formado reacciona con el doble enlace de otra molécula de monómero en la misma forma en que el iniciador lo fragmento y así sucesivamente se agregan más y más moléculas de monómero a la cadena polimérica. Esta etapa continuará hasta que el monómero se agote, Fig. 2.7.

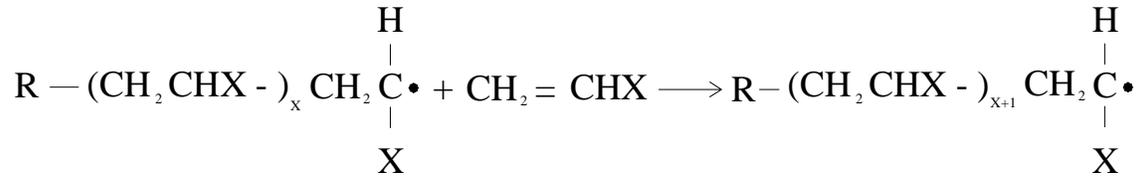


Fig. 2.7 Etapa de propagación.

3. Terminación. Debido a que los radicales son inestables, se busca tener electrones apareados sin generar otro radical [12]; una forma de no generar más radicales es el acoplamiento, el cual consiste en que el final de dos cadenas en crecimiento se encuentren y reaccionen entre sí [13]. Siendo esta una forma de terminar con el proceso de polimerización.

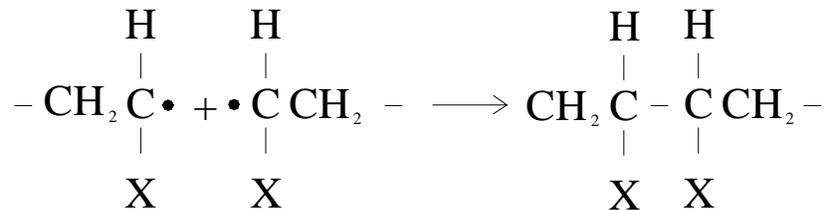


Fig. 2.8 Etapa de terminación.

2.5 SÍNTESIS DEL POLIACRILONITRILO PARA USO COMO FIBRA TEXTIL

Debido a que el poliacrilonitrilo como homopolímero es extremadamente difícil de teñir por su estructura muy compacta y su alta temperatura de transición vítrea (alrededor de 105 °C en aire), es necesario copolimerizarlo con uno o mas polímeros, con la finalidad de incrementar la termoplaticidad del homopolímero y reducir su resistencia al calor y a los solventes, esto se logra gracias a la reducción de la regularidad estructural del homopolímero; además también se mejora la procesabilidad y la teñibilidad de la fibra. La polimerización del poliacrilonitrilo es comúnmente realizada usando un sistema iniciador redox persulfato de sodio-bisulfito de sodio, el persulfato de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$) es el agente oxidante o también llamado catalizador, y el bisulfito de sodio (NaSO_3) es el agente reductor o también llamado activador. Esto ocasiona que en las cadenas terminales del polímero se introduzcan grupos sulfato y sulfonato que le dan a la fibra una sustantividad por los colorantes catiónicos [14].

Los copolímeros que contienen 85% o más de poliacrilonitrilo, se utilizan como fibras textiles para hacer tejidos como medias y sweaters, o también en productos para ser expuestos a la intemperie o “outdoors”, como carpas, toldos, etc. Si la etiqueta de cierta prenda dice acrílico, entonces la prenda esta elaborada de algún copolímero del poliacrilonitrilo. Generalmente son copolímeros de acrilonitrilo con metil acrilato, acetato de vinilo o metil metacrilato [15].

En 1960, la Comisión Federal de Comercio de Estados Unidos definió la fibra acrílica como “una fibra sintetizada por el hombre, cuya sustancia que la forma es un polímero sintético de cadena larga, compuesto por al menos un 85% en peso de unidades de acrilonitrilo, $\text{CH}_2\text{-CH-CN}$ ” [16].

En el caso específico del acrílico, objeto del presente estudio, el comonomero usado es el acetato de vinilo, como se ilustra en la fig. 2.9, que es un líquido incoloro, muy inflamable, soluble en la mayoría de los disolventes orgánicos e insoluble en agua.

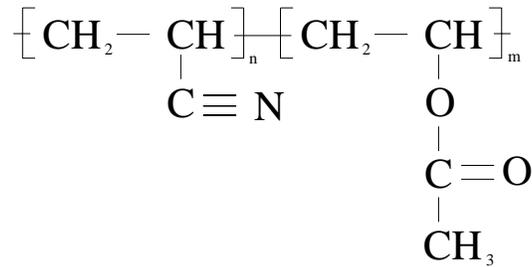


Fig. 2.9 Molécula del poliacrilonitrilo-acetato de vinilo

El acetato de vinilo, como su nombre lo indica es un monómero vinílico, que puede ser obtenido a partir de la reacción del etileno con oxígeno y ácido acético en presencia de un catalizador de paladio [17] o de la reacción del acetileno con ácido acético con sulfato de mercurio como catalizador [18].

2.5.1 HILATURA

La transformación del polímero en masa a fibra es realizada a través de la hilatura. Los procesos de hilatura pueden ser de dos tipos: la hilatura por fusión, cuando el polímero se encuentra fundido, y la hilatura en solución, cuando el polímero se encuentra disuelto en algún solvente [19].

En la hilatura por fusión, que utiliza las características termoplásticas del polímero, los “pellets” o píldoras del polímero son fundidas por medio de calor; esta masa fundida es extruida a través de una hiladera, que tiene una gran cantidad de pequeños agujeros, y solidificada, ya como fibras, por medio de aire, dando un estiramiento posterior para orientar las moléculas [20].

En la hilatura en solución, el polímero es disuelto en algún solvente que no lo degrade, esta solución es alimentada bajo presión a la hiladera para la formar las fibras. Esta hilatura se divide dos clases: la hilatura en seco y la hilatura en húmedo, ambas consisten en que la solución de polímero pasa a través de la hiladera, con la diferencia que en la hilatura en seco se usa un gas caliente para evaporar el solvente y dar paso a la formación

de la fibra; en la hilatura en húmedo la extrusión se da en un baño compuesto por el mismo tipo de solvente y por un no-solvente o agente coagulante, que lixivía al solvente dentro del polímero, dando paso a la formación de la fibra [21].

Después de que el solvente es lixiviado de la fibra, esta es lavada, para extraer el solvente remanente dentro de la fibra; es estirada u orientada en un medio caliente, generalmente agua, este paso es muy importante ya que se modifica la estructura de la fibra y sus propiedades; es secada para extraer el agua remanente dentro de la fibra de los procesos de lavado y estirado; y finalmente es enrollada en tubos para después ser cortada y preparada para pasar al proceso de formación de hilos[22].

La sección transversal de las fibras sintéticas es determinada por la forma del agujero de la hiladera y por las condiciones del baño de coagulación, las fibras pueden ser redondas, ovaladas, o de cualquier forma. La forma es seleccionada en base las propiedades ópticas, térmicas, eléctricas, mecánicas u otras deseadas.

La hilatura por fusión es preferida sobre la hilatura en solución, ya que se evita el uso de solventes y la consabida contaminación que éste genera; aunque la existencia de polímeros no estables al calor o termofijos, es decir, se descomponen a determinadas temperaturas y no funden, como es el caso del acrílico, da margen para que la hilatura en solución sea altamente utilizada.

El acrílico como polímero termofijo es hilado en solución y en el caso específico del acrílico objeto del presente estudio es hilado en húmedo, por lo que se anexa un diagrama de este tipo de hilatura.

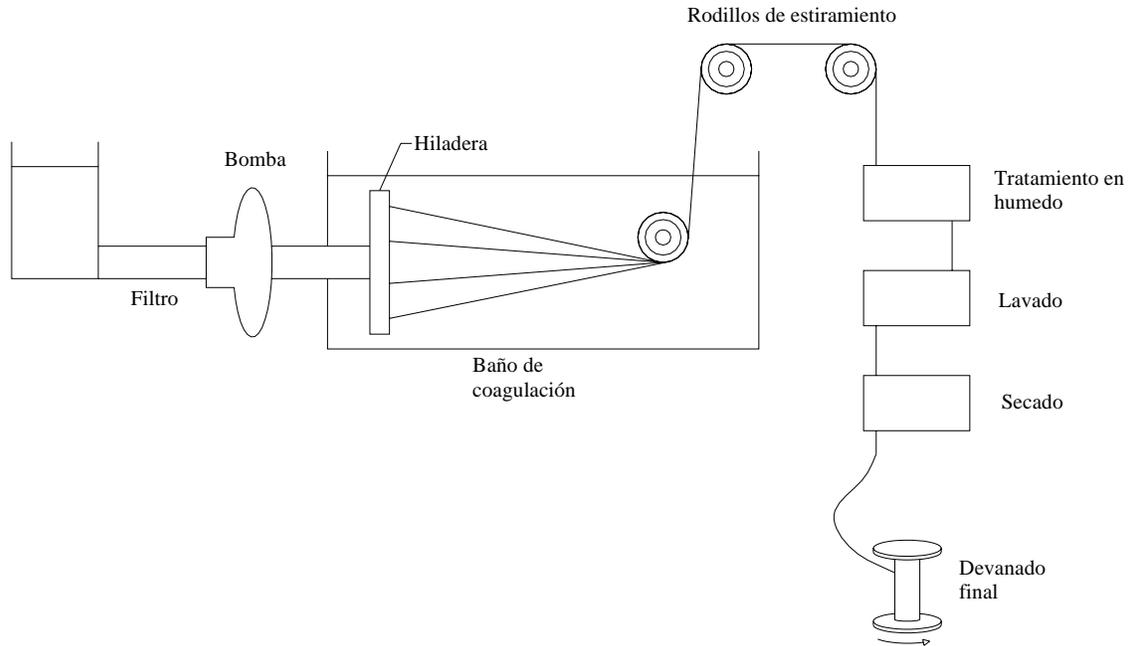


Fig. 2.10 Diagrama de la hilatura en húmedo de la fibra acrílica

2.6 ENLACES QUÍMICOS EN LAS FIBRAS TEXTILES

Las fibras textiles están compuestas por átomos unidos por enlaces químicos de diferentes fuerzas; el arreglo de estos átomos y las fuerzas de los enlaces es lo que determina las propiedades físicas de los materiales.

El entendimiento de la estructura química de las fibras es de suma importancia para apreciar sus propiedades ópticas, térmicas, mecánicas, eléctricas y ambientales.

Los enlaces son las fuerzas que mantienen unidos los átomos y dan integridad al material. Existen dos clases de enlaces, los enlaces primarios y los enlaces secundarios. En el campo de los polímeros, y por lo tanto de las fibras textiles, el enlace primario predominante es el enlace covalente, aunque existen otros tipos de enlaces primarios. En cambio sólo las moléculas orgánicas tienen los enlaces secundarios fuertes, sin los cuales los polímeros serían de menos utilidad [23].

2.6.1 ENLACES PRIMARIOS

Los enlaces primarios en polímeros son enlaces covalentes. Estos enlaces son formados cuando uno o mas pares de electrones de valencia son compartidos entre dos átomos, de tal forma que cada átomo tenga completa la capa de valencia. El número de enlaces para cada átomo se determina por el número de valencia de cada átomo, el carbono formará cuatro enlaces, el hidrógeno uno, el oxígeno dos, etc. Debido a lo anterior, los compuestos orgánicos, incluyendo los polímeros, generalmente no son muy densos y son compuestos por algunos de los átomos más ligeros de la tabla periódica. Es además importante recalcar que el enlace en estructuras covalentes, se da en ciertos ángulos. Por ejemplo el carbono forma cuatro enlaces y debido a que los enlaces son regiones de alta densidad eléctrica, los enlaces maximizan su separación en el espacio, por lo tanto los cuatro enlaces forman un tetraedro.

Los enlaces covalentes son caracterizados por la energía de disociación de enlace, que es la energía que se consume o libera cuando se rompe o forma un enlace; y por la longitud de enlace, que es la longitud a la cual las fuerzas de atracción entre átomos es igual a las fuerzas de repulsión [24].

La fuerza de los enlaces primarios es del orden de 300 a 500 kJ/mol. Ver tabla 2.1 [25].

2.6.2 ENLACES SECUNDARIOS.

Los materiales orgánicos son los únicos materiales en los cuales los enlaces secundarios son de extrema importancia, no obstante que son más débiles en un orden de magnitud que los enlaces primarios. Los enlaces secundarios son las fuerzas que mantienen unidas las moléculas, determinan la cantidad de calor absorbido antes de fundirse, influyen sobre la temperatura de fusión y determinan en gran parte la interacción del polímero con gases y líquidos.

Enlace	Longitud de Enlace (Å)	Energía de Disociación (kJ/mol)
C - C	1.54	347
C = C	1.34	611
C - H	1.10	414
C - N	1.47	305
C = N	1.15	891
C - O	1.46	360
C = O	1.21	749
C - F	1.35	473
C - Cl	1.77	339
N - H	1.01	389
O - H	0.96	464
O - O	1.32	146

Tabla 2.1 Energías de disociación y longitudes de enlace de enlaces primarios típicos

- a) Enlace de Hidrógeno. El enlace secundario mas fuerte es el enlace de hidrógeno. Como todos los enlaces secundarios, el enlace de hidrógeno es el resultado de una interacción de cargas, el mas conocido es el que se forma en el grupo hidroxilo (-OH), aunque también ocurre entre grupos C=O y H, puede además formarse entre dos grupos de una misma molécula o de diferentes moléculas.

El hidrógeno se encuentra generalmente unido a un grupo ácido, o donador de protones, como los grupos hidroxilo (OH), carboxilo (COOH), amina (RNH) o amida (CONH₂). El otro grupo debe ser básico o aceptor de electrones, generalmente oxígeno como en carbonilos, éteres, etc. [26].

La fuerza de los enlaces de hidrógeno es del orden de 40 kJ/mol [27].

- b) Enlace Dipolo Dipolo. Cuando diferentes átomos en una molécula tienen carga eléctrica opuesta e igual, se dice que la molécula es polar o que tiene un momento

dipolar. A distancias moleculares la separación de cargas es muy significativa y ocasiona una red intermolecular de fuerzas de atracción. La magnitud de la energía de interacción depende de la alineación de los dipolos. La fuerza del dipolo es alrededor de la mitad de la fuerza del enlace de hidrógeno. Un ejemplo de atracción dipolo-dipolo es el que se da en el poliácridonitrilo debido a la polaridad del grupo nitrilo (CN), ilustrado en la Fig. 2.11 [28].

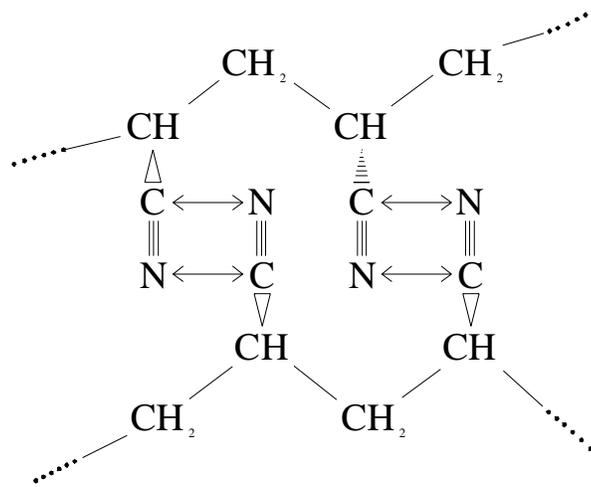


Fig.2.11 Interacción dentro de la molécula y entre moléculas de la fibra acrílica debido al enlace dipolo-dipolo.

2.7 ESTRUCTURA QUÍMICA Y MORFOLOGÍA DE LA FIBRA ACRÍLICA

La estructura y morfología de la fibra acrílica es dominada por la interacción física de los grupos nitrilos (CN) adyacentes a lo largo de una cadena polimérica y entre cadenas. Un factor predominante en esta interacción dentro de una cadena polimérica y entre cadenas es la naturaleza altamente polar de los grupos nitrilos. El alto punto de ebullición, se descompone antes de fundirse, la alta viscosidad, el espectro vibracional dependiente de la temperatura y la polarización dieléctrica del monómero nitrilo han sido explicadas por la dimerización de los compuestos de los grupos nitrilos. El grupo nitrilo se alinea a sí mismo en una forma antiparalela.

La alineación casi paralela ocasiona que los grupos nitrilos adyacentes a lo largo de la cadena polimérica se repelan fuertemente unos a otros. La repulsión dentro de la cadena polimérica da al polímero una configuración helicoidal irregular rizada; dando a la molécula de poliacrilonitrilo una estructura semejante a un bastón con un diámetro de 0.6 nm, Fig. 2.12. Los grupos nitrilos son distribuidos al azar alrededor del perímetro del bastón, y algunos de ellos se extienden mas allá de la superficie del bastón; los cuales están disponibles para interacciones entre cadenas.

Debido al arreglo de los grupos nitrilo alrededor de la estructura semejante a un bastón del poliacrilonitrilo, solo una fracción de estos grupos puede participar completamente en las interacciones positivas entre cadenas, además lo hacen de una manera desordenada. Por consiguiente, las moléculas de la fibra acrílica están acomodadas con diferente grado de orden lateral y con muy poco orden longitudinal, a lo largo del eje de la fibra.

Los enlaces de hidrógeno entre hidrógenos terciarios a lo largo del esqueleto del polímero y los grupos nitrilo de las cadenas poliméricas contiguas son las interacciones principales responsables de las propiedades de las fibras acrílicas; aunque el enlace de hidrógeno entre cadenas poliméricas adyacentes es considerado de poca importancia comparado con la interacción nitrilo-nitrilo; por ejemplo la energía del enlace de hidrógeno $C=N\dots H-C$ es de 4-5 kJ/mol. Por otro lado los enlaces de hidrógeno entre los grupos nitrilo de las cadenas poliméricas y el agua tienen un papel muy importante en la conocida sensibilidad de las fibras acrílicas al agua.

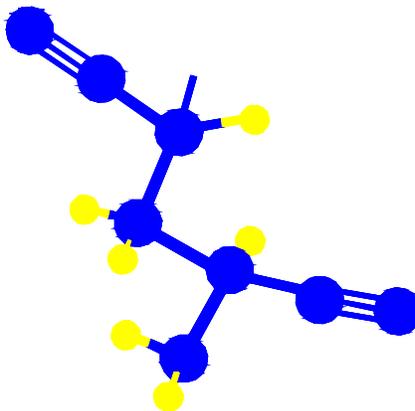


Fig. 2.12 Molécula del poliacrilonitrilo

Estudios de encogimiento por calor de filamentos extruidos sin tensión indican que durante la hilatura en húmedo o coagulación, las moléculas de polímero son extendidas de su forma helicoidal irregular para formar fibrillas. Las fibrillas se mantienen unidas durante el estiramiento en húmedo de los filamentos. Durante el estiramiento, las fibras de poliacrilonitrilo desarrollan su resistencia a la deformación, como resultado del incremento de la energía interna. Este incremento de la energía interna es atribuido al estiramiento de la conformación helicoidal de las macromoléculas en una conformación de zig-zag. Aunque esta conformación es inestable, se puede revertir a la forma original si el estiramiento es relajado cuando la temperatura del filamento se encuentre sobre su temperatura de transición vítrea.

La estructura promedio de las fibras acrílicas consiste en una alternancia de áreas cristalinas y amorfas [29].

2.8 PROPIEDADES DE LA FIBRA ACRÍLICA

La física de las fibras textiles es el estudio de su estructura y de sus propiedades físicas. Sin embargo estos dos aspectos no son independientes: las propiedades deben ser explicadas en base a la estructura, y la estructura ayuda a definir las propiedades de la fibra. La materia está compuesta por átomos unidos por enlaces de diferentes fuerzas, el arreglo de los átomos y la fuerza de los enlaces entre ellos, determinan las propiedades físicas de los materiales [30].

Enseguida se enunciará el concepto de algunas de las propiedades más importantes de las fibras en general, y al final del apartado se citarán sus valores para la fibra acrílica.

2.8.1 PROPIEDADES FÍSICAS

Dos de las propiedades físicas más importantes de la fibra es la forma y el área de la sección transversal. De una fibra con área pequeña de sección transversal se obtiene un hilo ligero, y son usadas en telas que están en contacto con la piel. En cambio las fibras con sección transversal grande son usadas en artículos donde la rigidez es primordial, como en tapetes.

- a) Densidad lineal. Es la masa por unidad de longitud de un objeto largo y delgado, en este caso las fibras textiles. Históricamente la densidad lineal ha sido reportada en unidades de denier, que es la masa de la fibra, en gramos, por 9000 metros de longitud. A mayor el valor de denier, más grande es la sección transversal. Otra unidad usada comúnmente para expresar la densidad lineal es el tex o decitex, que es la masa de la fibra, en gramos, por 1000 o 10000 metros de longitud.
- b) Forma de la sección transversal. La forma de la sección transversal es muy importante en muchas aplicaciones; determina, en conjunto con el área de la sección transversal, las propiedades ópticas de las fibras, además influye en la fuerza de los hilos. Enseguida se anexa una fotografía, Fig. 2.13, de la sección transversal del acrílico objeto de este estudio [31].



Fig. 2.13 Sección transversal de la fibra acrílica objeto del presente estudio.

2.8.2 PROPIEDADES TENSILES

Las propiedades tensiles de las fibras, es decir la respuesta a una fuerza aplicada y sus deformaciones, son probablemente las propiedades más importantes técnicamente, ya que contribuyen al comportamiento de las fibras durante su procesamiento y a las propiedades del producto final. Las propiedades de una estructura textil, como un hilo o una tela, dependen de una compleja interrelación entre el arreglo de las fibras y sus propiedades [32].

Las propiedades tensiles, aunque importantes en todas las aplicaciones de las fibras, son particularmente importantes en fibras de uso industrial, ya que comúnmente son usadas bajo tensión. Debido a su forma larga y delgada, las fibras son sujetas a fuerzas tensiles fuera de su eje. Una fuerza tensil es la que al ser aplicada causa un estiramiento del material, como se muestra en la fig. 2.14. El esfuerzo tensil, σ , es definido como la fuerza aplicada al área de sección transversal original. El esfuerzo es frecuentemente más utilizado, ya que la normalización facilita la comparación con muestras de diferentes secciones transversales. Entre las propiedades tensiles más importantes tenemos:

- a) Elongación. Una respuesta de la fibra sometida a una fuerza tensil es la extensión del material. Cuando una fibra de longitud original l_0 es estirada sobre su eje y se extiende un Δl , entonces el estiramiento o elongación es calculado como $\Delta l/l_0$, ver fig. 2.14. La elongación, representada por ε , es una cantidad adimensional, generalmente expresada en porcentaje:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.1)$$

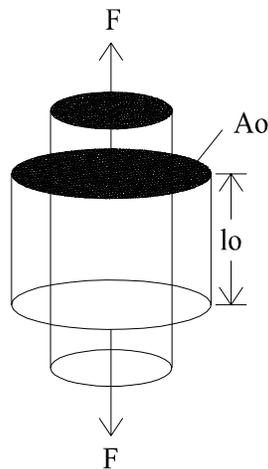


Fig. 2.14 Aplicación de una fuerza tensil en una fibra

b) **Modulo de Young.** Cuando un material es sujeto a un esfuerzo pequeño, el esfuerzo causa que los átomos se muevan de su posición original en una forma elástica. Cuando el esfuerzo es eliminado, los átomos regresan a su posición inicial y el material recupera su forma original. En esta región de pequeño esfuerzo, llamada región elástica de Hooke, la elongación y el esfuerzo son linealmente proporcionales. La constante de proporcionalidad entre el esfuerzo y la elongación es el módulo de Young, E . El módulo de Young es la medida de la cantidad de deformación causada por una cantidad fija y pequeña de esfuerzo.

El módulo de Young de las fibras naturales depende de la orientación molecular tanto como de la estructura química. Al incrementar la orientación molecular sobre el eje de las fibras, una cantidad mayor de moléculas sostienen la carga, originándose un decremento de la deflexión a un esfuerzo dado. El módulo de Young de las fibras sintéticas depende de los mismos factores; sin embargo, el hombre tiene un gran control sobre la orientación molecular. Por lo tanto el módulo de la mayoría de las fibras sintéticas varía de acuerdo a la estructura de la fibra desarrollada durante su procesamiento.

c) **Tenacidad.** Cuando el esfuerzo se incrementa sin límites, en un esfuerzo determinado el material se romperá. La mayoría de las fibras textiles presentan un comportamiento no lineal, o deformación, en la curva elongación-esfuerzo antes de la ruptura, lo que es un indicativo de que los átomos no son estirados más allá de su límite elástico. Esta deformación no es recuperable y es llamada deformación plástica. En polímeros esta deformación tiende a alinear las moléculas sobre la dirección del esfuerzo. Esta reorientación se realizará en el punto de ruptura. Típicamente la ruptura inicia en el punto local más débil. El esfuerzo en la ruptura es llamado fuerza y la fuerza dividida entre la densidad lineal es llamada fuerza específica o tenacidad. La tenacidad denota la fuerza de un hilo, de un filamento o de una fibra de un tamaño dado y es expresada en unidades de fuerza sobre unidades de densidad lineal, como denier o tex [33].

2.8.3 PROPIEDADES ÓPTICAS

Reflectividad, absorbancia, color, índice de refracción y birrefringencia son algunas de las características ópticas usadas para caracterizar un material y que pueden ser de importancia crítica en algunas aplicaciones de las fibras textiles [34]. Estas propiedades son además una fuente útil de información acerca de la estructura de las fibras; en particular la orientación de las moléculas de los polímeros puede ser estimada por medio de las diferencias en el índice de refracción y en la absorción de la luz polarizada en diferentes direcciones relativas al eje de la fibra [35].

- a) Índice de Refracción. El índice de refracción es el cambio de velocidad de la luz cuando pasa de un medio menos denso a otro más denso, como resultado de la dispersión de la luz por moléculas individuales, Fig. 2.15. Los rayos dispersados interfieren con el rayo primario causando un retraso en la fase [36].

El índice de refracción está definido por:

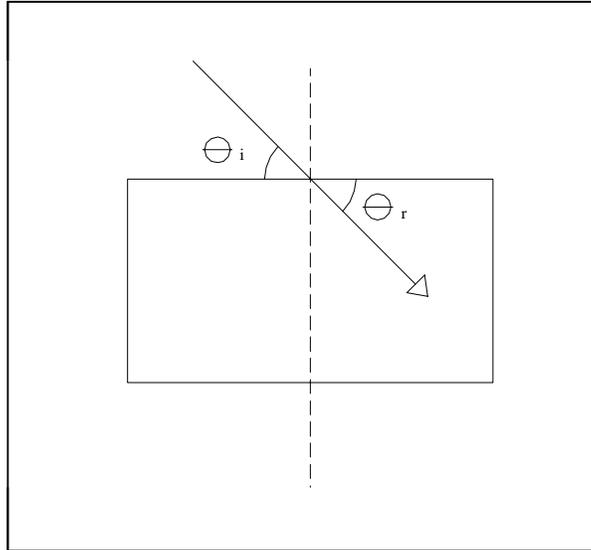
$$\eta = \frac{\text{Sen } \theta_i}{\text{Sen } \theta_r} \quad (2.2)$$

Donde:

θ_i es el ángulo de incidencia

θ_r es el ángulo de refracción

η es el índice de refracción



O también como:

$$\eta = \frac{v_{\text{vacío}}}{v_{\text{medio}}} \quad (2.3)$$

Donde:

$v_{\text{vacío}}$ es la velocidad de la luz en el vacío

v_{medio} es la velocidad del haz en el medio

El índice de refracción varía con la temperatura y la longitud de onda. Los valores reportados en la mayoría de las tablas son para una temperatura específica, por lo general a 20 °C , y a una longitud de onda, típicamente a 589 nm.

Una de las características del índice de refracción es que se incrementa con la densidad; la razón de esto es que la polarizabilidad se incrementa proporcionalmente con el incremento de electrones o moléculas por unidad de volumen [37].

- b) Birrefringencia. En un material isótropo, material cuyas propiedades ópticas son las mismas en todas direcciones, el índice de refracción es el mismo en todas direcciones. Sin embargo cuando el material es anisótropo, material que exhibe diferentes

propiedades ópticas en diferentes direcciones, como las fibras textiles cuyas moléculas son alineadas en cierta dirección; el índice de refracción varía con la dirección del campo eléctrico, siendo mayor cuando el campo eléctrico es paralelo al eje de las moléculas [38].

La mayoría de las fibras textiles pueden ser caracterizadas completamente por dos índices de refracción, uno paralelo al eje de la fibra o axial, η_a , y el otro normal al eje de la fibra o radial, η_r , como se indica en la Fig. 2.16. Los subíndices a y r indican la dirección de vibración de la radiación, axial o radial. La diferencia de los índices de refracción,

$$\eta_a - \eta_r = \Delta\eta \quad (2.4)$$

es llamada birrefringencia. La birrefringencia es una medida de la diferencia de polarizabilidad del medio a la luz que vibra paralela o perpendicular al eje de la fibra. En general los átomos a lo largo del esqueleto de la fibra son más polarizables que los átomos en direcciones laterales, por lo tanto la birrefringencia puede ser usada para evaluar la orientación molecular de las fibras, será mayor cuando todas las moléculas se encuentren alineadas y paralelas al eje de la fibra y será cero cuando las moléculas se encuentren ordenadas al azar. Generalmente la birrefringencia de las fibras textiles es positiva, lo que indica que η_a es mayor que η_r .

Las fibras con diferentes composiciones tienen diferente birrefringencia, y aunque las fibras son semicristalinas y contienen cristalitas anisótropas, la orientación de estos cristalitas es al azar dentro de una fibra sin orientación [39].

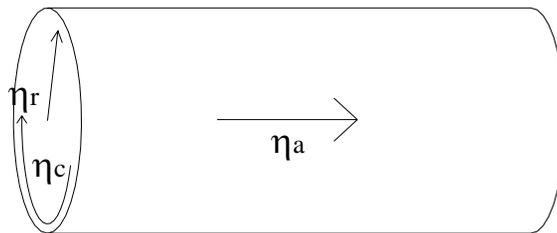


Fig. 2.16 Índice de refracción en fibras

La birrefringencia se define como un fenómeno de doble refracción en materiales anisótropos en el cual un rayo de luz no polarizada es dividido en dos rayos con diferentes direcciones y relativas velocidades de propagación. La cantidad de energía transmitida sobre el camino óptico a través de un cristal que exhibe birrefringencia se convierte en una función de la orientación cristalina [40].

c) Absorción. Además del cambio de velocidad de la luz que es transmitida, la interacción de la luz con la materia puede resultar en la absorción de la radiación. Cuando esto pasa únicamente en la región visible del espectro electromagnético, el resultado es que los materiales aparecen coloreados cuando son iluminados con luz blanca.

2.8.4 PROPIEDADES QUÍMICAS

Una de las excelentes propiedades de la fibra acrílica es su alta resistencia a la degradación por exposición al medio ambiente, particularmente su resistencia a la degradación a la luz del sol y a la acción de microorganismos. Esta propiedad le ha dado a la fibra acrílica un lugar especial entre las fibras usadas para aplicaciones de exteriores o “outdoors” como telas para tiendas de campaña, toldos y carpas.

Las fibras acrílicas son insolubles en la mayoría de los solventes químicos, aun cuando el enlace dipolar hidrógeno-nitrilo haya sido roto; solo es disuelta en solventes altamente polares como dimetilformamida, dimetilsulfoxido, carbonato de etileno y dimetilacetamida [41]

2.8.5 PROPIEDADES TÉRMICAS

Las fibras acrílicas además tienen una sorprendente resistencia al calor. Esta propiedad es el resultado de los efectos dipolo relacionados con la polaridad de los grupos nitrilo, lo cual produce fuerzas repulsivas electrostáticas entre grupos nitrilos adyacentes y simultáneamente crea fuertes enlaces dipolos entre nitrilos de cadenas adyacentes. Los

enlaces de hidrógeno entre los átomos electronegativos de nitrógeno y el átomo de hidrógeno terciario en el esqueleto del polímero son además muy significantes.

Dependiendo de la aplicación final de las fibras, las propiedades térmicas pueden ser de poca o crítica importancia. Enseguida mencionaremos algunas de las más importantes.

- a) Capacidad calorífica. La capacidad calorífica a presión constante es la cantidad de energía requerida para aumentar la temperatura un grado a una unidad de masa de material. El calor específico es la capacidad calorífica dividida entre el peso molecular del material. Las unidades de calor específico son unidades de energía sobre unidades de masa por unidades de temperatura, por ejemplo J/kg-K. El calor específico es la habilidad de un material para almacenar energía en forma de calor. Los materiales orgánicos tienen valores altos de calor específico, ya que es necesario excitar los modos vibracionales, rotacionales y traslacionales del movimiento molecular para elevar la temperatura. En general, los polímeros tienen más altos calores específicos que otros sólidos; y los que poseen libertad rotacional más grande presentan valores mayores.
- b) Conductividad térmica. Es la constante de proporcionalidad entre el flujo de calor y el gradiente de temperatura, definida por la Ley de Fourier:

$$q = \frac{\text{flujo}}{\text{area} \cdot \text{tiempo}} = -k \left(\frac{dT}{dx} \right) \quad (2.5)$$

Donde:

q = flujo de calor

dT/dx = gradiente de temperatura

k = conductividad térmica

Los polímeros y las fibras textiles son aislantes térmicos y usados como protectores térmicos, ya sea en forma de abrigos para invierno o en bolsas de dormir. En este tipo

de aplicaciones el aire estancado da el aislamiento, por lo tanto, mientras más aire sea atrapado mejor el aislamiento.

La conductividad térmica varía con la orientación de las moléculas, así que los valores reportados deberán ser tomados sólo como una guía, además que la conductividad térmica se incrementa con la humedad [42].

- c) Temperatura de transición vítrea, T_g . A temperaturas altas, los polímeros se vuelven líquidos muy viscosos en los que las cadenas moleculares están constantemente en movimiento, cambiando de forma y deslizándose unas sobre las otras. A temperaturas muy bajas, el mismo polímero sería un sólido duro, rígido y frágil.

El polímero al solidificarse forma un sólido amorfo o cristalino. Los polímeros con fuertes irregularidades en su estructura tienden a formar sólidos amorfos y los polímeros con cadenas muy simétricas tienden a cristalizar, por lo menos parcialmente.

En los sólidos cristalinos, las moléculas se encuentran ordenadas tridimensionalmente; esto es lo que se llama ordenamiento periódico y lo pueden tener los sólidos cristalinos constituidos por moléculas pequeñas. En el caso de los polímeros, las cadenas son muy largas y fácilmente se enmarañan, por lo tanto, no puede esperarse en ellos un orden tan perfecto, aunque algunos polímeros exhiben ordenamiento parcial en regiones llamadas cristalitos.

En la estructura de las fibras textiles poliméricas se distinguen dos zonas: las zonas cristalinas, formadas por uno o varios cristalitos, y las zonas amorfas, en las que las cadenas moleculares se enmarañan en un completo desorden.

Cuando los polímeros presentan zonas amorfas, tienen una transición denominada temperatura de transición vítrea, T_g ; esta temperatura es una propiedad de las zonas amorfas y es la temperatura a la cual un polímero cambia de duro y frágil a blando y flexible, además es la transición más importante abajo de la temperatura de fusión [43].

- d) La temperatura de fusión, T_m . Es la temperatura en la cual las zonas cristalinas del polímero adquieren mayor movilidad y el estado del polímero pasa de sólido a líquido.

Antes de que el acrílico funda, deben ser rotos fuertes enlaces. Además que las fuerzas repulsivas entre cadenas es una barrera para la rotación de enlaces, dando como resultado un denso esqueleto polimérico. Los efectos dipolares en el poliacrilonitrilo dan un punto de fusión estimado de alrededor de $320\text{ }^\circ\text{C}$ en estado seco, aunque a esta temperatura el polímero ya se descompuso por efectos del calor. Además presenta su temperatura de transición vítrea, alrededor de $105\text{ }^\circ\text{C}$.

Un polímero puede alcanzar su T_g , y al ser enfriado recupera su forma y propiedades originales. En cambio si la temperatura sigue aumentando se llegará a su temperatura de fusión, y al ser enfriado no se recuperará la forma original del polímero.

2.8.6 INTERACCIÓN DE LA FIBRA CON LA HUMEDAD.

Las fibras textiles tienen la propiedad de absorber humedad del ambiente; esta propiedad de absorción de humedad es muy importante y valorada, ya que además de mantener la piel seca, provoca que las telas actúen como reservas de calor, protegiendo al cuerpo de los cambios repentinos de las condiciones ambientales.

La absorción de humedad cambia las propiedades de la fibra; causa que la fibra se inflame, lo cual altera las dimensiones de la fibra, lo que provoca cambios en el tamaño, forma, rigidez y permeabilidad de los hilos y las telas. Las propiedades mecánicas y de fricción son alteradas, afectando el comportamiento de las fibras durante su procesamiento y uso final.

- a) Recuperación (Regain). La cantidad de agua absorbida por un espécimen es expresada como la masa de agua absorbida dividida por la masa de fibra seca.

$$\text{Recuperación} = R = \text{masa de agua absorbida por la fibra} / \text{masa de la fibra seca.}$$

- b) Contenido de humedad. Es otra forma de caracterizar la cantidad de humedad en una fibra; y es definida como la masa de agua absorbida por la fibra dividida por la masa de la fibra húmeda [44].

Contenido de Humedad = $M = \text{masa de agua absorbida por la fibra} / \text{masa de la fibra húmeda}$.

2.8.7 PROPIEDADES ESPECTROSCÓPICAS

- a) Absorción en UV-Vis. El grupo nitrilo alifático absorbe en la longitud de onda de la región ultravioleta, $\lambda_{\text{max}} = 170 \text{ nm}$ [45], aunque por la resonancia que generan los enlaces dipolo-dipolo dentro de y entre cadenas poliméricas, la absorción se desplaza hacia la región visible del espectro, cerca de los 300 nm. Lo que hace a la fibra acrílica muy estable a la luz, ya que en la región visible del espectro electromagnético absorbe solo un poco de energía. En la Fig. 2.16 se muestra la absorbancia de la fibra acrílica en crudo, sin color, junto con la fibra acrílica de color azul rey, que es el color con el que se trabajó en la presente tesis. La medición de absorbancia se realizó en un espectrómetro $\lambda 900$ marca Perkin Elmer en un ancho de longitud de onda de 190 a 3000 nm. Además en esta figura se observa que el color rey tiene un pico de absorción alrededor de 1060 nm, que coincide con la longitud de onda de emisión del láser de Nd:YAG, 1064 nm, usado para degradar el color.

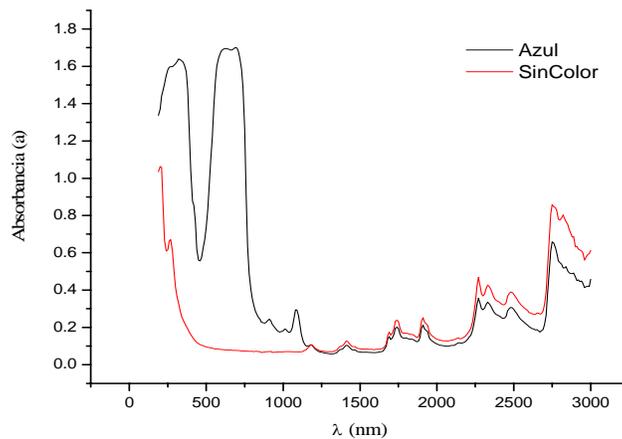


Fig. 2.16 Absorbancia de la fibra acrílica, sin color y de color azul rey.

b) Absorción de infrarrojo. La energía total de las moléculas consiste de cuatro energías parciales: traslacional, rotacional, vibracional y electrónica. Las transiciones en energía electrónica dan lugar a un incremento en la absorción o emisión de radiación en las regiones visible y ultravioleta del espectro electromagnético. La energía rotacional incrementa la absorción en la región de microondas o infrarrojo lejano. Las vibraciones moleculares incrementan las bandas de absorción en la región infrarroja del espectro [46].

La longitud de onda de la región infrarroja del espectro electromagnético va de 7.8×10^{-5} a 1×10^{-1} cm; en espectroscopía infrarroja la unidad más usada es el número de onda (cm^{-1}).

La interacción de la radiación infrarroja con las moléculas produce cambios en sus modos vibracionales, y cada molécula vibra o rota diferente, de acuerdo a su naturaleza química. La aparición de los picos ocurre donde la frecuencia de las ondas electromagnéticas corresponde a la frecuencia natural de vibración de dos átomos en un material [47].

Los enlaces triples, como el $\text{X}=\text{Y}-\text{Z}$, y los enlaces dobles conjugados $\text{X}=\text{Y}=\text{Z}$, absorben entre 2300 y 1900 cm^{-1} ; las vibraciones involucradas son el estiramiento del triple enlace y el estiramiento fuera de fase del enlace doble conjugado.

El grupo funcional del poliacrilonitrilo es el nitrilo, CN unido a un CH , cuya frecuencia de estiramiento se encuentra entre 2260 y 2240 cm^{-1} en nitrilos alifáticos [48].

Otro grupo que forma parte del esqueleto del acrílico es el CH_2 , cuya banda de absorción se encuentra entre 2925 y 2855 cm^{-1} .

Enseguida se anexa el espectro de infrarrojo del acrílico, Fig. 2.17, obtenido en un espectrofotómetro de infrarrojo FTIR, Avatar Nicolet.

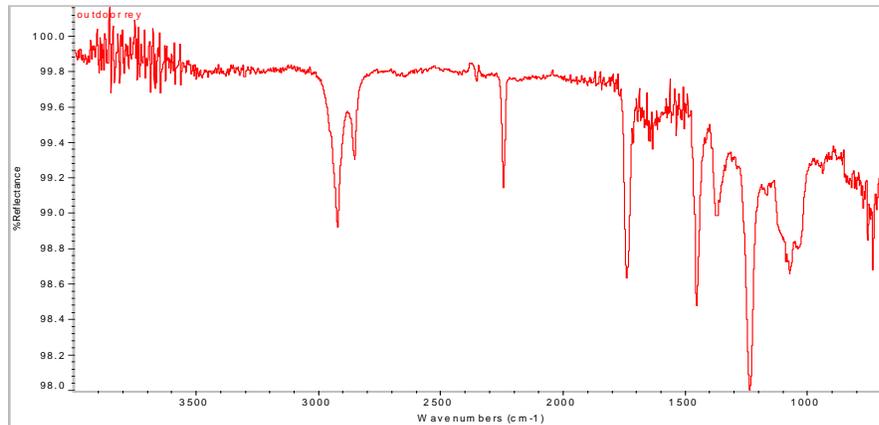


Fig. 2.17 Espectro de infrarrojo de la fibra acrílica.

Propiedad	Fibra acrílica
Gravedad Específica (g/cm^3)	1.16
Forma de la sección transversal	frijol
Tenacidad, seco (g/denier)	2.2-2.6
Tenacidad, húmedo (g/denier)	1.8-2.1
Elongación (% en la ruptura)	20-28
Índice de Refracción n_a	1.50-1.53
Índice de Refracción n_r	1.51-1.53
Birrefringencia Δn	-0.005
Estabilidad a la radiación solar	Excelente
Resistencia al ataque de agentes químicos	Excelente
Capacidad Calorífica (J/kg-K)	1286
Conductividad Térmica (W/m-K)	No reportado
Temperatura de Transición Vítreo ($^{\circ}\text{C}$)	85-95
Temperatura de descomposición ($^{\circ}\text{C}$)	250-320
Recuperación (Regain) (%)	1-2

Tabla 2.2 Propiedades físicas de la fibra acrílica.

2.9 EFECTOS DE LA RADIACIÓN EN LA ESTRUCTURA DEL ACRÍLICO Y SUS PROPIEDADES

La exposición de la fibra acrílica a los elementos del medio ambiente, puede causar su degradación, afectando tanto sus propiedades físicas como estéticas. La fibra se vuelve

quebradiza, lo que es indeseable en la mayoría de las aplicaciones de las fibras textiles, debido a la deterioración del esfuerzo tensil o la pérdida de elongación,. Además la pérdida de brillo, amarillamiento o desgaste del color son de vital importancia donde la apariencia de la fibra es primordial.

La exposición a la intemperie de las fibras acrílicas en un periodo de tiempo puede causar decoloración o deterioración de sus propiedades físicas. En la exposición al medio ambiente la fibra esta sujeta a efectos de la radiación ultravioleta y visible, calor, oxígeno, humedad y contaminantes del aire; la magnitud de estos efectos varía de localidad a localidad.

Las fibras acrílicas se encuentran entre las fibras que más resisten los efectos del medio ambiente, ya que pueden pasar varios años antes de que los efectos de la intemperie sean notables.

Se han desarrollado varios métodos acelerados para estudiar los efectos de la intemperie en los materiales poliméricos. El “weather ometer” es un equipo usado en las pruebas de intemperismo que intensifica la radiación ultravioleta y visible, mientras mantiene la distribución espectral de la fuente de iluminación semejante a la distribución espectral de la radiación solar.

Cuando un material polimérico como las fibras acrílicas es expuesto a radiación ultravioleta y visible, la degradación puede ser causada por rompimiento fotolítico directo de la cadena polimérica. Cuando el poliacrilonitrilo es irradiado en vacío, se desprende hidrógeno, metano, acrilonitrilo y cianuro de hidrógeno, además se pueden desarrollar reacciones entrecruzadas.

La energía de la radiación ultravioleta en la superficie de la tierra (290-380 nm) es más que suficiente para romper la mayoría de los enlaces químicos. La radiación a 300 nm tiene una energía capaz de romper el enlace alifático C-H y la de 350 nm romperá los enlaces C-C. Aunque es muy probable que la degradación durante la exposición a la intemperie se realice por la reacción de moléculas poliméricas excitadas con el oxígeno atmosférico. Las moléculas del polímero son excitadas por la absorción de la energía

ultravioleta, pasando del estado base a un estado excitado; esto ocurre directamente en las cadenas del polímero, ya que algunos grupos funcionales, como los grupos carbonilo (C=O), aromáticos, nitrilos (CN), etc. absorben la energía ultravioleta; además se pueden encontrar aditivos, colorantes, residuos de catalizadores, que absorben energía y la transfieren al polímero. Cuando las moléculas no pierden energía por fluorescencia o fosforescencia o por transferencia de calor, pueden formar radicales que reaccionan con el oxígeno para formar peróxidos.

Al incrementar la cantidad de energía ultravioleta mas allá de la contenida en la radiación solar, se acelera el proceso de degradación, aunque en algunos estudios fundamentales de degradación del poliacrilonitrilo, se ha encontrado que son reacciones químicas muy complejas y dependientes de la energía de radiación [49].

En la Fig. 2.19 se presenta un diagrama esquemático de los diferentes caminos y reacciones que se pueden involucrar en la degradación de la fibra acrílica por intemperismo.

2.10 FIBRAS OUTDOORS

Las fibras acrílicas tienen la mejor estabilidad a la luz de todas las fibras orgánicas, esta ventaja es capitalizada en la producción de fibras acrílicas pigmentadas. Con esta pigmentación, es posible mantener el color y la fuerza requerida de las telas; estas características son especialmente importantes para aplicaciones en toldos o lonas, también llamados “outdoors”, donde la apariencia es de vital importancia.

Las fibras acrílicas usadas para producir fibras de uso en interiores o “indoors”, también son usadas para uso en exteriores o “outdoors”, con la única diferencia de que estas últimas son pigmentadas durante la hilatura.

Pigmentos y estabilizantes a la luz, ambos insolubles, son dispersados en una solución diluida de polímero y agregados en la solución de hilatura.

El proceso de hilatura para productos pigmentados no difiere sustancialmente del proceso para productos en crudo o sin color, solo se introduce una orientación o estiramiento adicional para darle mayor fuerza a las telas y soporten las aplicaciones esperadas.

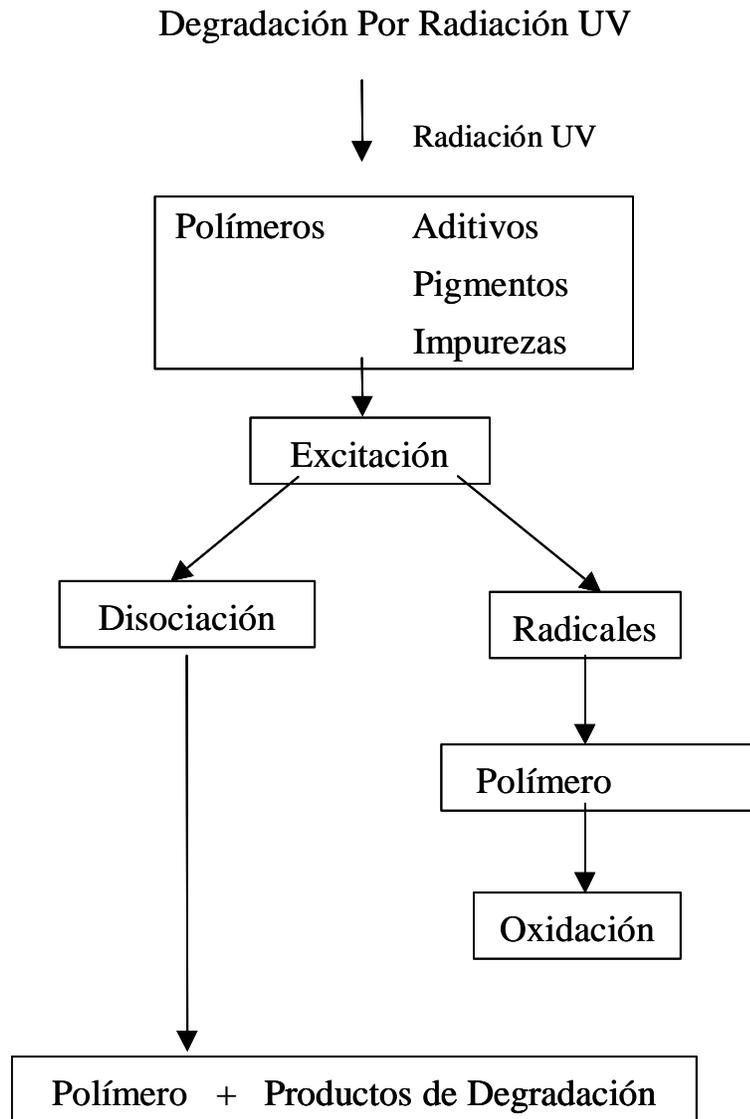


Fig. 2.19 Diagrama esquemático de los diferentes caminos por los que se puede realizar la degradación del color por exposición a la intemperie.

2.10.1 PIGMENTOS PARA FIBRAS OUTDOORS

Los pigmentos usados en las fibras “outdoors”, son seleccionados cuidadosamente, ya que deben tener una alta estabilidad a la luz y a la intemperie. Enseguida se citan los pigmentos recomendados en la literatura, por su solidez a la luz, para uso en fibras

“outdoors”, primeramente se describirá su constitución química y su estabilidad a la luz y después la fórmula química de cada uno de ellos [50].

Pigmento	Constitución Química	Fórmula Química	Solidez a la Luz
Pigmento Amarillo 24	Antraquinona	Fig. 2.20	Excelente
Pigmento Naranja 43	Antraquinona	Fig. 2.21	Excelente
Pigmento Café 25	Monoazo	Fig. 2.22	Excelente
Pigmento Rojo 149	Orgánico	Fig. 2.23	Excelente
Pigmento Rojo 171	Monoazo	Fig. 2.24	7
Pigmento Rojo 88	Tioindigoide	Fig. 2.25	Muy buena
Pigmento Violeta 23	Oxazina	Fig. 2.26	7-8
Pigmento Azul 15:1	Complejo de cobre de la ftlocianina, forma α	Fig. 2.27	7-8
Pigmento Azul 15:3	Complejo de cobre de la ftlocianina, forma β	Fig. 2.28	7-8
Pigmento Verde 7	Ftalocianina	No Reportada	7-8
Pigmento Verde 36	Ftalocianina	No reportada	7

Tabla 2.3 Propiedades químicas de los pigmentos usados en fibras “outdoors” [51].

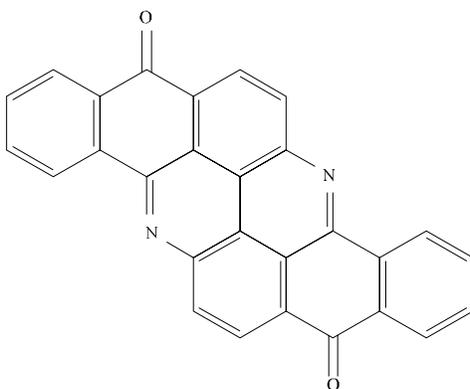


Fig. 2.20 Molécula del Pigmento Amarillo 24 (Pigment yellow 24)

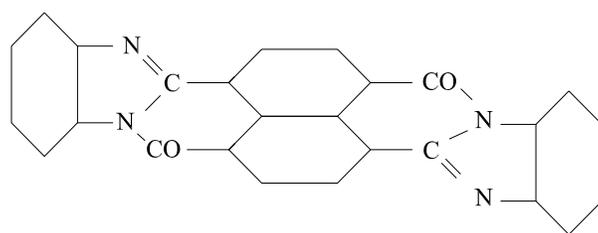


Fig. 2.21 Molécula del Pigmento Naranja 43 (Pigment orange 43)

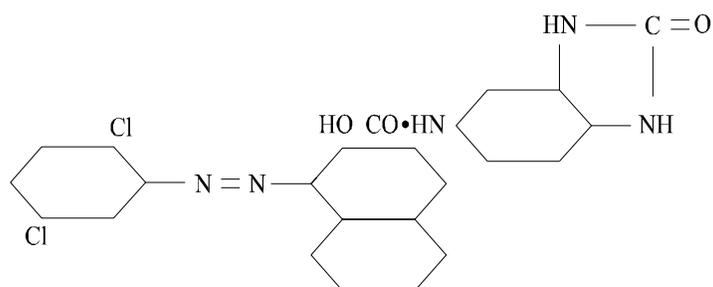


Fig. 2.22 Molécula del Pigmento Café 25 (Pigment brown 25)

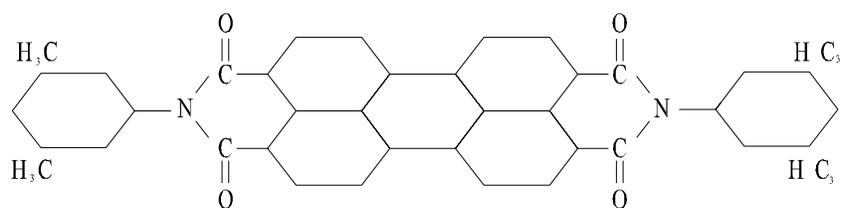


Fig. 2.23 Molécula del Pigmento Rojo 149 (Pigment red 149)

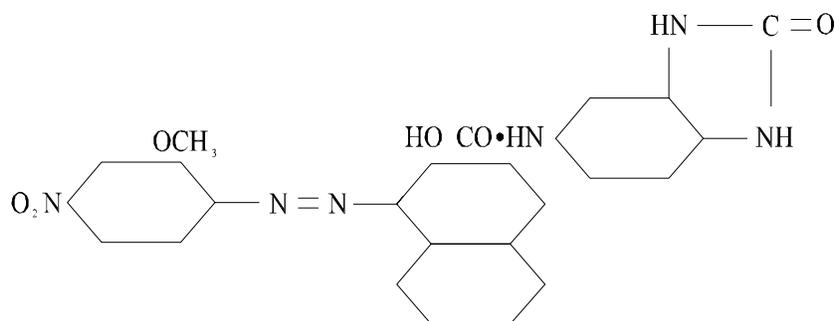


Fig. 2.24 Molécula del Pigmento Rojo 171 (Pigment red 171)

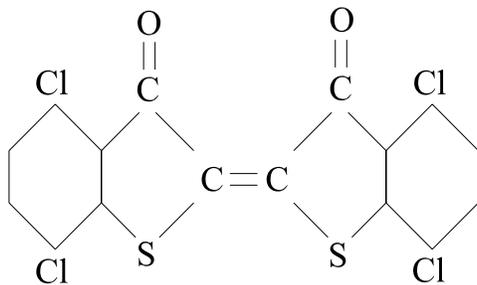


Fig. 2.25 Molécula del Pigmento Rojo 88 (Pigment red 88)

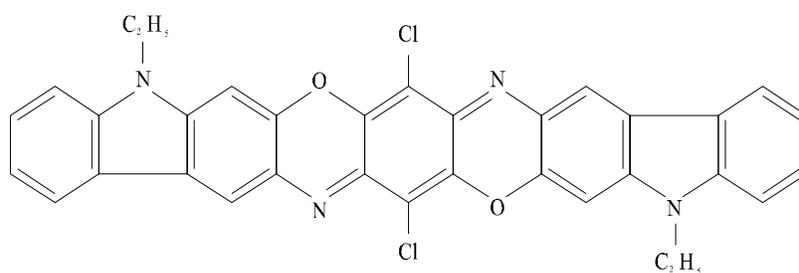


Fig. 2.26 Molécula del Pigmento Violeta 23 (Pigment violet 23)

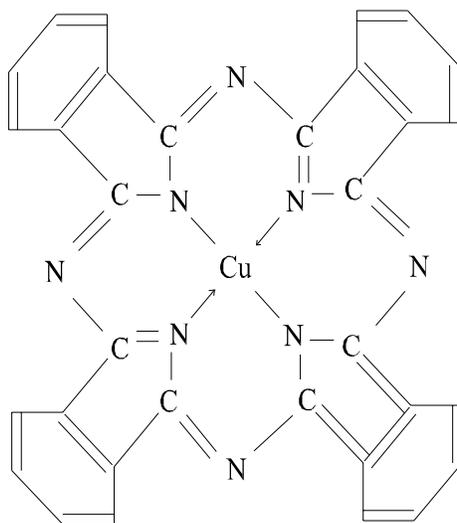


Fig. 2.27 Molécula del Pigmento Azul 15:1 (Pigment blue 15:1)

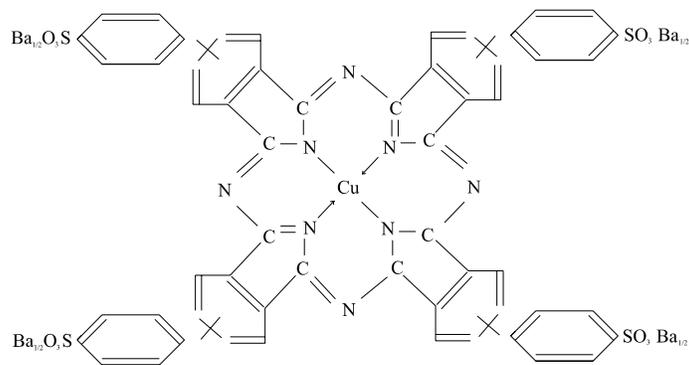


Fig. 2.28 Molécula del Pigmento Azul 15:3 (Pigment blue 15:3)

Las moléculas del pigmento verde 7 (Pigment green 7) y del Pigmento Verde 36 (Pigment green 36), no son reportadas en la literatura, ya que es muy semejante a la molécula del pigmento azul 15:1, Fig. 2.27.

El desarrollo experimental del presente trabajo se realizó sobre fibra acrílica “outdoors” desarrollada por Cydsa en Crysel, la planta productora de fibra acrílica, cuya evaluación de la estabilidad a la luz es realizada en el Centro de Tecnología Textil; los pigmentos usados son desarrollados por específicamente para esta empresa y son secreto industrial, por lo que no se tuvo acceso a esta información.

2.11 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. Masson James, *Acrylic Fiber Technology and Application*, Capítulo 1, Marcel Dekker, USA, 1995
- [2] <http://www.come.to/>
- [3] Gacén Guillen Joaquín, *Fibras Textiles Propiedades y Descripción*, Capítulo 1, Universidad Politécnica de Cataluña, Terrassa España, 1991.

- [4] G. Tortora Phyllis, Understanding Textiles, Queens College, Capítulo 2, 4a edición, Macmillan Publishing Company. USA, 1992.
- [5] Mendoza Vergara Clemente, La Tintura de Fibras Acrílicas, Bayer de México, Boletín Técnico.
- [6] C. Masson James, Acrylic Fiber Technology and Applications, Capítulo 1, Marcel Dekker, USA, 1995
- [7] <http://www.psrc.usm.edu/spanish/vinyl.htm>
- [8] B. Warner Steven, Fiber Science, Capítulo 2, Prentice Hall, USA, 1995
- [9] <http://www.psrc.usm.edu/macrog/acrylates.htm>
- [10] Tortora Phyllis G, Understanding Textiles, Capítulo 3, Macmillan Publishing Company, 4a edición, USA.
- [11] http://es.melma.com/mag/36/index_bn.html
- [12] <http://www.psrc.usm.edu/spanish/radical.htm>
- [13] Billmeyer Fred W., Textbook of Polymer Science, Capítulo 3, John Wiley & Sons, Singapur, 1984.
- [14] S.M. Burkinshaw, Chemical Principles of Synthetic Fibre Dyeing , Capítulo 3, Blackie Academic & Professional, Gran Bretaña, 1995.
- [15] <http://www.psrc.usm.edu/spanish/pan.htm>
- [16] Kroschwitz Jacqueline I, Polymers Fibers and Textiles a Compendium, Capítulo 1, Encyclopedia Reprint Series, John Wiley and Sons.
- [17] <http://www.fut.es/protciulang/plaseqta/quimica/avinil.htm>
- [18] Reusch William H, Química Orgánica, Capítulo 6, Mc Graw Hill, México, 1981
- [19] Billmeyer Fred W., Textbook of Polymer Science, Capítulo 18, John Wiley & Sons, USA, 1984.
- [20] Tortora Phyllis G, Understanding Textiles, Capítulo 3, Macmillan Publishing Company, 4a edición USA.
- [21] Warner Steven B., Fiber Science, Capítulo 3, Prentice Hall, USA, 1995
- [22] C. Masson James, Acrylic Fiber Technology and Applications, Capítulo 4, Marcel Dekker, USA, 1995
- [23] Warner Steven B., Fiber Science, Capítulo 2, Prentice Hall, USA, 1995

- [24] Thornton Morrison Robert y Neilson Boyd Robert, Química Orgánica, Capítulo 1, Addison Wesley Iberoamericana, USA, 1990.
- [25] Billmeyer Fred W., Textbook of Polymer Science, Capítulo 1, John Wiley & Sons, USA, 1984.
- [26] Billmeyer Fred W., Textbook of Polymer Science, Capítulo 1, John Wiley & Sons, USA, 1984.
- [27] Warner Steven B., Fiber Science, Capítulo 2, Prentice Hall, USA, 1995
- [28] Billmeyer Fred W., Textbook of Polymer Science, Capítulo 1, John Wiley & Sons, USA, 1984.
- [29] Kroschwitz Jacqueline I, Polymers Fibers and Textiles a Compendium, Capítulo 1, Encyclopedia Reprint Series, John Wiley and Sons.
- [30] Morton, W.E. y Hearle J.W.S., Physical Propierties of Textiles Fibres, Capítulo 1, Textile Institute, Reino Unido, 1997.
- [31] Warner Steven B., Fiber Science, Capítulo 5, Prentice Hall, USA, 1995
- [32] Morton, W.E. y Hearle J.W.S., Physical Propierties of Textiles Fibres, Capítulo 1, Textile Institute, Reino Unido, 1997.
- [33] Warner Steven B., Fiber Science, Capítulo 7, Prentice Hall, USA, 1995
- [34] Warner Steven B., Fiber Science, Capítulo 12, Prentice Hall, USA, 1995I
- [35] Morton, W.E. y Hearle J.W.S., Physical Propierties of Textiles Fibres, Capítulo 22, Textile Institute, Reino Unido, 1997.
- [36] Steen William M, Laser Material Processing, Capítulo 2, Springer, Gran Bretaña, 1991.
- [37] Warner Steven B., Fiber Science, Capítulo 12, Prentice Hall, USA, 1995I
- [38] Morton, W.E. y Hearle J.W.S., Physical Propierties of Textiles Fibres, Capítulo 22, Textile Institute, Reino Unido, 1997.
- [39] Warner Steven B., Fiber Science, Capítulo 12, Prentice Hall, USA, 1995
- [40] Davis, J.R. ASM Materials Engineering Dictionary, ASM International, USA, 1992
- [41] Kroschwitz Jacqueline I, Polymers Fibers and Textiles a Compendium, Capítulo 1, Encyclopedia Reprint Series, John Wiley and Sons.
- [42] Warner Steven B., Fiber Science, Capítulo 13, Prentice Hall, USA, 1995

- [43] <http://www.psrc.esm.edu/macrog/tg.htm>
- [44] Morton, W.E. y Hearle J.W.S., Physical Properties of Textiles Fibres, Capítulo 1, Textile Institute, Reino Unido, 1997.
- [45] Coyle John D., Introduction to Organic Photochemistry, Capítulo 5, John Wiley and Sons, Gran Bretaña. 1991.
- [46] Colthup N.B. et al, Introduction to Infrared and Raman Spectroscopy, Capítulo 1, Academic Press, USA, 1990.
- [47] Morton, W.E. y Hearle J.W.S., Physical Properties of Textiles Fibres, Capítulo 1, Textile Institute, Reino Unido, 1997.
- [48] Colthup N.B. et al, Introduction to Infrared and Raman Spectroscopy, Capítulo 6, Academic Press, USA, 1990.
- [49] C. Masson James, Acrylic Fiber Technology and Applications, Capítulo 8, Marcel Dekker, USA, 1995
- [50] C. Masson James, Acrylic Fiber Technology and Applications, Capítulo 6, Marcel Dekker, USA, 1995
- [51] The Society of Dyers and Colourists, Color Index, Pigments and Solvents Dyes, AATCC, 1982, Inglaterra.

CAPÍTULO III

SOLIDEZ DEL COLOR

3.1 INTRODUCCIÓN.

La calidad es comúnmente definida con palabras como excelente, superior, etc. Este término puede ser aplicado en todas las fases de la manufactura de un producto, desde la selección de materias primas hasta su empaque final. Sin embargo la capacidad de un producto de retener sus características originales de calidad, color, textura, forma, etc., en toda su vida útil es crucial.

El control de calidad, definido como un sistema para verificar y mantener un nivel deseado de calidad en un producto o servicio por medio de una cuidadosa planeación, usando el equipo adecuado, con una inspección continua, es el responsable de obtener un producto de alta calidad verificando que cada paso del proceso de manufactura sea realizado correctamente [1].

Debido a la alta demanda de productos textiles que cumplan con ciertos requisitos de calidad, las organizaciones involucradas con textiles, han elaborado normas o estándares internacionales, cuyo objetivo es analizar el producto textil y determinar el grado de calidad del producto en cuestión [1]. A través de numerosos comités técnicos, la “*American Association of Textile, Chemist and Colorist*” (AATCC), ha desarrollado varias normas que determinan la solidez del color de los productos textiles, y predicen la permanencia del color en el uso final [2].

3.2 SOLIDEZ DEL COLOR

La solidez del color es la propiedad de un material coloreado que le permite mantener su tono y saturación originales a través de su tiempo de vida útil. Los colorantes y pigmentos son considerados como sólidos, cuando no se degradan bajo la influencia de algún factor o agente externo [2].

La definición más común de la solidez del color es la siguiente: La solidez del color es la resistencia de un material a cambiar en algunas de sus características de color (tono, saturación o claridad), a transferir sus colorantes a materiales adyacentes, o ambas, como resultado de la exposición del material a algún ambiente que pudiese encontrar durante su procesamiento, análisis, almacenamiento o uso final [3].

Esta definición nos dice que cualquier cambio de color, ya sea en tono, saturación o claridad, en cualquier dirección, ya sea que aumente o disminuya, indica una baja solidez.

Existen varios agentes que degradan el color de los géneros textiles, ya sea la luz, el agua, el sudor, etc., pero cada textil se comporta diferente y de forma independiente ante cada uno de estos factores, alguno puede ser muy sólido a la luz, y degradarse con facilidad ante el agua de mar. Estos agentes se ensayan individualmente, no aceptándose el efectuar ensayos en los que intervengan varios conjuntamente, aunque en el uso final un mismo producto textil pueda estar expuesto a varios factores a la vez [4].

Todas las pruebas de solidez se realizan conforme a un procedimiento o norma estándar. El material a analizar es sometido a algún ambiente de desgaste y después es evaluado para encontrar algún cambio de color [5].

3.2.1 FACTORES QUE AFECTAN LAS SOLIDECES

Existen varios factores que afectan la estabilidad del color de un género textil, como son los siguientes:

- a) El colorante. La estructura química del colorante es fundamental para las propiedades de solidez, esto incluye la resistencia del cromóforo (la parte del colorante a la cual se

debe el color es el cromóforo, y el auxocromo es la que une el colorante a la fibra) del colorante a un ataque fotoquímico (reacción química inducida por radiación) y la forma en la cual esta interacción es modificada por la naturaleza de la fibra [6]. Incluso dentro de una misma familia de colorantes, los compuestos más insolubles, son más sólidos a los tratamiento en húmedo; mientras que los que están en forma oxidada, resisten más a los oxidantes; los que contiene átomos de cloro son más sólidos al blanqueo por cloro, etc.

El estado de agregación del colorante también tiene influencia en la solidez; es decir, que un género textil de una misma fibra es más sólida a la luz cuanto mayor sean los agregados moleculares de colorante en su interior.

- b) La fibra. Existen familias completas de colorantes que tiene mejores solidez sobre una fibra que sobre otra. Además dentro de una misma clase de fibra, existen diferencias de solidez de acuerdo a los tratamientos a los que han sido sometidas y que puede influir sobre el estado de la fibra, por ejemplo el mercerizado en algodón (tratamiento a base de hidróxido de sodio y bajo tensión que mejora sus propiedades tintóreas) o el clorado en la lana.
- c) La intensidad de la tintura. Debido a que la variación de la solidez del color se debe a la destrucción de las moléculas de colorante o a las pérdidas de las mismas, esta depende de la cantidad de colorante depositado inicialmente sobre la fibra [7].

3.3 EVALUACIÓN DE LA SOLIDEZ DEL COLOR

Todos los ensayos de solidez se realizan conforme a procedimientos generales, aceptados a escala internacional. Aunque cada país desarrolla sus propios métodos, todos, de alguna forma, convergen en los procedimientos y formas de realizarlos, de tal manera que los resultados sean similares, aunque no intercambiables.

Los procedimientos mas aceptados internacionalmente son los desarrollados por la AATCC, que a través de numerosos comités técnicos, no solo desarrolla, revisa y actualiza los procedimientos específicos para determinar la solidez del color a diferentes

agentes, sino que desarrolla los procedimientos para evaluar y cuantificar el grado de solidez del producto en cuestión, como es la escala de grises para el cambio de color y la escala de grises para la transferencia de color que se describen a continuación.

3.3.1 ESCALA DE GRISES PARA EL CAMBIO DE COLOR

Esta escala consiste en nueve pares de cuadros de un color gris estándar, Fig. 3.1, cada par representa una diferencia en color o contraste (matiz e intensidad) y corresponde a una clase de solidez específica. El primer par de cuadros es del mismo color gris, al cual le corresponde la clase 5 de solidez, y el primer cuadro de los siguientes pares de cuadros es del mismo color. El segundo cuadro de cada par de cuadros es de un gris mas claro, para representar una diferencia de color cada vez mayor, correspondiéndole al par de cuadros con mayor diferencia de color la clase 1 de solidez del color.

Los resultados de la solidez del color son evaluados visualmente, comparando la diferencia de color entre el espécimen sin ensayar y el ensayado con la diferencia de color de los cuadros de la escala de grises. La clase de solidez del espécimen ensayado es el número de la escala de grises que corresponde al contraste entre el espécimen original y el analizado [8].



Fig. 3.1 Escala de grises para evaluar el cambio de color

Las clases de solidez son definidas del 5 al 1, donde la clase 5 indica que no se tiene diferencia de color entre el espécimen original y el ensayado; la clase 1 indica un cambio de color muy notable entre el espécimen original y el ensayado. Esta escala de grises también puede ser descrita cuantitativamente como se menciona a continuación:

Clase 5,	Excelente
Clase 4,	Muy buena
Clase 3,	Buena (promedio)
Clase 2,	Regular
Clase 1,	Pobre

Generalmente, los géneros textiles que presentan solidez clase 2 o 1 son considerados inaceptables o de baja calidad [9].

3.3.2 ESCALA DE GRISES PARA LA TRANSFERENCIA DE COLOR

Esta escala consiste en nueve pares de cuadros blancos y grises, Fig.3.2, cada par representa una diferencia en color o contraste (matiz e intensidad) y corresponde a una clase de transferencia de color específica. El primer par de cuadros es blanco, al cual le corresponde la clase 5 de transferencia de color, y el primer cuadro de los siguientes pares de cuadros es también blanco. El segundo cuadro de cada par de cuadros es cada vez de un gris mas intenso, para representar una diferencia de color cada vez mayor, correspondiéndole al par de cuadros con mayor diferencia de color la clase 1 de transferencia del color.

Los resultados de la transferencia de color son evaluados visualmente, comparando la diferencia de color entre la tela testigo ensayada y tela sin ensayar con la diferencia de color de los cuadros de la escala de grises. La clase de transferencia del espécimen ensayado es el número de la escala de grises que corresponde al contraste entre el espécimen original y el analizado.

Las clases de transferencia de color son definidas del 5 al 1, donde la clase 5 indica que no hubo transferencia de color del espécimen ensayado a la tela testigo y la clase 1 indica una transferencia de color muy notable del espécimen ensayado a la tela testigo [10].



Fig. 3.2 Escala de grises para evaluar la transferencia de color

3.3.3 SOLIDEZ DEL COLOR DETERMINADA POR MEDIO DE ESPECTROCOLORÍMETRO

Las clases de solidez del color tienen una correspondencia con la diferencia total del color en unidades del sistema de color CIEL*a*b*, como se indica en la tabla 3.1 [11].

Clase de solidez	Diferencia total de color DE^*_{CIELab}	Tolerancia en unidades DE^*_{CIELab}
5	0.0	0.2
4-5	0.8	0.2
4	1.7	0.3
3-4	2.5	0.3
3	3.4	0.4
2-3	4.8	0.5
2	6.8	0.6
1-2	9.6	0.7
1	13.6	1.0

Tabla 3.1 Correspondencia entre la diferencia total del color y las clases de solidez del color.

3.4 SOLIDEZ DEL COLOR A LA LUZ

La solidez del color a la luz es la resistencia de un material a cambiar en alguna de sus características de color como resultado de su exposición a la luz del sol o a una fuente de luz artificial [12].

Los requerimientos de solidez a la luz son extremadamente variables, va de mínima para ropa de dormir y de revestimiento a rigurosa para la industria automotriz. En general los artículos de casa, como las cortinas, tapetes, etc., requieren mas solidez a la luz que la ropa de vestir, ya que ésta cuando no se usa se guarda, mientras que las cortinas reciben la luz del sol todo el día.

La exposición de productos textiles a iluminación ordinaria de interiores no tiene el mismo efecto en la degradación del color como lo tiene la exposición a la radiación del sol. Esto se debe a que la radiación del sol incluye una amplia gama de regiones del espectro electromagnético, Fig. 3.3, va desde la región ultravioleta, comenzando a los 280 nm pasa por el visible (400-700 nm) hasta llegar al infrarrojo (por arriba de los 700 nm) [13].

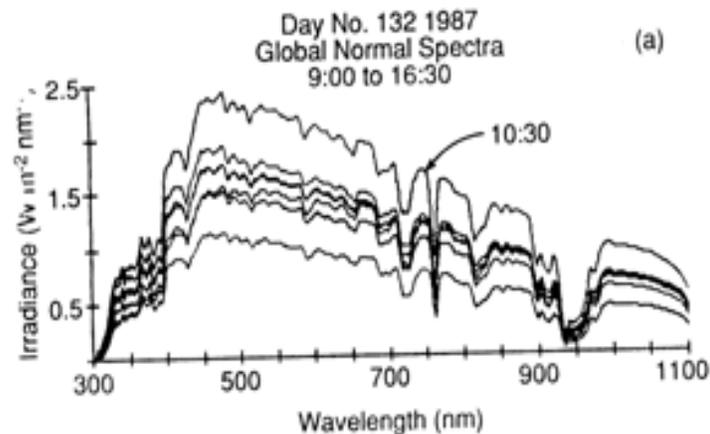


Fig.3.3 Distribución espectral de la radiación solar en la superficie de la tierra

El método 16, solidez a la luz, del Manual Técnico de la AATCC incluye varios procedimientos para evaluar la solidez del color a la luz en textiles. La solidez del color a la luz es el área más compleja de las evaluaciones de estabilidad del color. Los efectos de la luz en los colorantes varían de acuerdo a la distribución espectral de energía de la fuente de luz (λ_c). Los contaminantes atmosféricos, como los óxidos de nitrógeno y el ozono, degradan el color de los textiles conjuntamente con la luz del sol. Además los efectos de la luz varían substancialmente con la humedad relativa. Estas variables,

distribución espectral de la energía, contaminantes del aire y la humedad, afectan tanto los resultados de exposición natural a la luz del sol, como a las pruebas aceleradas con fuentes de luz artificial.

3.4.1 VARIABLES QUE AFECTAN LA SOLIDEZ DEL COLOR A LA LUZ.

La determinación de la estabilidad a la luz es una de las determinaciones más complejas, debido a que intervienen diferentes variables, entre las cuales podemos nombrar las siguientes:

- a) Distribución espectral de energía de la fuente (λ_c). La fuente de radiación de referencia de la solidez del color a la luz debe ser la radiación solar; desafortunadamente, la distribución espectral de la energía solar varía de hora a hora, de día a día, de lugar a lugar y de estación a estación. La energía solar incluye energía radiante de un amplio gama del espectro electromagnético, va desde la radiación ultravioleta, (alrededor de los 280 nm) pasando por el visible (de 400 a 700 nm) hasta el infrarrojo (por arriba de los 700 nm).

Cada radiación electromagnética es descrita por la longitud de onda (λ) en que es emitida y por su intensidad (I), ambas definidas por la distribución espectral de energía de la fuente de radiación (λ_c). La absorción de la radiación, primer paso necesario para la interacción de la luz con la materia, y el rompimiento de los enlaces químicos, un efecto primario crítico de la radiación absorbida, dependen de la longitud de onda (λ) de la radiación y de la naturaleza química del material irradiado, debido a que los electrones solo absorben fotones de una determinada y específica energía (fórmula 3.1).

$$E = hv \quad (3.1)$$

Generalmente las longitudes de onda cortas de ultravioleta son absorbidas en mayor cantidad que las longitudes de onda más largas. Además a más corta la longitud de onda, mayor la energía del fotón asociado a dicha longitud de onda y mayor la tendencia de romper enlaces químicos mas fuertes.

Los colorantes absorben parte de la energía solar que les llega y la convierten en calor. Si esta energía es lo suficientemente fuerte para romper los enlaces químicos presentes en el colorante o en la fibra misma, causan la degradación del color.

Los enlaces químicos presentes en los polímeros, usados como fibras textiles, y en los colorantes son de diferente naturaleza y por lo tanto absorben energía en diferentes regiones del espectro electromagnético, Fig.3.4. Los enlaces químicos sencillos presentes en moléculas orgánicas, por ejemplo polietileno y polipropileno, absorben muy poca o nada de energía en la región visible y ultravioleta del espectro electromagnético; enlaces dobles aislados en moléculas orgánicas, presentes en seda, poliéster y lana, no absorben en la región visible, pero pueden absorber en la región ultravioleta; enlaces dobles conjugados en moléculas orgánicas, presentes en la mayoría de los colorantes, pueden absorber fuertemente en la región visible y ultravioleta del espectro; los compuestos inorgánicos pueden absorber fuertemente en la región visible y ultravioleta del espectro.

Además de lo anterior, debemos indicar que cuanto más débil sea el enlace químico, menor la cantidad de energía que necesita para romperse; por ejemplo, el enlace carbono-nitrógeno es relativamente débil, puede ser roto por un fotón de energía ultravioleta a cualquier longitud de onda más corta que 390 nm, justo debajo de la radiación visible; otro ejemplo que ilustra lo anterior es que lana, seda, nylon, contiene dobles enlaces aislados en forma de carbonilo, doble enlace carbono-oxígeno, lo cual les da una baja estabilidad a la luz.

Es posible que existan enlaces que no absorban radiación electromagnética, pero que pueden ser involucrados en las reacciones químicas debido a que una vez roto el enlace químico, los fragmentos de radicales libres son altamente reactivos y reaccionan con muchos otros compuestos [14].

En general, a mayor cantidad de longitudes de onda cortas de radiación ultravioleta en la fuente de luz, mayor degradación puede causar y debido a que los colorantes son especialmente sensibles a las longitudes de onda que tienden a absorber; se

consideran factores de degradación del color la distribución promedio de energía ultravioleta de la fuente de luz, la absorción característica de los colorantes y la constitución química de la fibra [15].

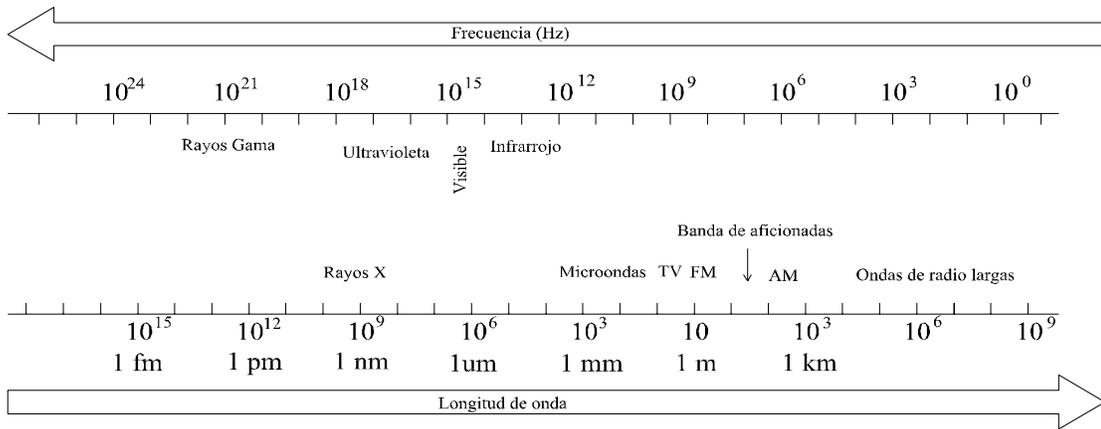


Fig. 3.4 Espectro electromagnético

Región Espectral	Subregión	Intervalo de Longitud de onda (m)		Intervalo de Frecuencia (Hz)	
Rayos gamma			1.00×10^{-11}		3.00×10^{19}
Rayos X		1.00×10^{-11}	1.00×10^{-8}	3.00×10^{19}	3.00×10^{16}
Ultravioleta	UV-C	1.00×10^{-8}	2.80×10^{-7}	3.00×10^{16}	1.07×10^{15}
	UV-B	2.80×10^{-7}	3.15×10^{-7}	1.07×10^{15}	9.52×10^{14}
	UV-A	3.15×10^{-7}	3.80×10^{-7}	9.52×10^{14}	7.89×10^{14}
	Violeta	3.80×10^{-7}	4.30×10^{-7}	7.89×10^{14}	6.96×10^{14}
	Azul	4.30×10^{-7}	5.00×10^{-7}	6.96×10^{14}	6.00×10^{14}
Visible	Cyan	5.00×10^{-7}	5.20×10^{-7}	6.00×10^{14}	5.76×10^{14}
	Verde	5.20×10^{-7}	5.65×10^{-7}	5.76×10^{14}	5.30×10^{14}
	Amarillo	5.65×10^{-7}	5.80×10^{-7}	5.30×10^{14}	5.17×10^{14}
	Naranja	5.80×10^{-7}	6.25×10^{-7}	5.17×10^{14}	4.80×10^{14}
Infrarrojo	Rojo	6.25×10^{-7}	7.50×10^{-7}	4.80×10^{14}	4.00×10^{14}
	IR cercano	7.50×10^{-7}	1.40×10^{-6}	4.00×10^{14}	2.14×10^{14}
	IR lejano	1.40×10^{-6}	1.00×10^{-3}	2.14×10^{14}	3.00×10^{11}
Microondas		1.00×10^{-3}	1.00×10^0	3.00×10^{11}	3.00×10^8
Ondas de radio			1.00×10^0		3.00×10^8

Tabla 3.2 Regiones del espectro electromagnético

La fibra acrílica en crudo, o sin color, objeto del presente estudio tiene su principal absorción después de los 300 nm, debido a la resonancia que los enlaces CN forman dentro y entre cadenas, explicados en el capítulo anterior, esto le da a la fibra una estabilidad a la luz muy alta, y cuya degradación del color se debe principalmente a los pigmentos usados en la coloración.

En los métodos acelerados de degradación de color se debe poner especial atención en la presencia de longitudes de onda (λ) cortas no presentes en la radiación solar, ya que pueden acelerar la degradación y alterar los mecanismos y tipos de degradación y sus efectos no serán comparables con los efectos de la radiación solar. Los métodos acelerados que involucran cambios en los mecanismos y tipos de degradación, no pueden ser confiables en predecir los tiempos de vida en condiciones ambientales.

Si la distribución espectral de la radiación de la fuente, (λ_c), de luz artificial difiere de la luz solar en la región ultravioleta y visible, puede alterar la estabilidad de los textiles si lo comparamos con su rango de estabilidad cuando se exponen a la luz del sol. El rango de estabilidad depende además de la sensibilidad de los materiales a la radiación absorbida, de la cantidad de energía que tienden a absorber. Esta cantidad de energía absorbida variará con la fuente de radiación debido a las diferencias en las propiedades de absorción de los materiales [16].

Debido a lo anterior que el objetivo del presente trabajo es obtener una correlación entre el método bajo norma y el método de degradación de color con láser.

- b) Irradiancia (E). La intensidad de radiación a cada longitud de onda (λ) que llega a la superficie de un material, es decir el nivel de exposición, es determinada por el número de fotones asociados con cada longitud de onda de la radiación. El número de fotones incidentes, absorbidos por un material capaz de absorber fotones en dicha longitud de onda, se incrementa conforme incrementa la irradiancia. Sin embargo la dependencia de la velocidad de degradación con el nivel de irradiancia es complejo, varía con los diferentes materiales, tipos de estabilizantes presentes y longitud de onda (λ) de la radiación, por lo que raramente se tiene una relación lineal. A altas

intensidades de radiación, el rendimiento cuántico de degradación, es decir la cantidad de degradación por fotones absorbidos será menor que a intensidades bajas. Como resultado de las altas concentraciones de radicales libres formados a altos niveles de irradiancia, ocurrirá una gran cantidad de recombinaciones y las reacciones con oxígeno y otras moléculas se reducirán. Esto significa que al incrementar al doble la irradiancia, no necesariamente se duplica la velocidad de degradación.

- c) Temperatura. En todos los materiales incluyendo los textiles, la temperatura es equivalente a la cantidad de energía del movimiento de átomos y moléculas; esto es, a altas temperaturas, los átomos y moléculas se mueven más rápido y con mayor energía [17]. La velocidad de las reacciones químicas se incrementa a temperaturas elevadas, y, por lo tanto, aceleran la degradación de las fibras y los colorantes [18].

La temperatura de los materiales expuestos a la radiación solar puede tener una influencia significativa en la cantidad de radiación absorbida. El efecto destructivo de la radiación se incrementa a temperaturas elevadas, principalmente por que se incrementa la velocidad de las reacciones secundarias. A altas temperaturas, la velocidad de difusión de oxígeno se incrementa y los fragmentos de radicales libres, formados a partir de los procesos fotoquímicos primarios, son separados con mayor facilidad. Con esto la posibilidad de una recombinación se reduce y en su lugar se llevan a cabo las reacciones secundarias. Además a elevadas temperaturas se llevan a cabo reacciones que no es posible que se realicen a bajas temperaturas.

La degradación debida a radiación electromagnética inicia en la parte externa del material, continuando después hacia su interior, realizándose en la región cristalina y amorfa de los materiales expuestos, ya que dicha radiación puede penetrar en ambas regiones [19].

Una regla muy generalizada sobre el efecto de la temperatura en la velocidad de reacción es que esta se incrementa al doble si la temperatura se incrementa 10 °C. Sin embargo en la degradación fotoquímica esta relación no es observada, debido a que a una temperatura específica se realizan diferentes mecanismos de degradación. La

absorción de la energía solar esta relacionada con el color, como ejemplo tenemos el blanco que absorbe menos del 20% de la energía incidente y el negro que absorbe cerca del 90%. Estas muestras bajo la misma radiación alcanzarán diferentes temperaturas de exposición, lo cual puede afectar la velocidad de degradación; aunado a esto tenemos que los polímeros tienen baja conductividad térmica, lo cual ocasiona que la temperatura en la superficie sea considerablemente más alta que en el corazón del material. Esto puede provocar una fatiga (tensión) física y un efecto en las reacciones químicas.

Debido al efecto de la temperatura en la degradación del color, la temperatura en análisis acelerados debe ser lo más semejante posible a las condiciones naturales de exposición con el fin de obtener datos reales y confiables [20].

- d) Humedad.- La humedad en combinación con la radiación tiene una contribución clave en la degradación del color, ya sea en forma condensada o como rocío. Contribuye físicamente en la degradación del color, debido a las fuerzas que intervienen durante su absorción y desorción; además puede participar en las reacciones fotoquímicas.

La absorción de agua por los materiales sintéticos, como las fibras sintéticas, es un proceso de difusión controlado. Las fluctuaciones en humedad ocasionan que los materiales se expandan, cuando aumenta la humedad, o se contraigan cuando disminuye.

La humedad participa en la degradación química actuando como solvente o transportador, por ejemplo podemos mencionar la lixiviación de algún acabado o la transportación de oxígeno disuelto [21].

3.4.2 CONTENIDO DE LA NORMA AATCC-16 SOLIDEZ DEL COLOR A LA LUZ.

- a) Objetivo y alcance. En este método de prueba se proporcionan los principios y procedimientos generales que se usan en la actualidad para determinar la estabilidad del color de los materiales textiles a la luz. Las opciones de prueba descritas son

aplicables a materiales textiles de todo tipo y a los colorantes, acabados y tratamientos que se aplican a estos materiales.

Las opciones de prueba que se incluyen son:

A- Lámpara de arco con electrodos de carbón, Luz continua

B- Luz solar (Descontinuada)

C- Luz natural

D- Lámpara de arco con electrodos de carbón, luz y oscuridad intermitentes

E- Lámpara de arco de xenón enfriada por agua, luz continua

F- Lámpara de arco de xenón enfriada por agua, luz y oscuridad intermitentes

G- Estabilidad del color sobre L-7 (Descontinuada)

H- Lámpara de arco de xenón enfriada por aire, luz continua

I- Lámpara de arco de xenón enfriada por aire, luz continua

J- Lámpara de arco de xenón enfriada por aire, Luz y oscuridad intermitentes.

- b) El uso de estas opciones de prueba no implica, ya sea en forma expresa u otra, una prueba acelerada para una aplicación específica. El grado de correlación entre cualquier prueba de estabilidad del color a la luz y la exposición real en las condiciones de uso debe ser determinado matemáticamente y acordado por las partes contractuales [22].
- c) Principio. Las muestras del material textil que se van a probar y el o los patrones de comparación que se acordaron se exponen simultáneamente a una fuente de luz bajo condiciones específicas. Los colorantes y pigmentos absorben la energía radiante; cuando esta energía es lo suficientemente potente para romper los enlaces químicos del colorante, pigmento e incluso del material textil, causa una degradación del color y la decoloración es uno de sus efectos visibles. En general a más corta la longitud de onda en la fuente de radiación, mayor energía tiene y como consecuencia causa una mayor degradación [23].
- d) La estabilidad del color de la muestra a la luz se evalúa comparando el cambio de color de la parte expuesta de la muestra de prueba con el material original no expuesto, usando la escala de grises para cambio de color de AATCC o mediante la

medición instrumental del color. La clasificación de la estabilidad del color a la luz se realiza mediante su evaluación con respecto a una serie de Patrones de AATCC de estabilidad del color a la luz, conocidas como lanas azules testigo, expuesta simultáneamente con las muestras a probar.

- e) Debido a que el uso de lanas azules estándares como testigos y para calibrar la cantidad de luz de exposición a la que son sometidas las muestras es de vital importancia, sus características son descritas mas adelante.
- f) El uso de unidades AFU (“AATCC *Fading Unit*”), que son definidas como: la cantidad específica de exposición realizada a condiciones específicas donde un AFU es la veinteava (1/20) parte de la cantidad de luz necesaria para producir un cambio de color en la lana azul estándar L4 igual a 4 en la escala de grises o una diferencia total de color $\Delta E^* = 1.7 \pm 0.3$ en las unidades CIEL*a*b*.
- g) La designación L es la secuencia numérica dada a cada lana azul estándar, de acuerdo al número de unidades AFU requeridas para producir un cambio de color igual a 4 en la escala de grises para el cambio de color. Ver tabla 3.3.

Lana Azul Estándar	Unidades AFU
L2	5
L3	10
L4	20
L5	40
L6	80
L7	160
L8	320
L9	640

Tabla 3.3. Cantidad de unidades AFU requeridas para producir un cambio de color igual a 4 en la escala de grises o una diferencia total de color $\Delta E^* = 1.7 \pm 0.3$ en las unidades CIEL*a*b*.

h) Las condiciones de trabajo de esta norma varía de acuerdo a las diferentes opciones enumeradas con anterioridad. No se mencionarán las condiciones de todas las opciones que contempla la norma, ya que el presente trabajo tiene por objetivo encontrar una correlación con el método E de esta norma, cuyas condiciones de operación son las siguientes [24]:

Componente	Especificación
Fuente de luz	Xenón
Enfriamiento de la lámpara	Agua
Temperatura del panel negro	63 +- 3 °C
Temperatura de bulbo seco	43 +- 2 °C
Humedad Relativa	30+- 5%
Filtro interior	Borosilicato
Filtro exterior	Soda lime
Irradiancia (a 420 nm)	1.10 W/m ² /nm
Ciclo de radiación	Continuo

Tabla 3.4. Condiciones de la opción E de la norma AATCC 16

i) El equipo usado en la opción E de la norma es el “weather-o-meter”, que se muestra en la Fig. 3.5.



Fig. 3.5 Weather-o-meter modelo Ci3000 de Atlas Electric

j) La radiación emitida por la lámpara de arco de xenón, Fig. 3.6, es filtrada con un filtro interno de borosilicato y uno externo de soda lime, cuyos espectros de transmitancia son los presentados en las Fig. 3.7 y 3.8 respectivamente. Esta combinación de filtros simula la radiación solar recibida por un espécimen cuando se encuentra detrás de una ventana de vidrio [25].

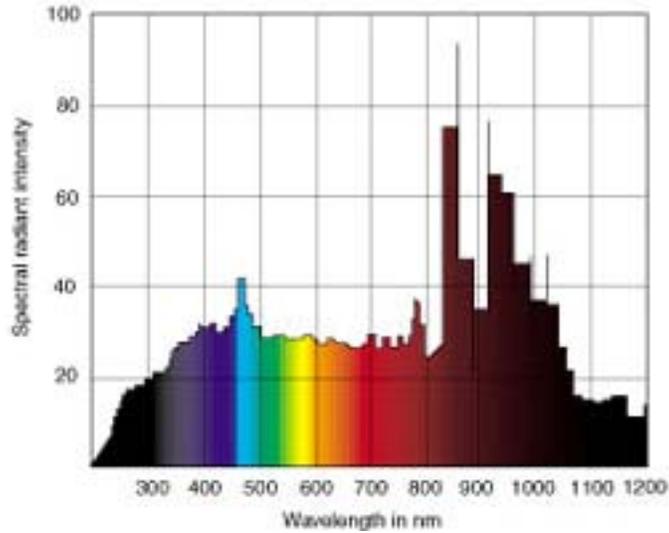


Fig. 3.6 Distribución espectral de energía de la lámpara de arco de xenón

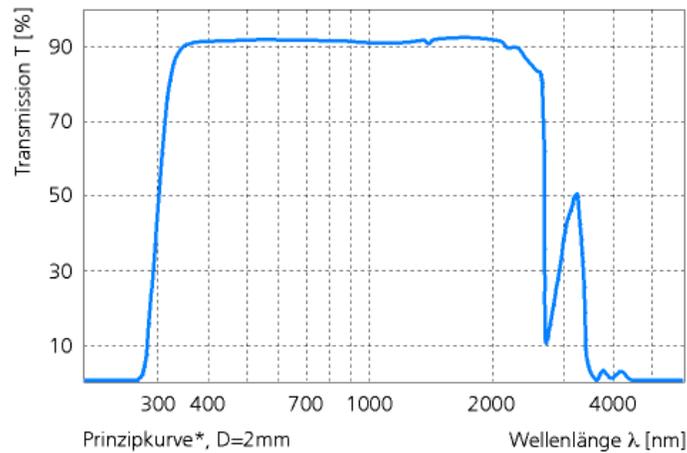


Fig. 3.7 Espectro de transmitancia del filtro de borosilicato.

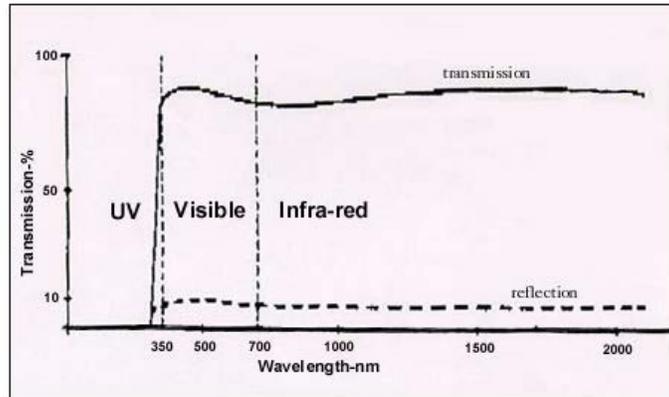


Fig. 3.8 Espectro de transmitancia del filtro de soda lime.

3.4.3 ESTÁNDARES DE LANA AZUL PARA SOLIDEZ DEL COLOR A LA LUZ

Los estándares de lana azul, Fig. 3.9, son muestras desarrolladas y distribuidas por la AATCC para determinar la cantidad de radiación a la que son expuestas las muestras durante el ensayo de solidez a la luz.

Son 8 lanas azules denominadas como L2, L3, L4, L5, L6, L7, L8, L9. Estas lanas, excepto la L2, son preparadas mezclando diferentes porciones de lana teñida con un colorante de baja solidez, el eriocromo azul B (Color Index 43830), Fig. 3.10, y un colorante de alta solidez, Azul indigosol AGG (Color Index 73801), Fig. 3.11. Cada lana etiquetada con número más alto es el doble de sólida que la lana que la precede [26].

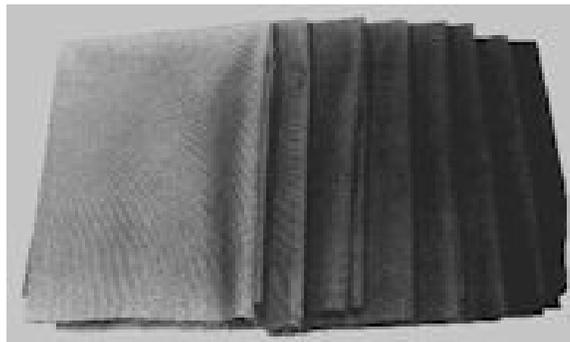


Fig. 3.9 Lanas azules estándar

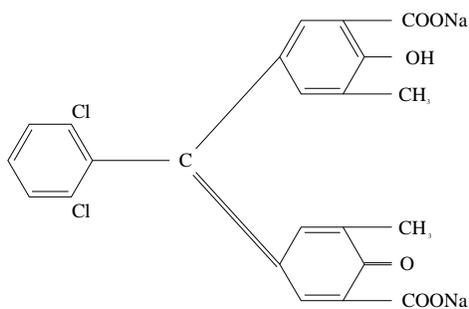


Fig. 3.10 Molécula del colorante eriocromo azulol B (Color Index 43830)

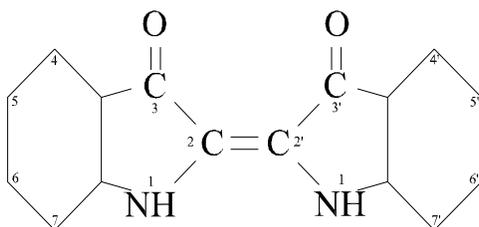


Fig. 3.11 Molécula del colorante Azul indigosol AGG (Color Index 73801).

3.4.4 EVALUACIÓN DE LA SOLIDEZ DEL COLOR A LA LUZ

La evaluación de la estabilidad del color a la luz se puede realizar y expresar en diferentes formas, previa una concordancia entre las partes involucradas, como son las siguientes:

- Se compara el material original y la parte expuesta y se cuantifica su diferencia de color, ya sea usando la escala de grises para el cambio de color o por medición colorimétrica.
- Estableciendo la diferencia de color como satisfactoria, si la muestra presenta un cambio de color igual o menor que un espécimen de referencia, cuando éste presente un cambio de color igual a 4 en la escala de grises, expuestos ambos al mismo nivel

de exposición. O insatisfactoria si la muestra presenta un cambio de color mayor que un espécimen de referencia, cuando éste presente un cambio de color igual a 4 en la escala de grises, expuestos ambos al mismo nivel de exposición.

- c) Clasificación basada en las lanas azules estándar. La muestra y la serie de lanas se someten a prueba simultáneamente y se compara el cambio de color de la muestra con el de las lanas. Se deja correr el ensayo hasta que el cambio de color en la muestra es igual a 4 en la escala de grises y se determina el número de unidades AFU requeridas para producir el cambio de acuerdo a los valores de la tabla 3.5.

Menos que el estándar	Igual pero no mas grande que el estándar	Más que el estándar	Clase de solidez a la luz	Número de unidades AFU
-	-	L2	L1	
-	L2	L3	L2	5
L2	-	L3	L2-L3	
-	L3	L4	L3	10
L3	-	L4	L3-L4	
-	L4	L5	L4	20
L4	-	L5	L4-L5	
-	L5	L6	L5	40
L5	-	L6	L5-L6	
-	L6	L7	L6	80
L6	-	L7	L6-L7	
-	L7	L8	L7	160
L7	-	L8	L7-L8	
-	L8	L9	L8	320
L8	-	L9	L8-L9	
-	L9	-	L9	640

Tabla 3.5. Unidades AFU requeridas para obtener una clase de solidez específica.

3.5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] S. Merkel Robert, Textile Product Serviceability, Capítulo 1, Macmillan Publishing Company, USA, 1991

[2] V. Metha Pradip, An Introduction to Quality Control for the Apparel Industry, Capítulo 3, ASQC, USA, 1992.

- [3] AATCC Test Method 16-1998 Colorfastness to light. American Association of Textile , Chemist and Colorist. Technical Manual-1998.
- [4] Cegarra José et all, Fundamentos Científicos y Aplicados de la Tintura de Materiales Textiles, capítulo 8, Universidad Politécnica de Barcelona, España, 1981.
- [5] S. Merkel Robert, Textile Product Serviceability, Capítulo 10, Macmillan Publishing Company, USA,1991
- [6] Shore John, Colorants and Auxiliaries Organic Chemistry and Applications Properties, Capítulo 3, Society of dyers and colourists, England,1990
- [7] Cegarra José et all, Fundamentos Científicos y Aplicados de la Tintura de Materiales textiles, capítulo 8, Universidad Politécnica de Barcelona, España, 1981.
- [8] AATCC Evaluation Procedure 1: Gray Scale for Color Change. American Association of Textile , Chemist and Colorist. Technical Manual-1998
- [9] V. Metha Pradip, An Introduction to Quality Control for the Apparel Industry, Capítulo 3, ASQC, USA, 1992.
- [10] AATCC Evaluation Procedure 2: Gray Scale for Staining. American Association of Textile , Chemist and Colorist. Technical Manual-1998
- [11] AATCC Evaluation Procedure 1: Gray Scale for Color Change. American Association of Textile , Chemist and Colorist. Technical Manual-1998
- [12] AATCC Test Method 16-1998 Colorfastness to Light. American Association of Textile , Chemist and Colorist. Technical Manual-1998
- [13] <http://www.umanitoba.ca/faculties/human-ecology/facultie/josegonzalez>
- [14] Bresee Randall R, General Effects of Ageing on Textiles, Volumen 25, Número 1, Artículo 4, pp 39-48, JAIC1996.
- [15] S. Merkel Robert, Textile Product Serviceability, Capítulo 11, Macmillan Publishing Company, USA,1991
- [16] Weathering Test Methods. Pag.23. <http://www.atlaswsg.com/testmeth.html>
- [17] S. Merkel Robert, Textile Product Serviceability, Capítulo 2, Macmillan Publishing Company, USA,1991
- [18] Caring for Textiles. <http://aic.stanford.edu>

- [19] Bresee Randall R, General Effects of Ageing on Textiles, Volumen 25, Número 1, Artículo 4, pp 39-48, JAIC1996.
- [20] Weathering Test Methods. Pag.23. <http://www.atlaswsg.com/testmeth.html>
- [21] Weathering Test Methods. Pag. 24. <http://www.atlaswsg.com/testmeth.html>
- [22] http://www.aatcc.org/Technical/Test_Methods/scopes/spanish/tm16_sp.htm
- [23] Colorfastness Test for end –Use Exposure Conditions. <http://www.umanitoba.ca/faculties/human-ecology/facultie/josegonzalez>
- [24] AATCC Test Method 16-1998 Colorfastness to Light. American Association of Textile , Chemist and Colorist. Technical Manual-1998
- [25] Manual Técnico del Weather Ometer Ci3000, P/N 14-8224-00 Rev. 1.1, Atlas Electric, 1998.
- [26] AATCC Test Method 16-1998 Colorfastness to Light. American Association of Textile , Chemist and Colorist. Technical Manual-1998.

CAPÍTULO IV

DESARROLLO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 INTRODUCCIÓN

Como se mencionó en la introducción de la presente tesis, el objetivo de este trabajo es obtener una correlación entre el método existente de estabilidad del color a la luz y la degradación de color con radiación láser en telas especiales denominadas “outdoors”.

Este tipo de telas, como su nombre lo indica, se usan en exteriores como lonas, toldos, carpas, etc.; una de sus principales características es la alta estabilidad del color a la luz solar y a la intemperie, ya que se garantiza un mínimo cambio de color por efectos de la radiación solar. Debido a la alta solidez a la luz que estas telas deben poseer, el análisis necesario para comprobar esta característica es el indicado en la norma AATCC 16, con un tiempo de irradiación de 2000 horas. Estas 2000 horas representan casi tres meses de espera para conocer si la tela cumple con los estándares de calidad.

La equivalencia entre las horas sometidas a irradiación en la cámara de envejecimiento acelerado y el tiempo real no está bien establecida, ya que depende de la región del mundo en que se use la tela, las condiciones climáticas, humedad, presión, temperatura, y la época del año. La aproximación más comúnmente aceptada es que 20 horas de exposición en la cámara de envejecimiento o “weather-o-meter” equivalen a 1 mes de exposición en tiempo real en el desierto de Arizona, en la temporada de verano.

Las telas “outdoors” están garantizadas para tener un cambio de color de 3-4 en la escala de grises después de las 2000 horas de exposición en el “weather-o-meter”; lo que equivaldría, de acuerdo a la equivalencia anterior, a un poco más de ocho años.

Estas 2000 horas son cerca de tres meses en espera de resultados, lo que representa bastante tiempo para conocer la calidad del color del producto; es por esto que se propone un método alternativo, que sea más rápido, pero igual de confiable que el método bajo norma.

El parámetro principal para la obtención de esta correlación es el cambio total de color, ΔE^*_{CIELab} , tanto de las muestras expuestas en la cámara de envejecimiento acelerado como de las muestras irradiadas con láser.

4.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL

La parte experimental correspondiente a la irradiación de las muestras con láser se desarrolló en el laboratorio de aplicaciones de láseres del Centro de Investigaciones en Óptica A.C. unidad de Aguascalientes. Se utilizaron cuatro láseres diferentes, el de CO₂ que fue descartado por que evaporaba la fibra, el de Nd:YAG con “Q-Switching” en continuo, pero se descartó porque fundía la fibra, el de Ho:YAG y el de Nd:YAG, pulsado, con un solo arreglo experimental.

La exposición de las muestras en la cámara de envejecimiento acelerado, “weather-ometer” se realizó en el laboratorio de color del Centro de Tecnología Textil S.A. de C.V. del grupo Cydsa.

La medición de color de las muestras analizadas, medido antes y después de ser irradiadas, fue realizada en el laboratorio de colorimetría del Centro de Investigaciones en Óptica A. C. unidad Aguascalientes.

4.2.1 ARREGLO EXPERIMENTAL

El arreglo experimental usado en las pruebas de degradación del color de las muestras textiles por irradiación con láser es el que se muestra en la Fig. 4.1; el cual consiste en lo siguiente:

- a) El láser. Los láseres usados fueron el de Ho:YAG y el de Nd:YAG, con ambos láseres se usó el mismo arreglo experimental.
- b) Espejos. Los espejos solo fueron usados para redireccionar el haz del láser.

- c) Sistema de movimiento. Las monturas fueron usadas para desplazar la muestra y obtener un área irradiada con las dimensiones necesarias para realizar la medición de color, ver Fig.4.2.

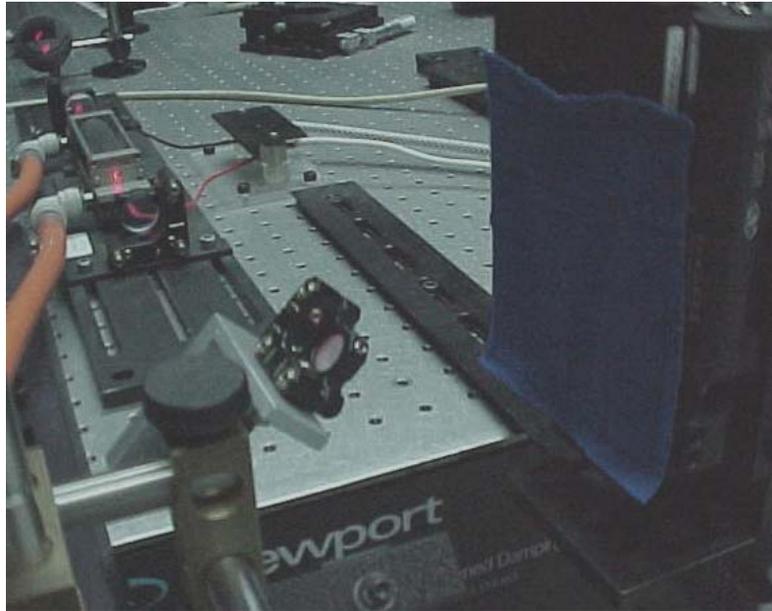


Fig. 4.1 Arreglo experimental, fotografía

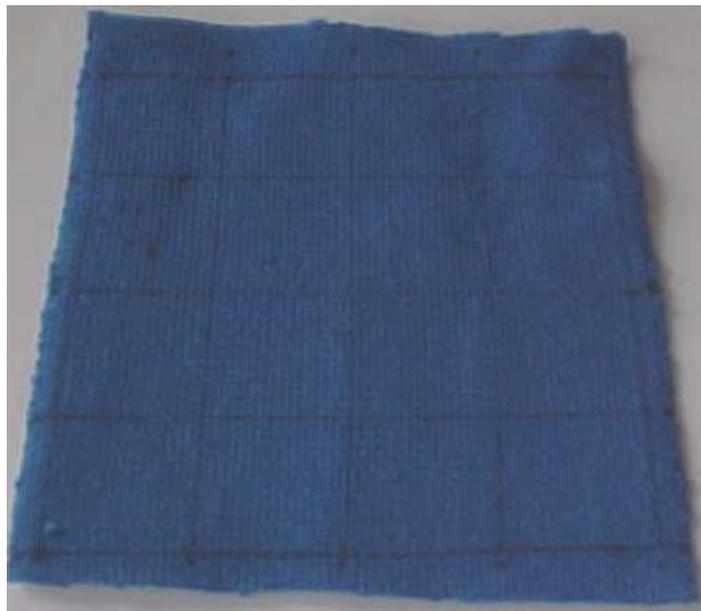


Fig. 4.2 Muestra irradiada, fotografía

4.2.2 CONDICIONES DE IRRADIACIÓN CON LÁSER DE Nd:YAG.

El láser de Nd:YAG utilizado es un láser pulsado armado en el Centro de Investigaciones en Óptica. Las condiciones utilizadas con el láser de Nd:YAG fueron las siguientes:

Tipo de Láser	Nd:YAG
Longitud de onda	1.064 μm
Diámetro del haz	5 mm (FWHM)
Duración del pulso	250 μs
Densidad	53.47 mJ/mm^2
Energía	1050 mJ

Tabla 4.1 Condiciones de operación del láser de Nd:YAG

Los supuestos en la fase de experimentación con el láser de Nd:YAG fueron los siguientes:

- Se mantuvieron constantes los parámetros de operación del láser mencionados en la tabla 4.1
- Las variaciones naturales del láser de Nd-YAG no se consideran significativas para el cambio de color experimentado por la tela.
- Todas las irradiaciones fueron realizadas por la sustentante del presente trabajo, por lo que la posible variación por la forma de ejecutar las pruebas atribuidas al operador se consideran constantes durante toda la fase de experimentación.
- Muestras de tela de 100 cm^2 , subdivididas en recuadros de $2.5 \times 2.5 \text{ cm}$. fueron sometidas a irradiación. Cada recuadro fue irradiado con diferente número de pulsos, de 1 hasta 8 pulsos. En cada recuadro se obtuvo un área irradiada de 4cm^2 .
- La variación en composición química, color, textura, tipo de tejido, etc. entre las muestras seleccionadas para el experimento se consideran despreciables, ya que provienen de una misma tela y de un mismo lote de producción de la fibra.

f) Las condiciones ambientales del laboratorio de experimentación se consideran constantes durante toda la fase de experimentación.

4.2.3 CONDICIONES DE IRRADIACIÓN CON LÁSER DE Ho:YAG.

El láser de holmio usado es un láser pulsado, armado en el Centro de Investigaciones en Óptica. Las condiciones de irradiación utilizadas con el láser de holmio fueron las siguientes:

Tipo de Láser	Ho:YAG
Longitud de onda	2.127 μm
Diámetro del haz	5 mm
Duración del pulso	250 μs
Densidad	204.22 mJ/mm^2
Energía	4010 mJ

Tabla 4.2 Condiciones de operación del láser de Ho:YAG.

Los supuestos en la fase de experimentación con el láser de Ho:YAG fueron los mismos que para el láser de Nd:YAG.

4.2.4 CONDICIONES DE PRUEBA EN LA CÁMARA DE ENVEJECIMIENTO ACELERADO, “WEATHER-O-METER”.

El equipo utilizado en las pruebas de envejecimiento acelerado fue un “weather-o-meter” marca Atlas Electric, modelo Ci3000. Las condiciones de prueba fueron las indicadas en la norma AATCC 16 de solidez a la luz, método E y son las siguientes:

Componente	Especificación
Fuente de radiación	Lámpara de Xenón
Enfriamiento de la lámpara	Agua
Temperatura del panel negro	63 +- 3 °C
Temperatura de bulbo seco	43 +- 2 °C
Humedad Relativa	30+- 5%
Filtro interior	Borosilicato
Filtro exterior	Soda lime
Irradiancia (a 420 nm)	1.10 W/m ² /nm
Ciclo de radiación	Continuo
Duración	2000 hr

Tabla 4.3 Condiciones de prueba del método E de la norma AATCC 16, solidez del color a la luz.

Los supuestos en la fase de degradación del color por el método de envejecimiento acelerado son los siguientes:

- a) Se mantuvieron constantes las condiciones de prueba de la cámara de envejecimiento mencionados en la tabla 4.3.
- b) Las variaciones naturales de la radiancia de la lámpara no se consideran significativas para el cambio de color experimentado por la tela.
- c) Durante el tiempo que duró la prueba, la operación del equipo fue realizada únicamente por la persona responsable del mismo, por lo que la posible variación por la forma de operación del equipo atribuidas al operador se consideran constantes durante todo el lapso de tiempo en que se realizó la prueba.
- d) Una muestra de tela de 10 x 5 cm. fue sometida a degradación; su cambio en %R, y por lo tanto su cambio de color, fue evaluado cada determinado número de horas, de acuerdo al cambio de color presentado en las muestras.
- e) La variación en composición química, color, textura, tipo de tejido, etc. entre las muestras seleccionadas para el experimento se consideran despreciables, ya que provienen de una misma tela y de un mismo lote de producción de la fibra.

- f) Las condiciones ambientales del laboratorio de experimentación se consideran constantes durante toda la fase de experimentación.

4.2.5 EVALUACIÓN DEL CAMBIO DE COLOR EN LAS MUESTRAS IRRADIADAS.

El color de las muestras fue medido antes y después de ser irradiadas en un espectrofotómetro marca Macbeth, modelo CE7000, el cual está calibrado y tiene trazabilidad con el patrón primario del país. Las condiciones de medición de color fueron las siguientes:

Equipo	Espectrofotómetro
Geometría de medición	D/8°
Componente especular	Incluido
Apertura de medición	10 mm x 7.5 mm (oval)
Iluminante	D65
Ecuación	CIEL *a*b*
Puntos de medición	5
Promedio de mediciones	4

Tabla 4.4 Condiciones de medición del color

Los supuestos en la fase de medición de color fueron los siguientes:

- El espectrofotómetro se encuentra calibrado y tiene trazabilidad con el patrón primario del país, por lo que la posible variación de las lecturas atribuibles al equipo son despreciables
- Todas las mediciones fueron realizadas por la sustentante del presente trabajo, por lo que la posible variación de las mediciones atribuidas al operador se consideran constantes durante toda la fase de experimentación.
- La variación en composición química, color, textura, tipo de tejido, etc. entre las muestras seleccionadas para el experimento se consideran despreciables, ya que provienen de una misma tela y de un mismo lote de producción de la fibra.
- La medición de reflectancia, %R, y por consiguiente del color, parámetros L*a*b*, se realizó en cinco puntos predeterminados de la superficie de tela irradiada.

- e) La medición se repitió 4 veces en cada punto.
- f) En total se obtienen 20 lecturas por muestra irradiada, que representan el color después de n veces irradiada el área de la tela.
- g) Después de completar todas las mediciones de L^* , a^* y b^* para cada n irradiaciones se generó una base de datos con un total de 160 lecturas, más las lecturas de referencia.
- h) El objetivo de la base de datos es comprobar estadísticamente que existe diferencia significativa entre las diferentes muestras de la tela irradiada en al menos alguno de los parámetros L^* , a^* , b^* o ΔE^* , al ir aumentando el número de pulsos láser en la tela.

4.3 ANALISIS DE LOS RESULTADOS.

Los resultados obtenidos de las muestras irradiadas, fueron la reflectancia y los parámetros de color L^* , a^* , b^* y ΔE^* .

De los datos de reflectancia se reportó sólo la curva de reflectancia de cada una de las muestras irradiadas, el gran promedio de las mediciones realizadas se anexa en el apéndice correspondiente.

A los parámetros de color se les realizó un análisis estadístico para comprobar que existe diferencia estadística significativa para cada uno de estos parámetros, L^* , a^* , b^* y ΔE^* , de cada una de las muestras irradiadas.

El análisis estadístico de los parámetros de color se realizó en el paquete computacional Statgraphics plus 4.0 para Windows y consiste en los siguientes puntos:

- a) Un sumario estadístico de los parámetros L^* , a^* , b^* y ΔE^* . Todos los análisis estadísticos de estas variables se realizaron por separado.
- b) El uso de la estadística descriptiva para mostrar la variación en la medición de los parámetros de color, antes y después de la irradiación de las muestras con los

diferentes tipos de láser; para esta descripción se hizo uso de la herramienta estadística de diagrama de caja y bigote (“box and whiskers plot”).

- c) El uso de la prueba Fisher LSD (“Fisher’s least significant difference”) para validar diferencias estadísticas significativas de los resultados obtenidos de L^* , a^* , b^* y ΔE^* entre las muestras irradiadas, así como la homogeneidad del color en los puntos de medición entre las diferentes muestras de telas, sin irradiar e irradiadas.

4.3.1 RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS MUESTRAS IRRADIADAS CON LÁSER DE Nd:YAG.

- a) Reflectancia. Enseguida se anexa la gráfica de reflectancia de las muestras irradiadas con el láser de Nd:YAG. El gran promedio de los valores de reflectancia para cada muestra irradiada se encuentran en el apéndice II.

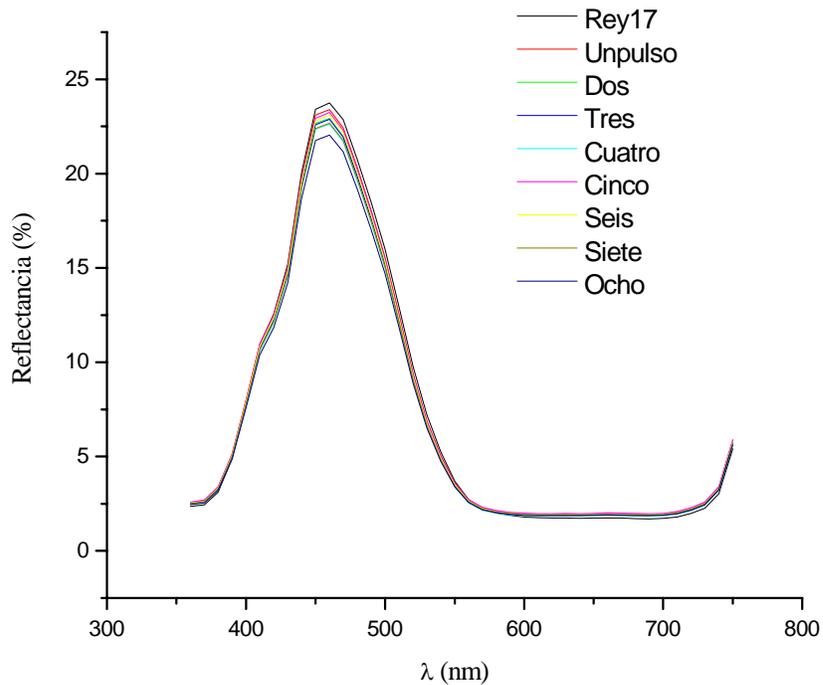


Fig. 4.3 Gráfica de λ contra reflectancia de las muestras irradiadas con láser de Nd:YAG.

El cambio obtenido en reflectancia es tan pequeño, (el mas significativo se da alrededor de 460 nm), que no es suficiente para generar una diferencia total de color significativa, como se observará en los análisis estadísticos posteriores.

b) análisis estadístico del *parámetro de Color L**. Comenzaremos con el sumario estadístico, continuaremos con el diagrama de caja y bigote (“box and whiskers plot”) y finalizaremos con la prueba de rangos múltiples o Fisher LSD (Fisher's least significant difference”).

Los valores puntuales de cada uno de los parámetros de color para cada una de las muestras se encuentran listados en el apéndice II.

i) Sumario estadístico. El sumario estadístico de cada una de las variables por separado nos muestra el número de mediciones por muestra, el promedio, la varianza, la desviación estándar, el valor máximo y mínimo de cada uno de estos valores, además del rango dentro del cual se encuentran estos valores.

Muestra	Mediciones	Media	Varianza	Desv Std
1 pulso	20	30.7952	0.00737101	0.0858546
2 pulsos	20	30.3972	0.00426796	0.0653296
3 pulsos	20	30.3245	0.0149203	0.122149
4 pulsos	20	30.1168	0.0112189	0.105919
5 pulsos	20	30.7007	0.00840169	0.0916608
6 pulsos	20	30.4908	0.00597554	0.0773016
7 pulsos	20	30.2332	0.00449778	0.0670655
8 pulsos	20	29.8889	0.0131422	0.114639
Sin irradiar	5	31.0164	0.0073893	0.085961
Total	165	30.3881	0.0965098	0.31066

Muestra	Mínimo	Máximo	Rango
1 pulso	30.616	30.933	0.317
2 pulsos	30.292	30.483	0.191
3 pulsos	30.067	30.492	0.425
4 pulsos	29.947	30.319	0.372
5 pulsos	30.529	30.878	0.349
6 pulsos	30.239	30.573	0.334
7 pulsos	30.133	30.378	0.245
8 pulsos	29.687	30.189	0.502
Sin irradiar	30.937	31.12	0.183
Total	29.687	31.12	1.433

Tabla 4.5 Sumario estadístico para el parámetro de color L*.

ii) Diagrama de Caja y Bigote. Este diagrama de comparación múltiple nos permite comparar la variabilidad de los datos obtenidos de las muestras irradiadas con diferentes pulsos contra la muestra de referencia, ejemplifica donde se concentran la mayoría de los valores obtenidos (caja). Además nos permite comparar de una manera gráfica las medias de cada muestra irradiada.

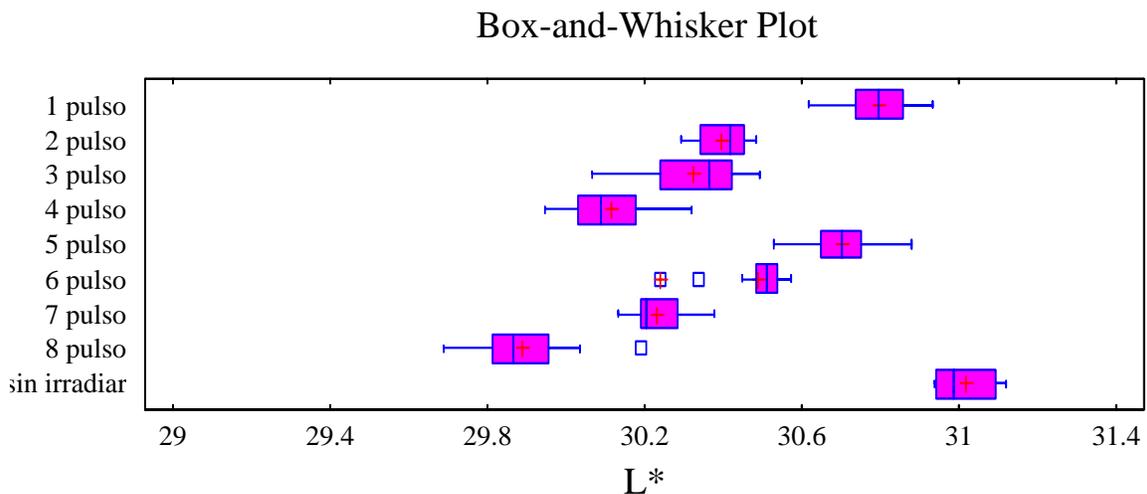


Fig. 4.4 Diagrama de Caja y Bigote para el parámetro de color L*

iii) Prueba Fisher LSD. Esta prueba nos permite validar las diferencias estadísticas entre las medias obtenidas.

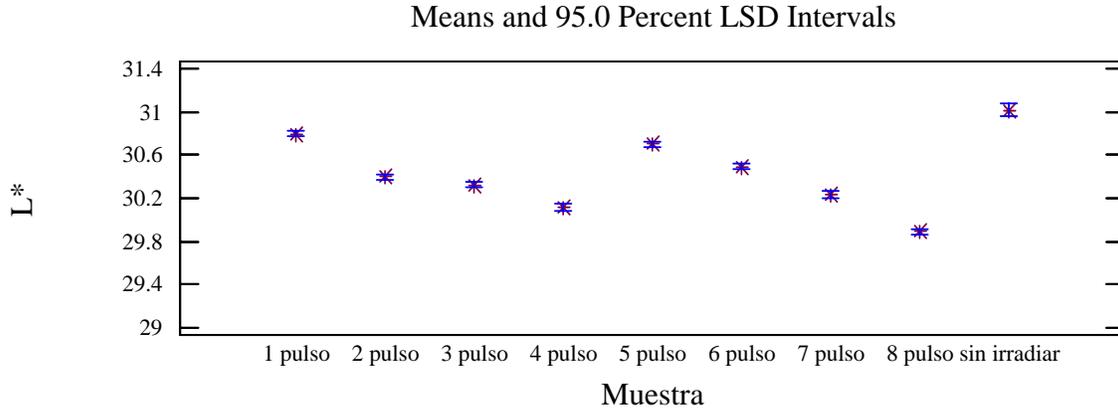


Fig. 4.5 Prueba de rangos múltiples para L^* :

Method: 95.0 percent LSD			
Muestra	Mediciones	Media	Grupos Homogéneos
8 pulso	20	29.8889	X
4 pulso	20	30.1168	X
7 pulso	20	30.2332	X
3 pulso	20	30.3245	X
2 pulso	20	30.3972	X
6 pulso	20	30.4908	X
5 pulso	20	30.7007	X
1 pulso	20	30.7952	X
Sin irradiar	5	31.0164	X

Contrastes	Diferencia	+/- Límites
1 pulso - 2 pulso	*0.398	0.0582298
1 pulso - 3 pulso	*0.4707	0.0582298
1 pulso - 4 pulso	*0.6784	0.0582298
1 pulso - 5 pulso	*0.0945	0.0582298
1 pulso - 6 pulso	*0.3044	0.0582298
1 pulso - 7 pulso	*0.56195	0.0582298
1 pulso - 8 pulso	*0.9063	0.0582298
1 pulso - sin irradiar	*-0.2212	0.0920695

2 pulso - 3 pulso	*0.0727	0.0582298
2 pulso - 4 pulso	*0.2804	0.0582298
2 pulso - 5 pulso	*-0.3035	0.0582298
2 pulso - 6 pulso	*-0.0936	0.0582298
2 pulso - 7 pulso	*0.16395	0.0582298
2 pulso - 8 pulso	*0.5083	0.0582298
2 pulso - sin irradiar	*-0.6192	0.0920695
3 pulso - 4 pulso	*0.2077	0.0582298
3 pulso - 5 pulso	*-0.3762	0.0582298
3 pulso - 6 pulso	*-0.1663	0.0582298
3 pulso - 7 pulso	*0.09125	0.0582298
3 pulso - 8 pulso	*0.4356	0.0582298
3 pulso - sin irradiar	*-0.6919	0.0920695
4 pulso - 5 pulso	*-0.5839	0.0582298
4 pulso - 6 pulso	*-0.374	0.0582298
4 pulso - 7 pulso	*-0.11645	0.0582298
4 pulso - 8 pulso	*0.2279	0.0582298
4 pulso - sin irradiar	*-0.8996	0.0920695
5 pulso - 6 pulso	*0.2099	0.0582298
5 pulso - 7 pulso	*0.46745	0.0582298
5 pulso - 8 pulso	*0.8118	0.0582298
5 pulso - sin irradiar	*-0.3157	0.0920695
6 pulso - 7 pulso	*0.25755	0.0582298
6 pulso - 8 pulso	*0.6019	0.0582298
6 pulso - sin irradiar	*-0.5256	0.0920695
7 pulso - 8 pulso	*0.34435	0.0582298
7 pulso - sin irradiar	*-0.78315	0.0920695
8 pulso - sin irradiar	*-1.1275	0.0920695

NOTA: En el valor donde aparece un * denota diferencia estadística significativa.

Tabla 4.6 Prueba de Rangos múltiples para L*

La tabla anterior muestra el proceso de comparación múltiple para determinar cuales medias son significativamente diferentes entre ellas. También se muestra la diferencia estimada entre cada par de comparaciones de media donde un * denota diferencia estadística significativa.

El análisis muestra que se tiene 36 pares de comparación con asterisco, indicando que estos pares muestran una diferencia significativa con un nivel de confianza del 95%.

Además muestra que se tienen 9 grupos homogéneos usando una X en la columna para identificarlos. X's alineadas muestran que no se tiene diferencia significativa. Con este método existe un 5.0% de riesgo de concluir que un par de medias es significativamente diferente cuando la diferencia entre ellas no sea significativa.

- c) Análisis Estadístico del *Parámetro de Color a**. El orden del análisis estadístico, tanto como su utilidad, es el mismo que el que se describió para el parámetro L*, por lo que en los parámetros siguientes se omitirá mencionarlo.

i) Sumario estadístico.

Muestra	Mediciones	Media	Varianza	Desv. Std.
1 pulso	20	-7.617	0.00632042	0.0795011
2 pulso	20	-7.482	0.00590178	0.076823
3 pulso	20	-7.398	0.0108049	0.103946
4 pulso	20	-7.458	0.00496041	0.0704302
5 pulso	20	-7.522	0.01003	0.10015
6 pulso	20	-7.456	0.00350968	0.0592426
7 pulso	20	-7.393	0.00453371	0.0673329
8 pulso	20	-7.461	0.00829068	0.0910532
Sin irradiar	5	-9.062	0.0045962	0.0677953
Total	165	-7.521	0.0854444	0.292309
Muestra	Mínimo	Máximo	Rango	
1 pulso	-7.73	-7.442	0.288	
2 pulso	-7.631	-7.345	0.286	
3 pulso	-7.689	-7.279	0.41	
4 pulso	-7.659	-7.371	0.288	
5 pulso	-7.844	-7.432	0.412	
6 pulso	-7.554	-7.337	0.217	
7 pulso	-7.501	-7.234	0.267	
8 pulso	-7.722	-7.333	0.389	
Sin irradiar	-9.151	-8.985	0.166	
Total	-9.151	-7.234	1.917	

Tabla 4.7 Sumario estadístico para el parámetro de color a*.

ii) Diagrama de Caja y Bigote.

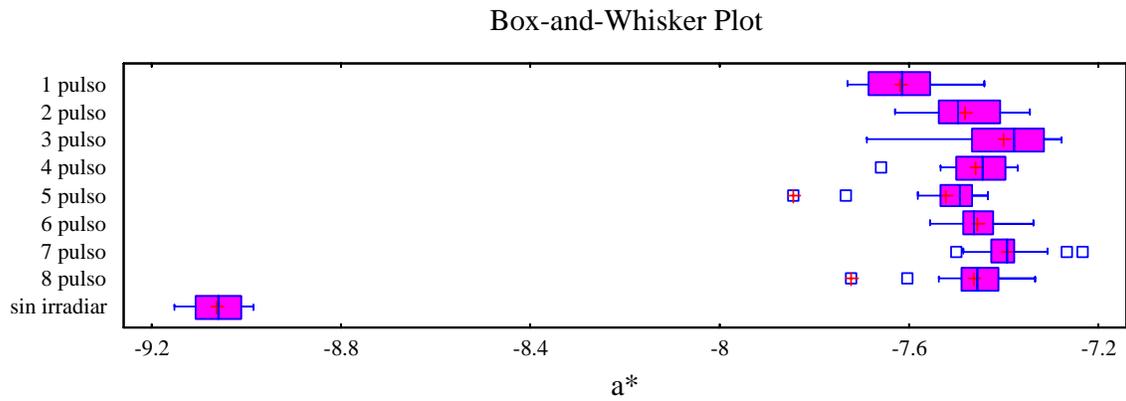


Fig. 4.6 Diagrama de Caja y Bigote para el parámetro de color a^* .

iii) Prueba Fisher LSD.

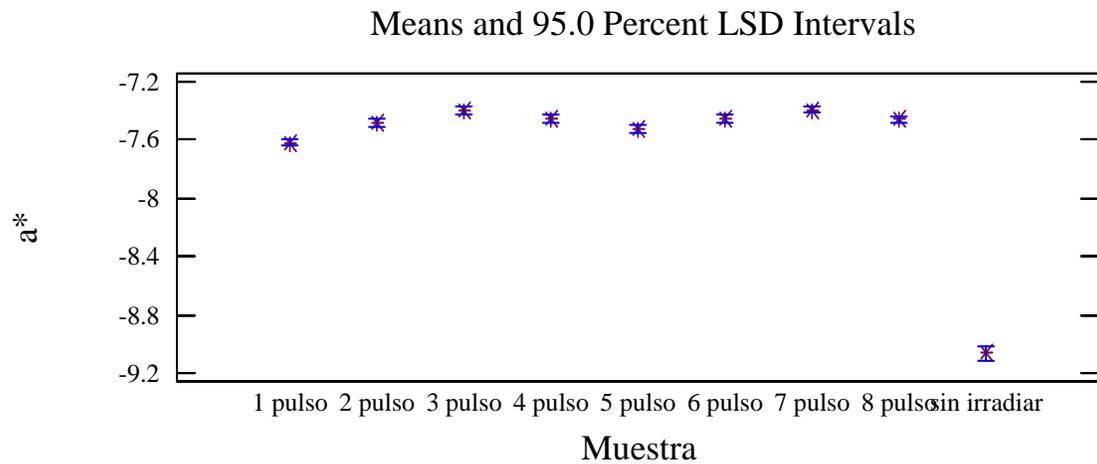


Fig. 4.7 Prueba de rangos múltiples para a^* :

Method: 95.0 percent LSD

Muestra Mediciones Media Grupos Homogéneos

Sin irradiar	5	-9.0628	X
1 pulso	20	-7.617	X
5 pulso	20	-7.52225	X
2 pulso	20	-7.48275	XX
8 pulso	20	-7.46145	X
4 pulso	20	-7.4581	X
6 pulso	20	-7.456	X
3 pulso	20	-7.3983	X
7 pulso	20	-7.39315	X

Contrastes Diferencia +/- Límites

1 pulso - 2 pulso	*-0.13425	0.0512724
1 pulso - 3 pulso	*-0.2187	0.0512724
1 pulso - 4 pulso	*-0.1589	0.0512724
1 pulso - 5 pulso	*-0.09475	0.0512724
1 pulso - 6 pulso	*-0.161	0.0512724
1 pulso - 7 pulso	*-0.22385	0.0512724
1 pulso - 8 pulso	*-0.15555	0.0512724
1 pulso - sin irradiar	*1.4458	0.0810687
2 pulso - 3 pulso	*-0.08445	0.0512724
2 pulso - 4 pulso	-0.02465	0.0512724
2 pulso - 5 pulso	0.0395	0.0512724
2 pulso - 6 pulso	-0.02675	0.0512724
2 pulso - 7 pulso	*-0.0896	0.0512724
2 pulso - 8 pulso	-0.0213	0.0512724
2 pulso - sin irradiar	*1.58005	0.0810687
3 pulso - 4 pulso	*0.0598	0.0512724
3 pulso - 5 pulso	*0.12395	0.0512724
3 pulso - 6 pulso	*0.0577	0.0512724
3 pulso - 7 pulso	-0.00515	0.0512724
3 pulso - 8 pulso	*0.06315	0.0512724
3 pulso - sin irradiar	*1.6645	0.0810687
4 pulso - 5 pulso	*0.06415	0.0512724
4 pulso - 6 pulso	-0.0021	0.0512724
4 pulso - 7 pulso	*-0.06495	0.0512724
4 pulso - 8 pulso	0.00335	0.0512724
4 pulso - sin irradiar	*1.6047	0.0810687
5 pulso - 6 pulso	*-0.06625	0.0512724
5 pulso - 7 pulso	*-0.1291	0.0512724
5 pulso - 8 pulso	*-0.0608	0.0512724

5 pulso - sin irradiar	*1.54055	0.0810687
6 pulso - 7 pulso	*-0.06285	0.0512724
6 pulso - 8 pulso	0.00545	0.0512724
6 pulso - sin irradiar	*1.6068	0.0810687
7 pulso - 8 pulso	*0.0683	0.0512724
7 pulso - sin irradiar	*1.66965	0.0810687
8 pulso - sin irradiar	*1.60135	0.0810687

NOTA: En el valor donde aparece un * denota diferencia estadística significativa.

Tabla 4.8 Prueba de rangos múltiples para a*

La tabla muestra el procedimiento de comparación múltiple para determinar cuales medias son significativamente diferentes entre ellas; además se muestra la diferencia estimada entre cada par de medias. Se tiene asterisco en 28 pares de medias, lo que indica que estos pares muestran diferencia significativa con un nivel de confianza del 95.0%.

Además muestra que se tienen 5 grupos homogéneos usando una X en la columna para identificarlos. X's alineadas muestran que no se tiene diferencia significativa.

Con este método existe un 5.0% de riesgo de concluir que un par de medias es significativamente diferente cuando la diferencia entre ellas no sea significativa.

d) análisis estadístico del *parámetro de Color b**.

i) Sumario estadístico.

Muestra	Mediciones	Media	Varianza	Desv. Std
1 pulso	20	-35.6845	0.0173157	0.131589
2 pulso	20	-35.5253	0.0254926	0.159664
3 pulso	20	-35.5372	0.0240855	0.155195
4 pulso	20	-35.4781	0.0156779	0.125211
5 pulso	20	-35.5242	0.0230484	0.151817
6 pulso	20	-35.6289	0.0140193	0.118403
7 pulso	20	-35.3742	0.0213426	0.146091
8 pulso	20	-34.9027	0.0395514	0.198875
Sin irradiar	5	-35.484	0.005647	0.0751465
Total	165	-35.4577	0.0712499	0.266927

Muestra	Mínimo	Máximo	Rango
1 pulso	-35.857	-35.312	0.545
2 pulso	-35.844	-35.296	0.548
3 pulso	-35.793	-35.295	0.498
4 pulso	-35.729	-35.179	0.55
5 pulso	-35.787	-35.218	0.569
6 pulso	-35.805	-35.287	0.518
7 pulso	-35.621	-35.135	0.486
8 pulso	-35.376	-34.633	0.743
Sin irradiar	-35.589	-35.407	0.182
Total	-35.857	-34.633	1.224

Tabla 4.9 Sumario Estadístico para el parámetro de color b^*

ii) Diagrama de Caja y Bigote.

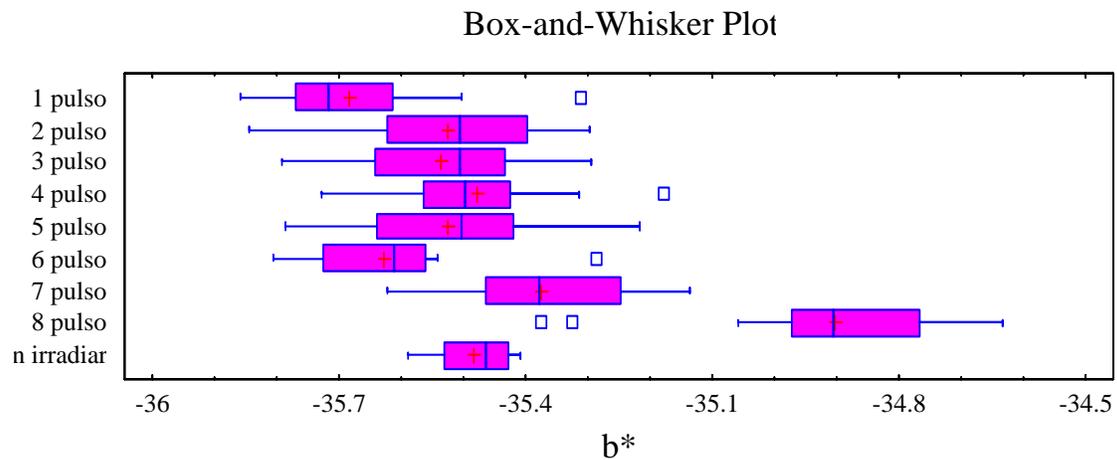


Fig. 4.8 Diagrama de Caja y Bigote para el parámetro de color b^*

iii) Prueba Fisher LSD.

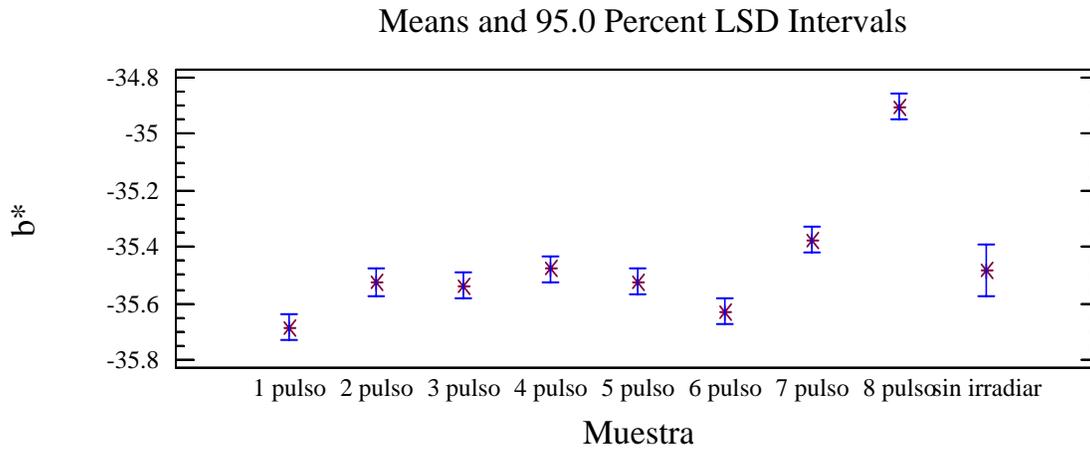


Fig. 4.9 Prueba de rangos múltiples para b^* :

Method: 95.0 percent LSD			
Muestra	Mediciones	Media	Grupos Homogéneos
1 pulso	20	-35.6845	X
6 pulso	20	-35.6289	XX
3 pulso	20	-35.5372	XX
2 pulso	20	-35.5253	X
5 pulso	20	-35.5242	X
Sin irradiar	5	-35.484	XXX
4 pulso	20	-35.4781	X
7 pulso	20	-35.3742	X
8 pulso	20	-34.9027	X

Contrastes	Diferencia	+/- Límites
1 pulso - 2 pulso	*-0.15925	0.0929287
1 pulso - 3 pulso	*-0.14735	0.0929287
1 pulso - 4 pulso	*-0.20645	0.0929287
1 pulso - 5 pulso	*-0.16035	0.0929287
1 pulso - 6 pulso	-0.05565	0.0929287
1 pulso - 7 pulso	*-0.31035	0.0929287
1 pulso - 8 pulso	*-0.7818	0.0929287
1 pulso - sin irradiar	*-0.20055	0.146933

2 pulso - 3 pulso	0.0119	0.0929287
2 pulso - 4 pulso	-0.0472	0.0929287
2 pulso - 5 pulso	-0.0011	0.0929287
2 pulso - 6 pulso	*0.1036	0.0929287
2 pulso - 7 pulso	*-0.1511	0.0929287
2 pulso - 8 pulso	*-0.62255	0.0929287
2 pulso - sin irradiar	-0.0413	0.146933
3 pulso - 4 pulso	-0.0591	0.0929287
3 pulso - 5 pulso	-0.013	0.0929287
3 pulso - 6 pulso	0.0917	0.0929287
3 pulso - 7 pulso	*-0.163	0.0929287
3 pulso - 8 pulso	*-0.63445	0.0929287
3 pulso - sin irradiar	-0.0532	0.146933
4 pulso - 5 pulso	0.0461	0.0929287
4 pulso - 6 pulso	*0.1508	0.0929287
4 pulso - 7 pulso	*-0.1039	0.0929287
4 pulso - 8 pulso	*-0.57535	0.0929287
4 pulso - sin irradiar	0.0059	0.146933
5 pulso - 6 pulso	*0.1047	0.0929287
5 pulso - 7 pulso	*-0.15	0.0929287
5 pulso - 8 pulso	*-0.62145	0.0929287
5 pulso - sin irradiar	-0.0402	0.146933
6 pulso - 7 pulso	*-0.2547	0.0929287
6 pulso - 8 pulso	*-0.72615	0.0929287
6 pulso - sin irradiar	-0.1449	0.146933
7 pulso - 8 pulso	*-0.47145	0.0929287
7 pulso - sin irradiar	0.1098	0.146933
8 pulso - sin irradiar	*0.58125	0.146933

NOTA: En el valor donde aparece un * denota diferencia estadística significativa.

Tabla 4.10 Prueba de rangos múltiples para b*

La tabla muestra el procedimiento de comparación múltiple para determinar cuales medias son significativamente diferentes entre ellas; además se muestra la diferencia estimada entre cada par de medias. Se tiene asterisco en 22 pares de medias, lo que indica que estos pares muestran diferencia significativa con un nivel de confianza del 95.0%.

Además muestra que se tienen 5 grupos homogéneos usando una X en la columna para identificarlos. X's alineadas muestran que no se tiene diferencia significativa. Con este método existe un 5.0% de riesgo de concluir que un par de medias es significativamente diferente cuando la diferencia entre ellas no sea significativa o sea 0.

e) análisis estadístico del *parámetro de Color ΔE^** .

i) Sumario estadístico.

Muestra	Mediciones	Media	Varianza	Desv. Std.
1 pulso	20	1.48429	0.0061384	0.078348
2 pulso	20	1.7063	0.00430863	0.0656402
3 pulso	20	1.81416	0.00868846	0.0932119
4 pulso	20	1.84623	0.00639199	0.0799499
5 pulso	20	1.58206	0.0116452	0.107913
6 pulso	20	1.70179	0.00558635	0.0747419
7 pulso	20	1.85393	0.00518575	0.0720121
8 pulso	20	2.05433	0.011677	0.10806
Sin irradiar	5	0.0	0.0	0.0
Total	165	1.70219	0.124786	0.35325
Muestra	Mínimo	Máximo	Rango	
1 pulso	1.35533	1.66213	0.306801	
2 pulso	1.57938	1.81382	0.23444	
3 pulso	1.51052	1.93597	0.425452	
4 pulso	1.66786	1.95642	0.288562	
5 pulso	1.24145	1.68462	0.443168	
6 pulso	1.59561	1.86396	0.268341	
7 pulso	1.70756	1.97559	0.26803	
8 pulso	1.82413	2.21103	0.386895	
Sin irradiar	0.0	0.0	0.0	
Total	0.0	2.21103	2.21103	

Tabla 4.11 Sumario estadístico para la diferencia total de color ΔE^* .

- ii) Diagrama de Caja y Bigote.
- iii)

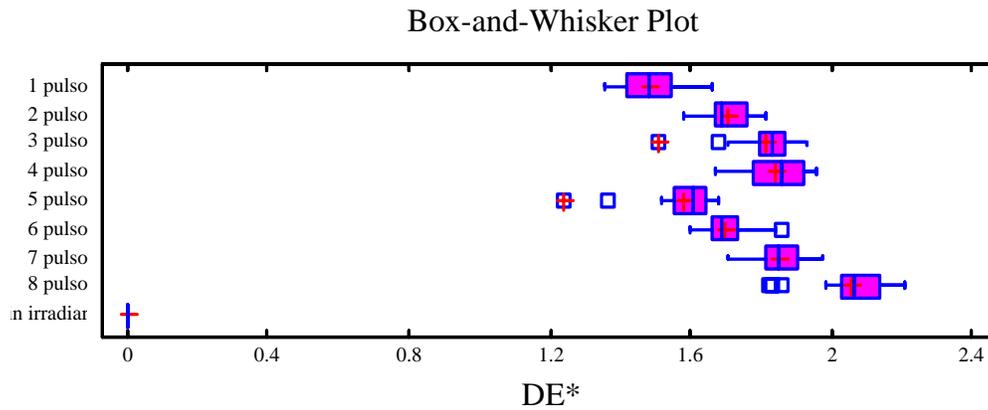


Fig. 4.10 Diagrama de caja y bigote para ΔE^* .

- iv) Prueba Fisher LSD

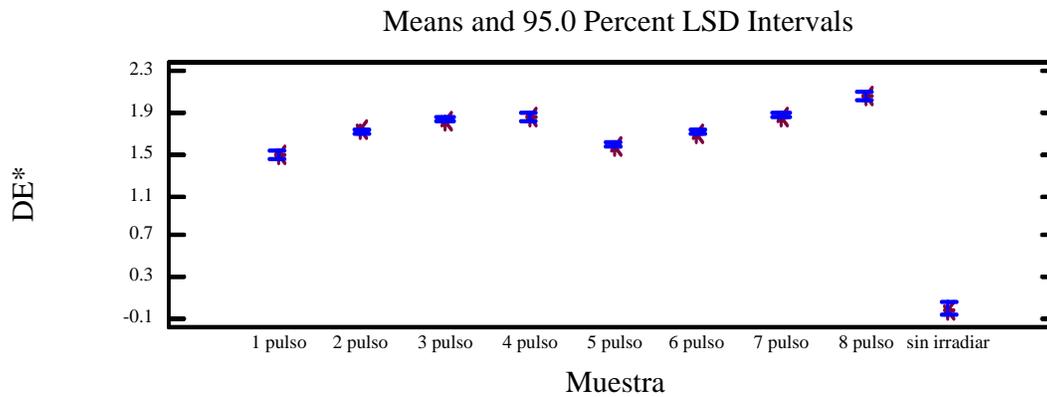


Fig. 4.11 Prueba de rangos múltiples para ΔE^* .

Method: 95.0 percent LSD

Muestra	Mediciones	Media	Grupos Homogéneos
Sin irradiar	5	0.0	X
1 pulso	20	1.48429	X
5 pulso	20	1.58206	X
6 pulso	20	1.70179	X
2 pulso	20	1.7063	X
3 pulso	20	1.81416	X
4 pulso	20	1.84623	X
7 pulso	20	1.85393	X
8 pulso	20	2.05433	X

Contrastes	Diferencia	+/- Límites
1 pulso - 2 pulso	*-0.222011	0.053229
1 pulso - 3 pulso	*-0.329873	0.053229
1 pulso - 4 pulso	*-0.361942	0.053229
1 pulso - 5 pulso	*-0.097773	0.053229
1 pulso - 6 pulso	*-0.217499	0.053229
1 pulso - 7 pulso	*-0.369637	0.053229
1 pulso - 8 pulso	*-0.570041	0.053229
1 pulso - sin irradiar	*1.48429	0.0841624
2 pulso - 3 pulso	*-0.107862	0.053229
2 pulso - 4 pulso	*-0.139931	0.053229
2 pulso - 5 pulso	*0.124238	0.053229
2 pulso - 6 pulso	0.004512	0.053229
2 pulso - 7 pulso	*-0.147626	0.053229
2 pulso - 8 pulso	*-0.34803	0.053229
2 pulso - sin irradiar	*1.7063	0.0841624
3 pulso - 4 pulso	-0.0320695	0.053229
3 pulso - 5 pulso	*0.2321	0.053229
3 pulso - 6 pulso	*0.112374	0.053229
3 pulso - 7 pulso	-0.039764	0.053229
3 pulso - 8 pulso	*-0.240168	0.053229
3 pulso - sin irradiar	*1.81416	0.0841624
4 pulso - 5 pulso	*0.264169	0.053229
4 pulso - 6 pulso	*0.144444	0.053229
4 pulso - 7 pulso	-0.0076945	0.053229
4 pulso - 8 pulso	*-0.208099	0.053229
4 pulso - sin irradiar	*1.84623	0.0841624
5 pulso - 6 pulso	*-0.119725	0.053229
5 pulso - 7 pulso	*-0.271864	0.053229
5 pulso - 8 pulso	*-0.472268	0.053229
5 pulso - sin irradiar	*1.58206	0.0841624
6 pulso - 7 pulso	*-0.152138	0.053229
6 pulso - 8 pulso	*-0.352543	0.053229
6 pulso - sin irradiar	*1.70179	0.0841624
7 pulso - 8 pulso	*-0.200404	0.053229
7 pulso - sin irradiar	*1.85393	0.0841624
8 pulso - sin irradiar	*2.05433	0.0841624

NOTA: En el valor donde aparece un * denota diferencia estadística significativa.

Tabla 4.12 Prueba de rangos múltiples para ΔE^*

La tabla muestra el procedimiento de comparación múltiple para determinar cuales medias son significativamente diferentes entre ellas; además se muestra la diferencia estimada entre cada par de medias. Se tiene asterisco en 32 pares de medias, lo que indica que estos pares muestran diferencia significativa con un nivel de confianza del 95.0%.

Además muestra que se tienen 6 grupos homogéneos usando una X en la columna para identificarlos. X's alineadas muestran que no se tiene diferencia significativa.

Con este método existe un 5.0% de riesgo de concluir que un par de medias es significativamente diferente cuando la diferencia entre ellas no sea significativa.

v) Gráfica del Promedio de ΔE^* contra número de pulsos. A continuación se presenta la gráfica de la diferencia total de color, ΔE^* , contra el número de pulsos láser depositados en la tela.

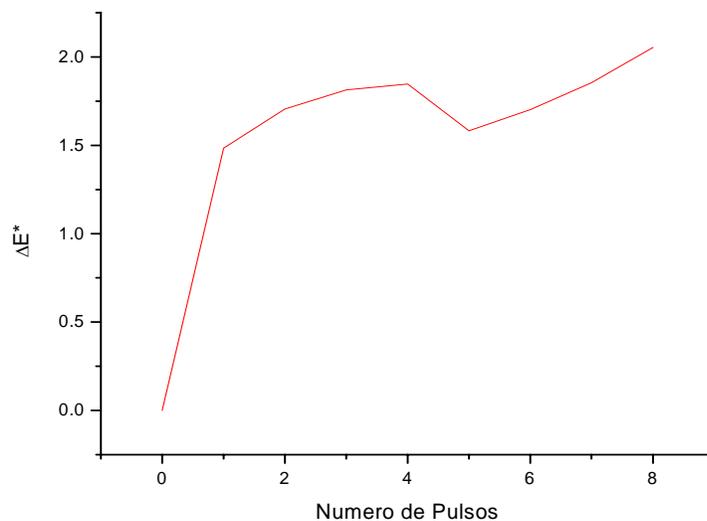


Fig. 4.12 Gráfica de número de pulsos contra el promedio de ΔE^* , obtenido con el láser de Nd:YAG.

La gráfica anterior muestra que ΔE^* se incrementa de manera no lineal conforme se incrementa el número de pulsos, obteniéndose un máximo en 4 pulsos; en 5 pulsos se tiene un decremento, pero a partir de este punto comienza a incrementarse nuevamente hasta obtener otro máximo en 8 pulsos.

4.3.2 RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS MUESTRAS IRRADIADAS CON LÁSER DE Ho:YAG.

a) Reflectancia. Enseguida se anexa la gráfica de reflectancia de las muestras irradiadas con el láser de Ho:YAG. El gran promedio de los valores de reflectancia para cada una de las muestras irradiadas se encuentran en el apéndice III.

El cambio en reflectancia es tan pequeño, el más significativo es alrededor de los 460 nm, que no es suficiente para generar una diferencia total de color significativa, como se observará en los análisis estadísticos posteriores.

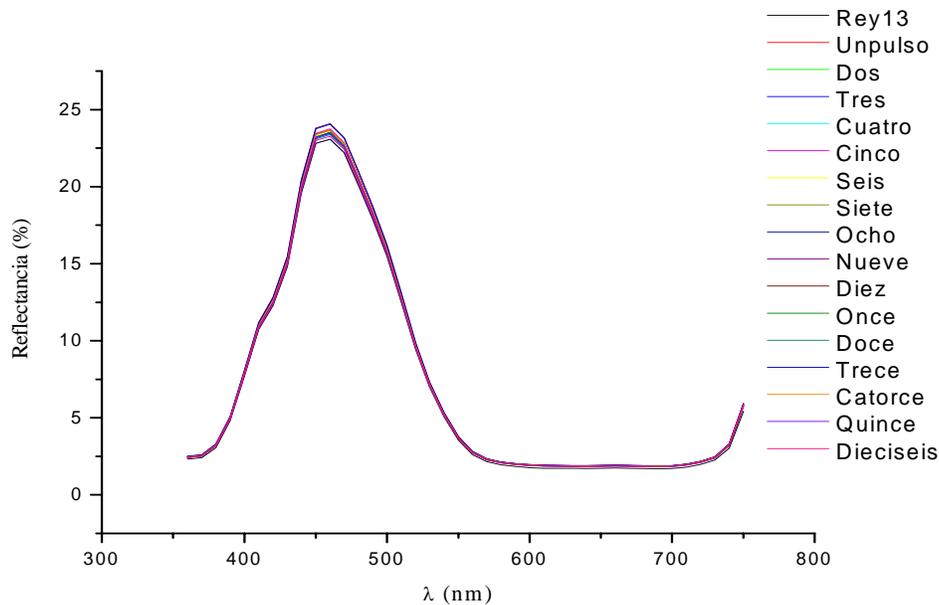


Fig. 4.13 Gráfica de λ contra reflectancia de las muestras irradiadas con láser de Ho:YAG.

b) Análisis estadístico del *parámetro de Color L**. Los valores puntuales de cada uno de los parámetros de color para cada una de las muestras se encuentran listados en el apéndice III.

i) Sumario estadístico.

Muestra	Mediciones	Media	Varianza	Desv Std
1 pulso	20	31.118	0.0256151	0.160047
10 pulsos	20	31.082	0.0208228	0.144301
11 pulsos	20	31.016	0.0291671	0.170784
12 pulsos	20	30.892	0.0087130	0.093343
13 pulsos	20	31.349	0.0114625	0.107063
14 pulsos	20	31.078	0.0349438	0.186933
15 pulsos	20	30.928	0.0453411	0.212935
16 pulsos	20	30.835	0.0408946	0.202224
2 pulsos	20	31.133	0.0217582	0.147506
3 pulsos	20	31.059	0.0697233	0.264052
4 pulsos	20	30.992	0.0083861	0.091576
5 pulsos	20	31.140	0.0216128	0.147013
6 pulsos	20	31.075	0.0103708	0.101837
7 pulsos	20	30.715	0.0322882	0.179689
8 pulsos	20	30.783	0.0392926	0.198224
9 pulsos	20	31.358	0.0133933	0.115729
Sin irradiar	5	31.141	0.0031573	0.056189
Total	325	31.036	0.0550304	0.234586

Muestra	Mínimo	Máximo	Rango
1 pulso	30.77	31.388	0.382
10 pulsos	30.884	31.341	0.457
11 pulsos	30.69	31.24	0.55
12 pulsos	30.709	31.095	0.386
13 pulsos	31.14	31.524	0.384
14 pulsos	30.657	31.321	0.664
15 pulsos	30.298	31.201	0.903
16 pulsos	30.543	31.255	0.712
2 pulsos	30.695	31.337	0.642
3 pulsos	30.585	31.429	0.844
4 pulsos	30.793	31.13	0.337
5 pulsos	30.903	31.33	0.427

6 pulsos	30.906	31.247	0.341
7 pulsos	30.461	31.087	0.626
8 pulsos	30.432	31.202	0.77
9 pulsos	31.141	31.537	0.396
Sin irradiar	31.08	31.202	0.122

Total	30.298	31.537	1.239

Tabla 4.13 Sumario estadístico para el parámetro de color L*

ii) Diagrama de Caja y Bigote.

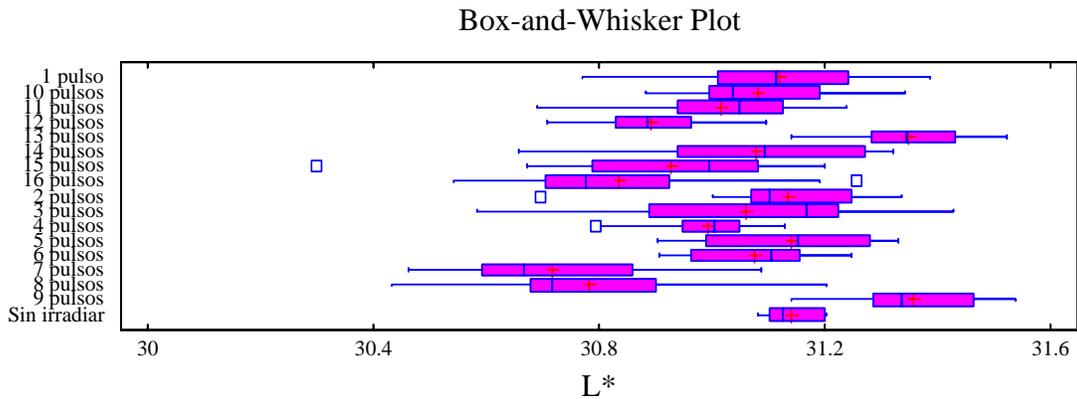


Fig. 4.14 Diagrama de caja y bigote para L*.

En la comparación anterior se muestra el comportamiento del parámetro L*, no encontrándose una tendencia lineal en su variabilidad.

iv) Prueba Fisher LSD.

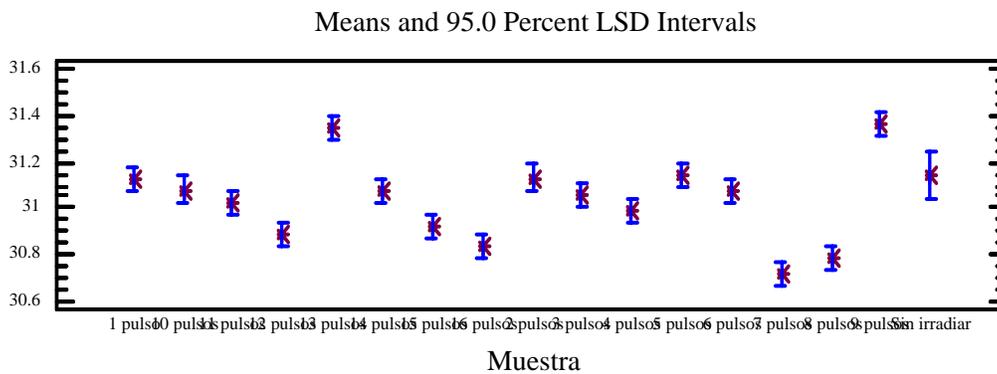


Fig. 4.15 Prueba de Rangos Múltiples para L*:

La comparación uno a uno de los valores de la media de las variables L^* , a^* y b^* , no se realizó debido que los valores listados en el sumario estadístico demuestran que no existe diferencia significativa en cada diferente número de pulsos, además en el diagrama de caja y bigote no se observa una tendencia clara de las muestras. Solo se realizó este análisis para la diferencia total de color, ΔE^* , para comprobar que su variabilidad es muy semejante a la variabilidad de los otros parámetros de color.

c) Análisis Estadístico del *Parámetro de Color a*.

i) Sumario estadístico.

Muestra	Mediciones	Media	Varianza	Desv. Std.
1 pulso	20	-8.479	0.0039160	0.0625784
10 pulsos	20	-8.454	0.0058988	0.0768039
11 pulsos	20	-8.473	0.0090030	0.0948843
12 pulsos	20	-8.493	0.0039919	0.0631822
13 pulsos	20	-8.599	0.0188333	0.137234
14 pulsos	20	-8.404	0.0073281	0.0856047
15 pulsos	20	-8.416	0.0082679	0.0909282
16 pulsos	20	-8.448	0.0068454	0.0827369
2 pulsos	20	-8.503	0.0039538	0.0628792
3 pulsos	20	-8.433	0.0036341	0.0602839
4 pulsos	20	-8.462	0.0055059	0.0742021
5 pulsos	20	-8.438	0.0030855	0.055548
6 pulsos	20	-8.397	0.0032371	0.056896
7 pulsos	20	-8.257	0.0088274	0.0939542
8 pulsos	20	-8.305	0.0080917	0.0899544
9 pulsos	20	-8.498	0.0045510	0.0674614
Sin irradiar	5	-8.273	0.0058957	0.0767835
Total	325	-8.439	0.0124968	0.111789
Muestra	Mínimo	Máximo	Rango	
1 pulso	-8.6	-8.395	0.205	
10 pulsos	-8.623	-8.328	0.295	
11 pulsos	-8.609	-8.308	0.301	
12 pulsos	-8.584	-8.334	0.25	
13 pulsos	-8.769	-8.376	0.393	

14 pulsos	-8.564	-8.278	0.286
15 pulsos	-8.538	-8.231	0.307
16 pulsos	-8.594	-8.227	0.367
2 pulsos	-8.6	-8.416	0.184
3 pulsos	-8.58	-8.345	0.235
4 pulsos	-8.596	-8.316	0.28
5 pulsos	-8.521	-8.332	0.189
6 pulsos	-8.507	-8.262	0.245
7 pulsos	-8.417	-8.102	0.315
8 pulsos	-8.442	-8.156	0.286
9 pulsos	-8.6	-8.334	0.266
Sin irradiar	-8.382	-8.192	0.19

Total	-8.769	-8.102	0.667

Tabla. 4.14 Sumario estadístico para a^*

ii) Diagrama de Caja y Bigote.

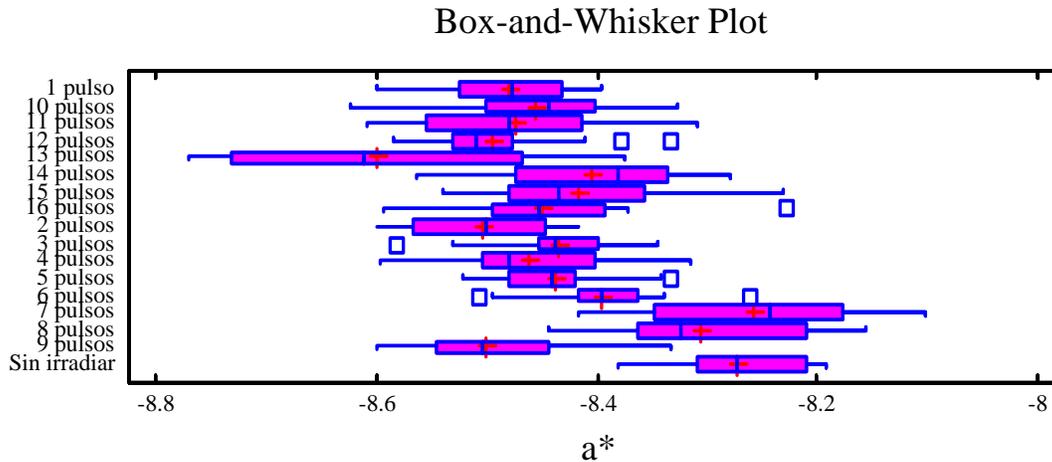


Fig. 4.16 Diagrama de Caja y Bigote para a^* .

iii) Prueba Fisher LSD.

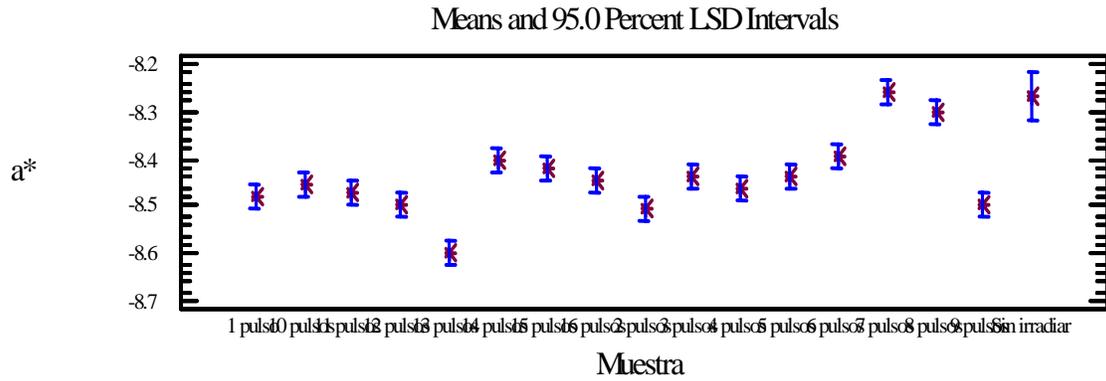


Fig. 4.17 Prueba de Rangos Múltiples para a^* :

d) análisis estadístico del *parámetro de Color b**.

i) Sumario estadístico.

Muestra	Mediciones	Media	Varianza	Desv. Std.
1 pulso	20	-35.525	0.0450666	0.212289
10 pulsos	20	-35.634	0.0161357	0.127026
11 pulsos	20	-35.497	0.0336854	0.183536
12 pulsos	20	-35.472	0.0104965	0.102452
13 pulsos	20	-35.773	0.0149476	0.12226
14 pulsos	20	-35.617	0.0137282	0.117167
15 pulsos	20	-35.538	0.0529044	0.230009
16 pulsos	20	-35.385	0.0277804	0.166674
2 pulsos	20	-35.498	0.0379686	0.194855
3 pulsos	20	-35.336	0.0440213	0.209812
4 pulsos	20	-35.284	0.032285	0.17968
5 pulsos	20	-35.622	0.0322165	0.179489
6 pulsos	20	-35.577	0.0276978	0.166427
7 pulsos	20	-35.249	0.019772	0.140613
8 pulsos	20	-35.159	0.0236176	0.15368
9 pulsos	20	-35.818	0.0190956	0.138187
Sin irradiar	5	-35.539	0.0166895	0.129188
Total	325	-35.500	0.0573976	0.239578

Muestra	Mínimo	Máximo	Rango
1 pulso	-35.801	-35.072	0.729
10 pulsos	-35.838	-35.227	0.611
11 pulsos	-35.893	-35.158	0.735
12 pulsos	-35.596	-35.163	0.433
13 pulsos	-35.981	-35.429	0.552
14 pulsos	-35.88	-35.337	0.543
15 pulsos	-35.887	-34.807	1.08
16 pulsos	-35.694	-34.987	0.707
2 pulsos	-35.746	-34.885	0.861
3 pulsos	-35.613	-34.908	0.705
4 pulsos	-35.661	-35.003	0.658
5 pulsos	-35.871	-34.952	0.919
6 pulsos	-35.819	-35.143	0.676
7 pulsos	-35.54	-34.888	0.652
8 pulsos	-35.395	-34.887	0.508
9 pulsos	-36.018	-35.344	0.674
Sin irradiar	-35.653	-35.32	0.333
Total	-36.018	-34.807	1.211

Tabla 4.15 Sumario estadístico para b^*

ii) Diagrama de Caja y Bigote.

Box-and-Whisker Plot

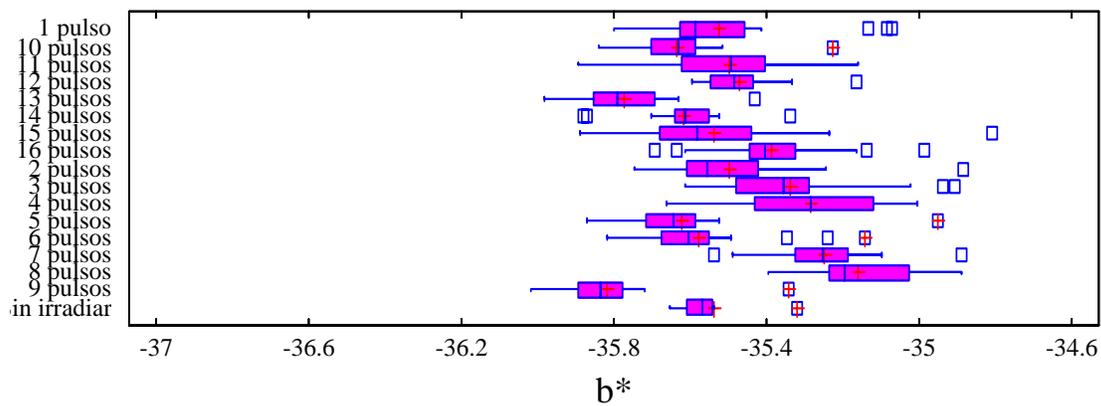


Fig. 4.18 Diagrama de Caja y Bigote para b^*

iii) Prueba Fisher LSD.

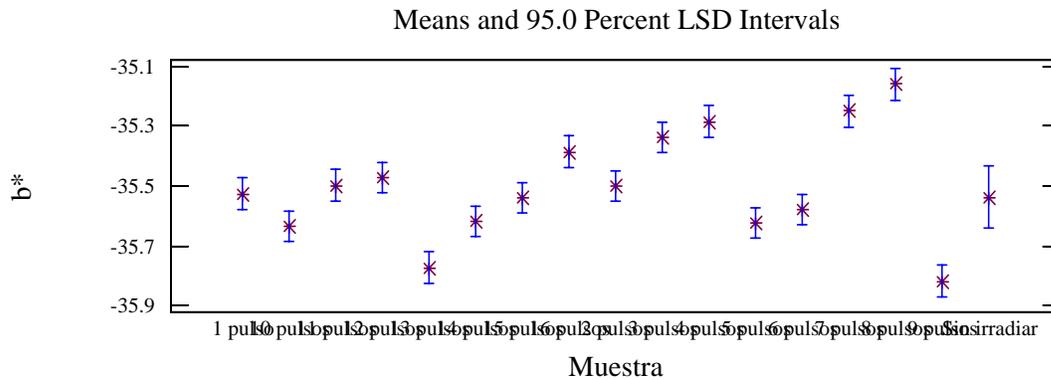


Fig. 4.19 Prueba de rangos múltiples para b^* .

e) análisis estadístico del *parámetro de Color ΔE^** .

i) Sumario estadístico.

Muestra	Mediciones	Media	Varianza	Desv. Std.
1 pulso	20	0.321	0.011716	0.108241
10 pulsos	20	0.280	0.007830	0.088488
11 pulsos	20	0.336	0.0129293	0.113707
12 pulsos	20	0.357	0.0097007	0.098492
13 pulsos	20	0.485	0.0130597	0.114279
14 pulsos	20	0.264	0.0112017	0.105838
15 pulsos	20	0.360	0.0395167	0.198788
16 pulsos	20	0.445	0.0218916	0.147958
2 pulsos	20	0.308	0.0210599	0.14512
3 pulsos	20	0.361	0.0566945	0.238106
4 pulsos	20	0.392	0.0130998	0.114454
5 pulsos	20	0.277	0.0118756	0.108975
6 pulsos	20	0.229	0.0079982	0.089432
7 pulsos	20	0.535	0.0383405	0.195807
8 pulsos	20	0.548	0.0422694	0.205595
9 pulsos	20	0.449	0.0101357	0.100676
Sin irradiar	5	0.0	0.0	0.0
Total	325	0.366	0.0300561	0.173367

Muestra	Mínimo	Máximo	Rango
1 pulso	0.175149	0.621317	0.446169
10 pulsos	0.12274	0.449946	0.327206
11 pulsos	0.19335	0.583897	0.390547
12 pulsos	0.155311	0.575999	0.420688
13 pulsos	0.256626	0.643621	0.386996
14 pulsos	0.119691	0.525037	0.405346
15 pulsos	0.190188	1.12028	0.930088
16 pulsos	0.236371	0.726008	0.489637
2 pulsos	0.162845	0.835673	0.672828
3 pulsos	0.111016	0.811905	0.700888
4 pulsos	0.251558	0.640422	0.388865
5 pulsos	0.17208	0.646537	0.474457
6 pulsos	0.122002	0.47653	0.354528
7 pulsos	0.206908	0.868495	0.661587
8 pulsos	0.173548	0.912551	0.739003
9 pulsos	0.247646	0.581579	0.333933
Sin irradiar	0.0	0.0	0.0
Total	0.0	1.12028	

Tabla 4.16 Sumario estadístico para ΔE^* .

ii) Diagrama de Caja y Bigote.

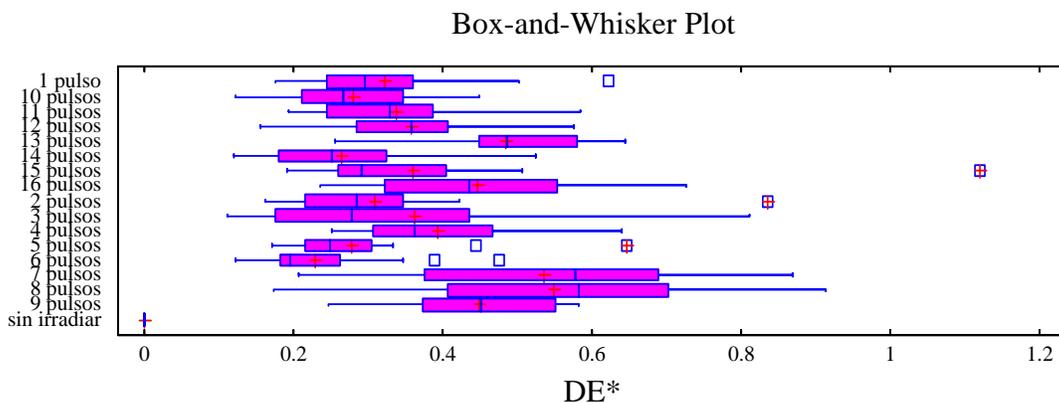


Fig. 4.20 Diagrama de Caja y Bigote para ΔE^*

La variación de las medias de ΔE^* es muy pequeña, de 0.2 a 0.5, lo que indica que el láser de Ho: YAG, no causa una degradación del color significativa en este tipo de tela, ni en este color en específico.

iii) Prueba Fisher LSD.

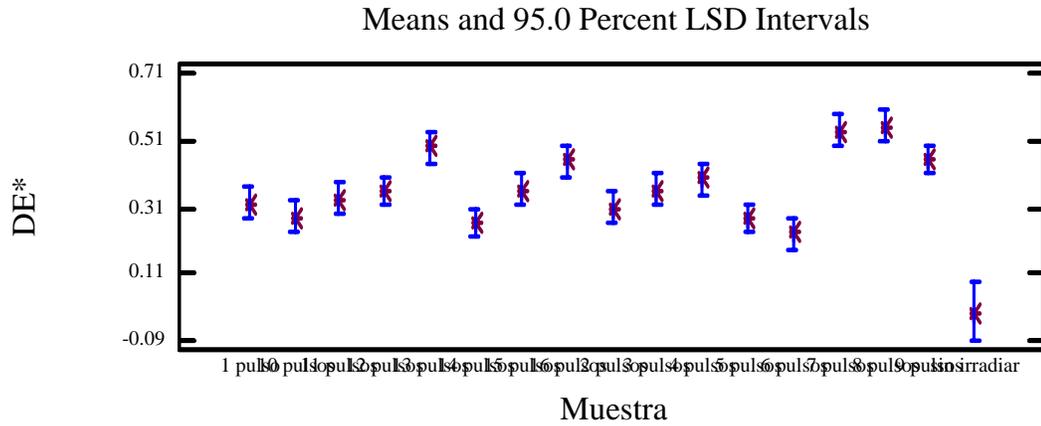


Fig. 4.21 Prueba de rangos múltiples para ΔE^* :

Method: 95.0 percent LSD			
Muestra	Mediciones	Media	Grupos Homogéneos
Sin irradiar	5	0.0	X
6 pulsos	20	0.229763	X
14 pulsos	20	0.264649	XX
5 pulsos	20	0.27745	XXX
10 pulsos	20	0.280342	XXX
2 pulsos	20	0.308404	XXXX
1 pulso	20	0.32122	XXX
11 pulsos	20	0.33682	XXX
12 pulsos	20	0.357249	XXX
15 pulsos	20	0.360011	XXX
3 pulsos	20	0.361865	XXXX
4 pulsos	20	0.392853	XXX
16 pulsos	20	0.44568	XXX

9 pulsos	20	0.44908	XXX
13 pulsos	20	0.485013	XXX
7 pulsos	20	0.535484	XX
8 pulsos	20	0.54874	X

Contraste	Diferencia	+/- Límites
1 pulso - 10 pulsos	0.0408783	0.0886889
1 pulso - 11 pulsos	-0.0156002	0.0886889
1 pulso - 12 pulsos	-0.0360289	0.0886889
1 pulso - 13 pulsos	*-0.163793	0.0886889
1 pulso - 14 pulsos	0.0565714	0.0886889
1 pulso - 15 pulsos	-0.0387911	0.0886889
1 pulso - 16 pulsos	*-0.12446	0.0886889
1 pulso - 2 pulsos	0.0128157	0.0886889
1 pulso - 3 pulsos	-0.0406455	0.0886889
1 pulso - 4 pulsos	-0.0716331	0.0886889
1 pulso - 5 pulsos	0.0437696	0.0886889
1 pulso - 6 pulsos	*0.0914571	0.0886889
1 pulso - 7 pulsos	*-0.214264	0.0886889
1 pulso - 8 pulsos	*-0.22752	0.0886889
1 pulso - 9 pulsos	*-0.12786	0.0886889
1 pulso - sin irradiar	*0.32122	0.140229
10 pulsos - 11 pulsos	-0.0564785	0.0886889
10 pulsos - 12 pulsos	-0.0769072	0.0886889
10 pulsos - 13 pulsos	*-0.204672	0.0886889
10 pulsos - 14 pulsos	0.0156931	0.0886889
10 pulsos - 15 pulsos	-0.0796694	0.0886889
10 pulsos - 16 pulsos	*-0.165339	0.0886889
10 pulsos - 2 pulsos	-0.0280626	0.0886889
10 pulsos - 3 pulsos	-0.0815238	0.0886889
10 pulsos - 4 pulsos	*-0.112511	0.0886889
10 pulsos - 5 pulsos	0.00289132	0.0886889
10 pulsos - 6 pulsos	0.0505788	0.0886889
10 pulsos - 7 pulsos	*-0.255142	0.0886889
10 pulsos - 8 pulsos	*-0.268398	0.0886889
10 pulsos - 9 pulsos	*-0.168738	0.0886889
10 pulsos - sin irradiar	*0.280342	0.140229
11 pulsos - 12 pulsos	-0.0204287	0.0886889
11 pulsos - 13 pulsos	*-0.148193	0.0886889
11 pulsos - 14 pulsos	0.0721716	0.0886889
11 pulsos - 15 pulsos	-0.0231909	0.0886889
11 pulsos - 16 pulsos	*-0.10886	0.0886889
11 pulsos - 2 pulsos	0.0284159	0.0886889
11 pulsos - 3 pulsos	-0.0250453	0.0886889

11 pulsos - 4 pulsos	-0.056033	0.0886889
11 pulsos - 5 pulsos	0.0593698	0.0886889
11 pulsos - 6 pulsos	*0.107057	0.0886889
11 pulsos - 7 pulsos	*-0.198663	0.0886889
11 pulsos - 8 pulsos	*-0.21192	0.0886889
11 pulsos - 9 pulsos	*-0.112259	0.0886889
11 pulsos - sin irradiar	*0.33682	0.140229
12 pulsos - 13 pulsos	*-0.127764	0.0886889
12 pulsos - 14 pulsos	*0.0926003	0.0886889
12 pulsos - 15 pulsos	-0.00276222	0.0886889
12 pulsos - 16 pulsos	-0.0884313	0.0886889
12 pulsos - 2 pulsos	0.0488446	0.0886889
12 pulsos - 3 pulsos	-0.00461657	0.0886889
12 pulsos - 4 pulsos	-0.0356042	0.0886889
12 pulsos - 5 pulsos	0.0797985	0.0886889
12 pulsos - 6 pulsos	*0.127486	0.0886889
12 pulsos - 7 pulsos	*-0.178235	0.0886889
12 pulsos - 8 pulsos	*-0.191491	0.0886889
12 pulsos - 9 pulsos	*-0.0918306	0.0886889
12 pulsos - sin irradiar	*0.357249	0.140229
13 pulsos - 14 pulsos	*0.220365	0.0886889
13 pulsos - 15 pulsos	*0.125002	0.0886889
13 pulsos - 16 pulsos	0.0393331	0.0886889
13 pulsos - 2 pulsos	*0.176609	0.0886889
13 pulsos - 3 pulsos	*0.123148	0.0886889
13 pulsos - 4 pulsos	*0.0921602	0.0886889
13 pulsos - 5 pulsos	*0.207563	0.0886889
13 pulsos - 6 pulsos	*0.25525	0.0886889
13 pulsos - 7 pulsos	-0.0504703	0.0886889
13 pulsos - 8 pulsos	-0.0637266	0.0886889
13 pulsos - 9 pulsos	0.0359338	0.0886889
13 pulsos - sin irradiar	*0.485013	0.140229
14 pulsos - 15 pulsos	*-0.0953626	0.0886889
14 pulsos - 16 pulsos	*-0.181032	0.0886889
14 pulsos - 2 pulsos	-0.0437557	0.0886889
14 pulsos - 3 pulsos	*-0.0972169	0.0886889
14 pulsos - 4 pulsos	*-0.128205	0.0886889
14 pulsos - 5 pulsos	-0.0128018	0.0886889
14 pulsos - 6 pulsos	0.0348857	0.0886889
14 pulsos - 7 pulsos	*-0.270835	0.0886889
14 pulsos - 8 pulsos	*-0.284091	0.0886889
14 pulsos - 9 pulsos	*-0.184431	0.0886889
14 pulsos - sin irradiar	*0.264649	0.140229
15 pulsos - 16 pulsos	-0.0856691	0.0886889
15 pulsos - 2 pulsos	0.0516068	0.0886889

15 pulsos - 3 pulsos	-0.00185435	0.0886889
15 pulsos - 4 pulsos	-0.032842	0.0886889
15 pulsos - 5 pulsos	0.0825607	0.0886889
15 pulsos - 6 pulsos	*0.130248	0.0886889
15 pulsos - 7 pulsos	*-0.175472	0.0886889
15 pulsos - 8 pulsos	*-0.188729	0.0886889
15 pulsos - 9 pulsos	*-0.0890684	0.0886889
15 pulsos - sin irradiar	*0.360011	0.140229
16 pulsos - 2 pulsos	*0.137276	0.0886889
16 pulsos - 3 pulsos	0.0838148	0.0886889
16 pulsos - 4 pulsos	0.0528271	0.0886889
16 pulsos - 5 pulsos	*0.16823	0.0886889
16 pulsos - 6 pulsos	*0.215917	0.0886889
16 pulsos - 7 pulsos	*-0.0898034	0.0886889
16 pulsos - 8 pulsos	*-0.10306	0.0886889
16 pulsos - 9 pulsos	-0.00339931	0.0886889
16 pulsos - sin irradiar	*0.44568	0.140229
2 pulsos - 3 pulsos	-0.0534612	0.0886889
2 pulsos - 4 pulsos	-0.0844488	0.0886889
2 pulsos - 5 pulsos	0.0309539	0.0886889
2 pulsos - 6 pulsos	0.0786414	0.0886889
2 pulsos - 7 pulsos	*-0.227079	0.0886889
2 pulsos - 8 pulsos	*-0.240336	0.0886889
2 pulsos - 9 pulsos	*-0.140675	0.0886889
2 pulsos - sin irradiar	*0.308404	0.140229
3 pulsos - 4 pulsos	-0.0309877	0.0886889
3 pulsos - 5 pulsos	0.0844151	0.0886889
3 pulsos - 6 pulsos	*0.132103	0.0886889
3 pulsos - 7 pulsos	*-0.173618	0.0886889
3 pulsos - 8 pulsos	*-0.186874	0.0886889
3 pulsos - 9 pulsos	-0.0872141	0.0886889
3 pulsos - sin irradiar	*0.361865	0.140229
4 pulsos - 5 pulsos	*0.115403	0.0886889
4 pulsos - 6 pulsos	*0.16309	0.0886889
4 pulsos - 7 pulsos	*-0.14263	0.0886889
4 pulsos - 8 pulsos	*-0.155887	0.0886889
4 pulsos - 9 pulsos	-0.0562264	0.0886889
4 pulsos - sin irradiar	*0.392853	0.140229
5 pulsos - 6 pulsos	0.0476875	0.0886889
5 pulsos - 7 pulsos	*-0.258033	0.0886889
5 pulsos - 8 pulsos	*-0.27129	0.0886889
5 pulsos - 9 pulsos	*-0.171629	0.0886889
5 pulsos - sin irradiar	*0.27745	0.140229
6 pulsos - 7 pulsos	*-0.305721	0.0886889
6 pulsos - 8 pulsos	*-0.318977	0.0886889

6 pulsos - 9 pulsos	*-0.219317	0.0886889
6 pulsos - sin irradiar	*0.229763	0.140229
7 pulsos - 8 pulsos	-0.0132563	0.0886889
7 pulsos - 9 pulsos	0.0864041	0.0886889
7 pulsos - sin irradiar	*0.535484	0.140229
8 pulsos - 9 pulsos	*0.0996604	0.0886889
8 pulsos - sin irradiar	*0.54874	0.140229
9 pulsos - sin irradiar	*0.44908	0.140229

NOTA: En el valor donde aparece un * denota diferencia estadística significativa.

Tabla 4.17 Prueba de rangos múltiples para ΔE^* .

La tabla muestra el proceso de comparación múltiple para determinar cuales medias son significativamente diferentes entre ellas. También se muestra la diferencia estimada entre cada par de comparaciones de media, donde un * denota diferencia estadística significativa.

El análisis muestra que se tiene 80 pares de comparación con asterisco, indicando que estos pares muestran una diferencia significativa con un nivel de confianza del 95%. Además muestra que se tienen 10 grupos homogéneos usando una X en la columna para identificarlos. X's alineadas muestran que no se tiene diferencia significativa.

Con este método existe un 5.0% de riesgo de concluir que un par de medias es significativamente diferente cuando la diferencia entre ellas no sea significativa o sea 0.

iv) Gráfica del número de pulsos contra el promedio de ΔE^* . Enseguida se anexa la gráfica de número de pulsos contra la diferencia total de color.

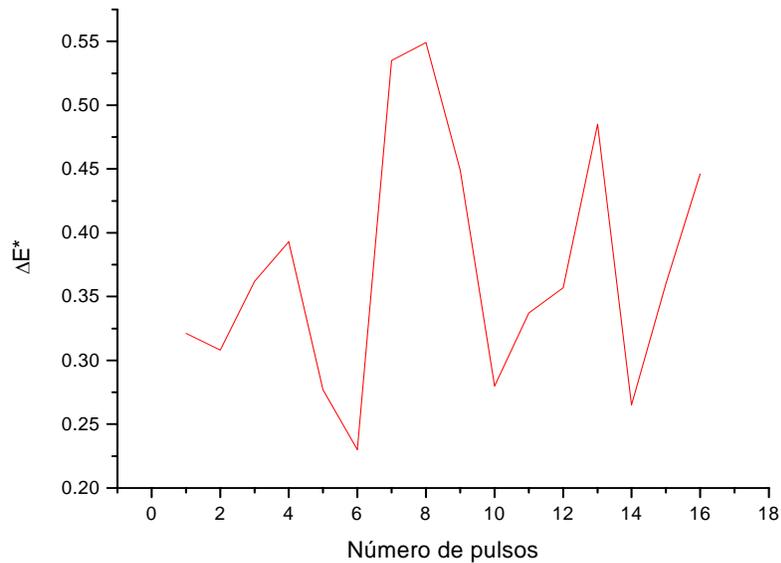


Fig. 4.22 Gráfica del numero de pulsos contra el promedio de ΔE^* obtenidos con el láser de Ho:YAG.

La gráfica anterior muestra que se tienen 4 puntos máximos de ΔE^* , en 4, 8, 12 y 16 pulsos, y cuatro puntos mínimos, en 2, 6, 10 y 14 pulsos, lo que demuestra un comportamiento periódico, aunque en diferente magnitud.

4.3.3 RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS MUESTRAS SOMETIDAS A *ENVEJECIMIENTO ACELERADO*.

a) Reflectancia. Enseguida se anexa la gráfica de reflectancia de las muestras sometidas a envejecimiento acelerado en el “weather-o-meter”. El gran promedio de los valores de reflectancia para cada una de las muestras se encuentran en el apéndice V.

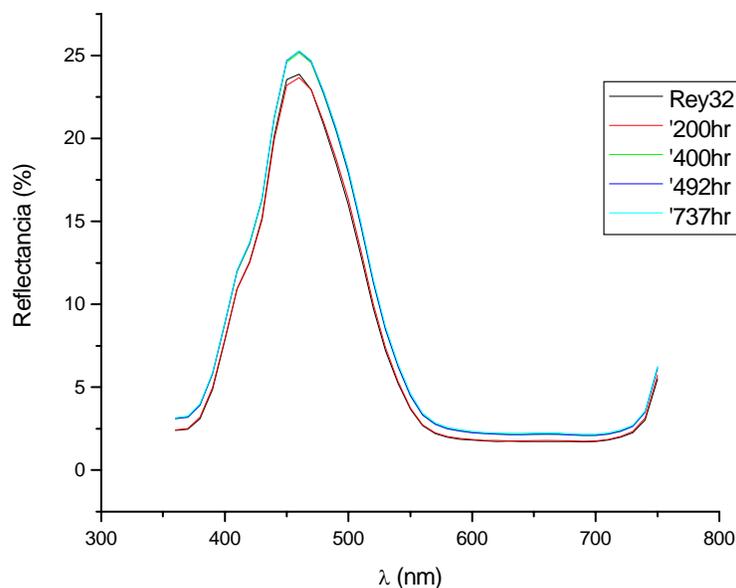


Fig. 4.23 Gráfica de λ contra reflectancia de las muestras sometidas a envejecimiento acelerado.

Nuevamente podemos observar que el cambio en reflectancia mas significativo se da alrededor de 460 nm, además a partir de 400 horas de exposición se tiene un incremento en todo el espectro visible.

b) Análisis Estadístico del **Parámetro de Color L^*** . Los valores puntuales de cada uno de los parámetros de color para cada una de las muestras se encuentran listados en el apéndice V.

i) Sumario Estadístico.

Muestra	Mediciones	Media	Varianza	Desv. Std.
200 hr	4	31.262	0.000715	0.0267395
400 hr	4	33.17	0.011202	0.10584
492 hr	4	33.22	0.005991	0.0774037
737 hr	4	33.486	0.021069	0.145154
Referencia	4	31.06	0.001440	0.0379561
Total	20	32.440	1.17158	1.0824

Muestra	Mínimo	Máximo	Rango
200 hr	31.229	31.286	0.057
400 hr	33.043	33.29	0.247
492 hr	33.146	33.329	0.183
737 hr	33.3	33.608	0.308
Referencia	31.006	31.094	0.088
Total	31.006	33.608	2.602

Tabla 4.18 Sumario estadístico de L*.

ii) Diagrama de Caja y Bigote.

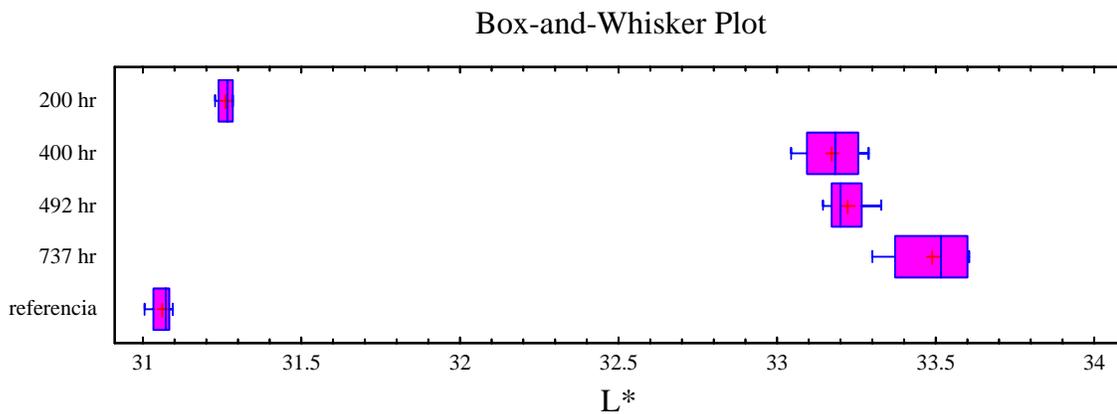


Fig. 4.24 Diagrama de caja y bigote para L*.

iii) Prueba Fisher LSD. Esta prueba nos permite validar las diferencias estadísticas entre uno y otro valor.

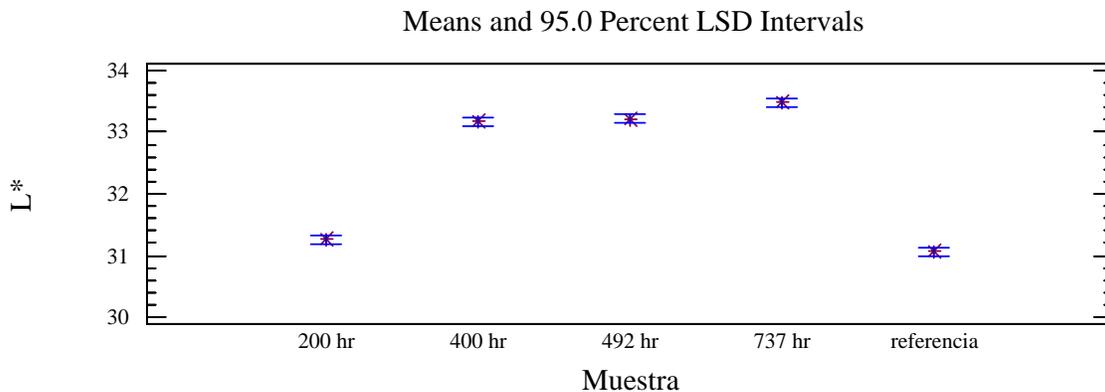


Fig. 2.25 Prueba de rangos múltiples para L*:

Method: 95.0 percent LSD

Muestra	Mediciones	Media	Homogéneos Grupos
---------	------------	-------	-------------------

Referencia	4	31.06	X
200 hr	4	31.2625	X
400 hr	4	33.175	X
492 hr	4	33.22	X
737 hr	4	33.4865	X

Contraste	Diferencia	+/- Límites
-----------	------------	-------------

200 hr - 400 hr	*-1.9125	0.135509
200 hr - 492 hr	*-1.9575	0.135509
200 hr - 737 hr	*-2.224	0.135509
200 hr - referencia	*0.2025	0.135509
400 hr - 492 hr	-0.045	0.135509
400 hr - 737 hr	*-0.3115	0.135509
400 hr - referencia	*2.115	0.135509
492 hr - 737 hr	*-0.2665	0.135509
492 hr - referencia	*2.16	0.135509
737 hr - referencia	*2.4265	0.135509

NOTA: En el valor donde aparece un * denota diferencia estadística significativa.

Tabla 4.19 Prueba de rangos múltiples para L*.

La tabla muestra el procedimiento de comparación múltiple para determinar cuales medias son significativamente diferentes entre ellas; además se muestra la diferencia estimada entre cada par de medias. Se tiene asterisco en 9 pares de medias, lo que indica que estos pares muestran diferencia significativa con un nivel de confianza del 95.0%.

además muestra que se tienen 4 grupos homogéneos usando una X en la columna para identificarlos. X's alineadas muestran que no se tiene diferencia significativa.

Con este método existe un 5.0% de riesgo de concluir que un par de medias es significativamente diferente cuando la diferencia entre ellas no sea significativa o sea 0.

c) Análisis Estadístico del *Parámetro de Color a**.

i) Sumario Estadístico.

Muestra	Mediciones	Media	Varianza	Desv. Std.
200 hr	4	-9.823	0.00258533	0.0508462
400 hr	4	-10.8365	0.010161	0.100802
492 hr	4	-10.8702	0.00105892	0.032541
737 hr	4	-11.198	0.000881333	0.0296873
Referencia	4	-8.78175	0.0331729	0.182134
Total	20	-10.3019	0.83956	0.916275

Muestra	Mínimo	Máximo	Rango
200 hr	-9.896	-9.78	0.116
400 hr	-10.912	-10.69	0.222
492 hr	-10.919	-10.852	0.067
737 hr	-11.229	-11.163	0.066
Referencia	-8.981	-8.595	0.386
Total	-11.229	-8.595	2.634

Tabla 4.20 Sumario estadístico para a*.

ii) Diagrama de Caja y Bigote.

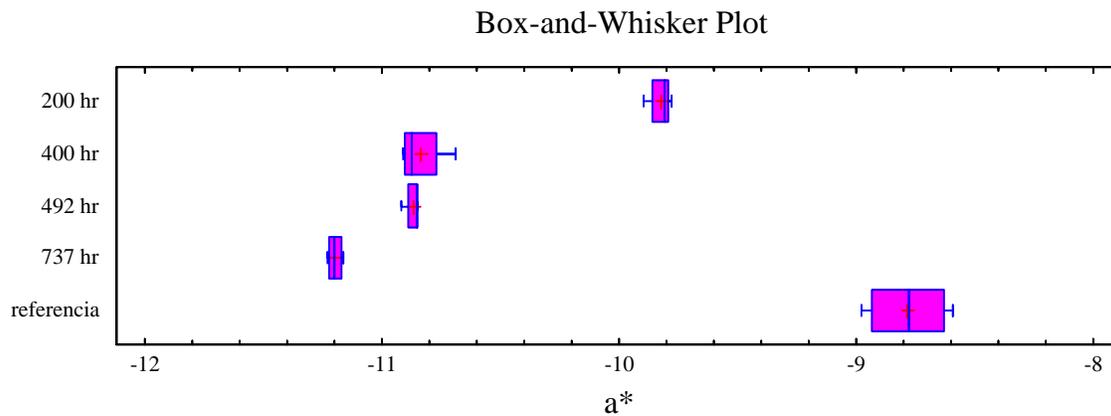


Fig. 4.26 Diagrama de Caja y Bigote para a*

iii) Prueba Fisher LSD.

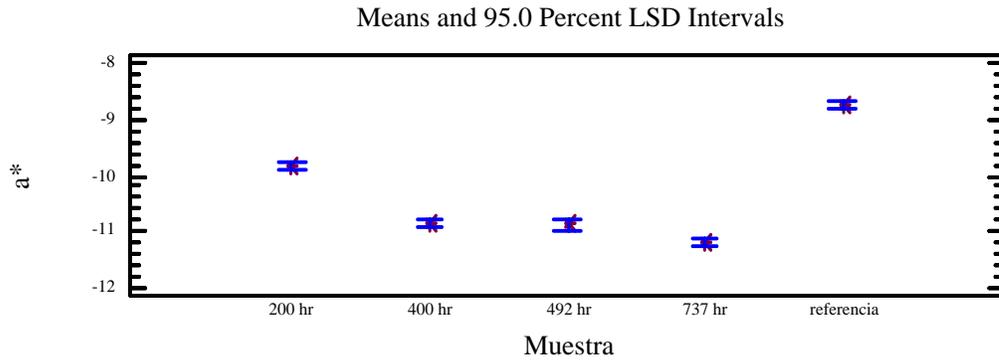


Fig. 4.27 Prueba de Rangos Múltiples para a^* :

Method: 95.0 percent LSD

Muestra	Mediciones	Media	Homogéneos Grupos
737 hr	4	-11.198	X
492 hr	4	-10.8702	X
400 hr	4	-10.8365	X
200 hr	4	-9.823	X
Referencia	4	-8.78175	X

Contraste	Diferencia	+/- Límites
200 hr - 400 hr	*1.0135	0.147455
200 hr - 492 hr	*1.04725	0.147455
200 hr - 737 hr	*1.375	0.147455
200 hr - referencia	*-1.04125	0.147455
400 hr - 492 hr	0.03375	0.147455
400 hr - 737 hr	*0.3615	0.147455
400 hr - referencia	*-2.05475	0.147455
492 hr - 737 hr	*0.32775	0.147455
492 hr - referencia	*-2.0885	0.147455
737 hr - referencia	*-2.41625	0.147455

NOTA: En el valor donde aparece un * denota diferencia estadística significativa.

Tabla 4.21 Prueba de rangos múltiples para a^*

La tabla muestra el procedimiento de comparación múltiple para determinar cuales medias son significativamente diferentes entre ellas; además se muestra la diferencia estimada entre cada par de medias. Se tiene asterisco en 9 pares de medias, lo que indica que estos pares muestran diferencia significativa con un nivel de confianza del 95.0%.

Además muestra que se tienen 4 grupos homogéneos usando una X en la columna para identificarlos. X's alineadas muestran que no se tiene diferencia significativa.

Con este método existe un 5.0% de riesgo de concluir que un par de medias es significativamente diferente cuando la diferencia entre ellas no sea significativa o sea 0.

d) Análisis Estadístico del *Parámetro de Color b**.

i) Sumario Estadístico.

Muestra	Mediciones	Media	Varianza	Desv. Std.
200 hr	4	-35.262	0.00790533	0.0889119
400 hr	4	-34.608	0.00908967	0.0953397
492 hr	4	-34.725	0.00136692	0.0369718
737 hr	4	-34.3237	0.0118162	0.108703
Referencia	4	-35.962	0.0177567	0.133254
Total	20	-34.976	0.360696	
Muestra	Mínimo	Máximo	Rango	
200 hr	-35.377	-35.171	0.206	
400 hr	-34.709	-34.494	0.215	
492 hr	-34.78	-34.699	0.081	
737 hr	-34.419	-34.218	0.201	
Referencia	-36.138	-35.815	0.323	

Tabla 4.22 Sumario estadístico para b*.

ii) Diagrama de Caja y Bigote.

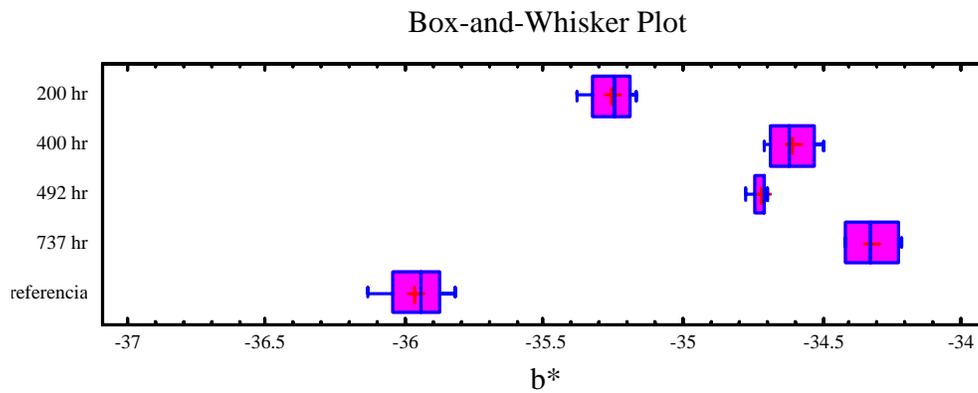


Fig. 4.27 Diagrama de Caja y Bigote para b^* .

iii) Prueba Fisher LSD.

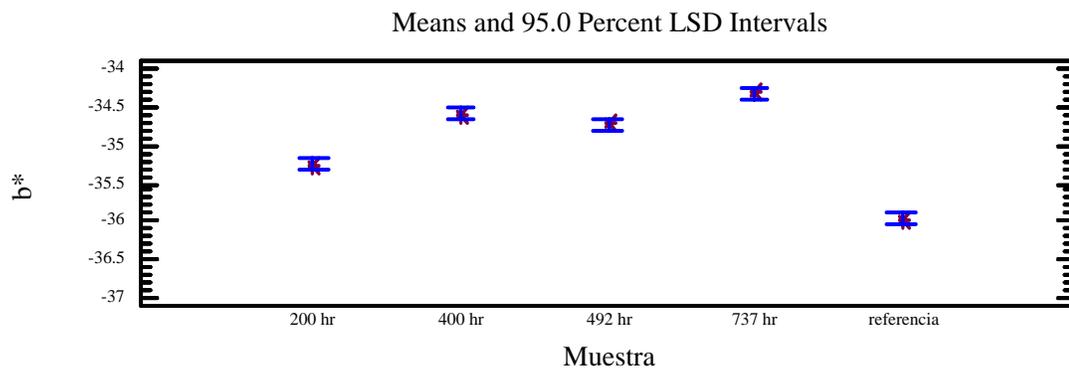


Fig. 4.28 Prueba de rangos múltiples para b^* :

Method: 95.0 percent LSD

Muestra	Mediciones	Media	Homogéneos Grupos
Referencia	4	-35.962	X
200 hr	4	-35.262	X
492 hr	4	-34.7253	X
400 hr	4	-34.6085	X
737 hr	4	-34.3237	X

Contraste	Diferencia	+/- Límites
200 hr - 400 hr	*-0.6535	0.147571
200 hr - 492 hr	*-0.53675	0.147571
200 hr - 737 hr	*-0.93825	0.147571
200 hr - referencia	*0.7	0.147571
400 hr - 492 hr	0.11675	0.147571
400 hr - 737 hr	*-0.28475	0.147571
400 hr - referencia	*1.3535	0.147571
492 hr - 737 hr	*-0.4015	0.147571
492 hr - referencia	*1.23675	0.147571
737 hr - referencia	*1.63825	0.147571

NOTA: En el valor donde aparece un * denota diferencia estadística significativa.

Tabla 4.23 Prueba de rangos múltiples para b*.

La tabla muestra el procedimiento de comparación múltiple para determinar cuales medias son significativamente diferentes entre ellas; además se muestra la diferencia estimada entre cada par de medias. Se tiene asterisco en 9 pares de medias, lo que indica que estos pares muestran diferencia significativa con un nivel de confianza del 95.0%.

Además muestra que se tienen 4 grupos homogéneos usando una X en la columna para identificarlos. X's alineadas muestran que no se tiene diferencia significativa. Con este método existe un 5.0% de riesgo de concluir que un par de medias es significativamente diferente cuando la diferencia entre ellas no sea significativa o sea 0.

e) Análisis Estadístico del *Parámetro de Color ΔE^** .

i) Sumario Estadístico.

Muestra	Mediciones	Media	Varianza	Desv. Std.
200 hr	4	1.27384	0.00125111	0.0353711
400 hr	4	3.24777	0.00270873	0.0520454
492 hr	4	3.24948	0.00556877	0.0746242
737 hr	4	3.79896	0.0043464	0.0659272
Sin irradiar	4	0.0	0.0	0.0
Total	20	2.31401	2.18928	1.47962

Muestra	Mínimo	Máximo	Rango
200 hr	1.2401	1.32153	0.0814277
400 hr	3.19489	3.30198	0.10709
492 hr	3.19489	3.35801	0.163112
737 hr	3.70832	3.85635	0.148036
Sin irradiar	0.0	0.0	0.0
Total	0.0	3.85635	3.85635

Tabla 4.24 Sumario estadístico para ΔE^* .

ii) Diagrama de Caja y Bigote.

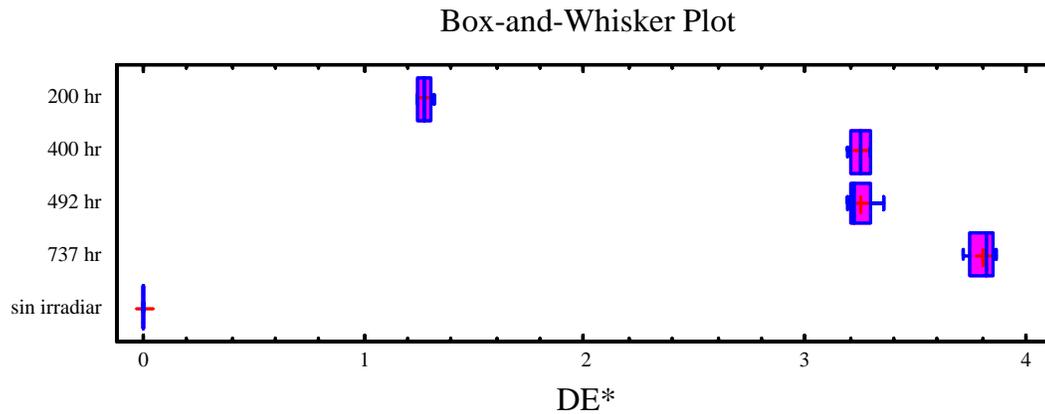


Fig. 4.29 Diagrama de Caja y Bigote para ΔE^* .

iii) Prueba Fisher LSD.

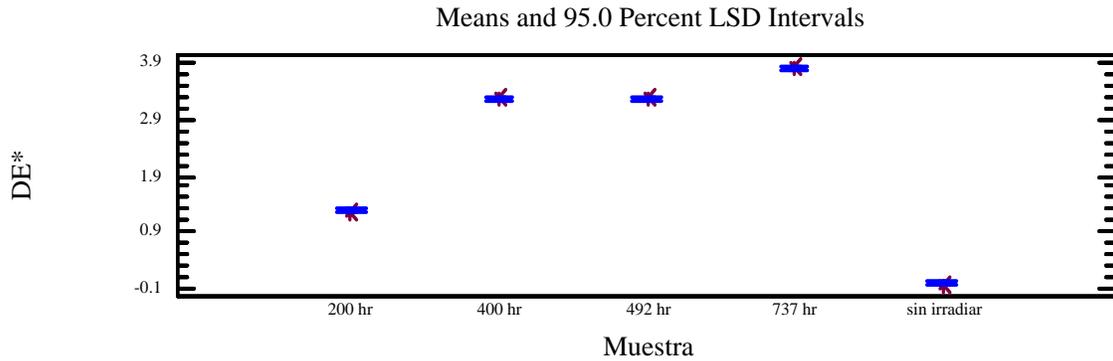


Fig. 4.30 Prueba de rangos múltiples para ΔE^* .

Method: 95.0 percent LSD

Muestra	Mediciones	Media	Grupos Homogéneos
Sin irradiar	4	0.0	X
200 hr	4	1.27384	X
400 hr	4	3.24777	X
492 hr	4	3.24948	X
737 hr	4	3.79896	X

Contraste	Diferencia	+/- Límites
200 hr - 400 hr	*-1.97393	0.0793949
200 hr - 492 hr	*-1.97564	0.0793949
200 hr - 737 hr	*-2.52512	0.0793949
200 hr - sin irradiar	*1.27384	0.0793949
400 hr - 492 hr	-0.00171	0.0793949
400 hr - 737 hr	*-0.55119	0.0793949
400 hr - sin irradiar	*3.24777	0.0793949
492 hr - 737 hr	*-0.54948	0.0793949
492 hr - sin irradiar	*3.24948	0.0793949
737 hr - sin irradiar	*3.79896	0.0793949

NOTA: En el valor donde aparece un * denota diferencia estadística significativa.

Tabla 4.25 Prueba de rangos múltiples para ΔE^* .

La tabla muestra el procedimiento de comparación múltiple para determinar cuales medias son significativamente diferentes entre ellas; además se muestra la diferencia estimada entre cada par de medias. Se tiene asterisco en 9 pares de medias, lo que indica que estos pares muestran diferencia significativa con un nivel de confianza del 95.0%.

además muestra que se tienen 4 grupos homogéneos usando una X en la columna para identificarlos. X's alineadas muestran que no se tiene diferencia significativa.

Con este método existe un 5.0% de riesgo de concluir que un par de medias es significativamente diferente cuando la diferencia entre ellas no sea significativa o sea 0.

iv) Gráfica del tiempo en horas contra el promedio de ΔE^* . Enseguida se anexa la gráfica del tiempo de exposición, en horas, contra el ΔE^* .

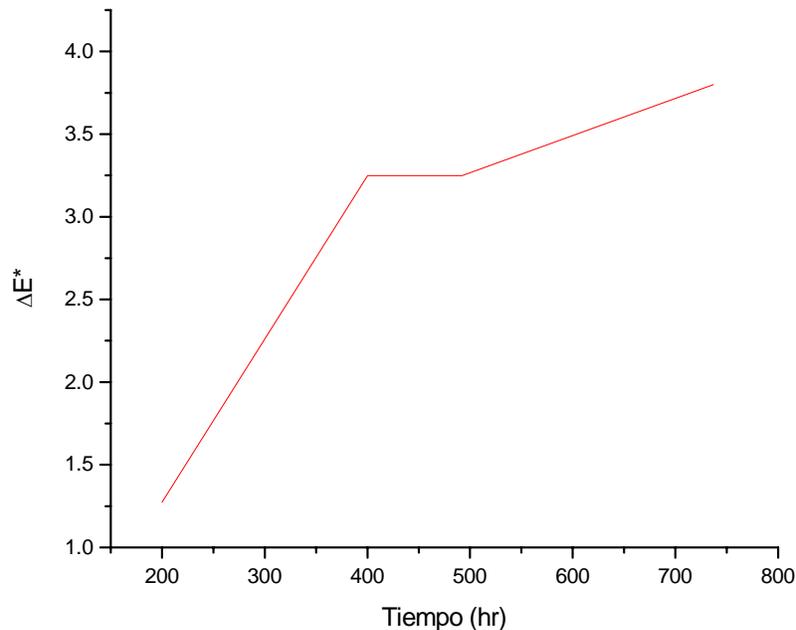


Fig. 4.31 Gráfica de tiempo de exposición en la cámara de envejecimiento contra ΔE^*

El ΔE^* en la cámara de envejecimiento acelerado muestra un incremento conforme aumenta el tiempo de exposición, presentándose un cambio muy pequeño de 400 hr a 492 hr, que es el único par donde la prueba de Fisher LSD no encuentra diferencia significativa y los maneja, a ambos, como un grupo homogéneo.

4.3.4 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los datos a usar para la obtención de la correlación son los obtenidos con el láser de Nd:YAG, ya que fueron los datos que tuvieron un comportamiento mas homogéneo en el análisis estadístico y los que presentaron un ΔE^* mayor.

Los resultados obtenidos con el láser de Ho:YAG, no se utilizarán para obtener la correlación, ya que no presentan diferencias estadísticas significativas, además de que su cambio de color total o ΔE^* es muy pequeño, del orden de 0.6 el mayor, lo que nos da un cambio en la escala de grises de 4-5.

Para demostrar la reproducibilidad del experimento, se realizó una segunda corrida del experimento con el láser de Nd:YAG, cuyos datos y resultados son similares a los obtenidos en la primer corrida; estos datos se encuentran en el apéndice IV.

4.4 OBTENCIÓN DE LA CORRELACIÓN

Para la obtención de la correlación entre el método propuesto, degradación del color por medio de láser, y el método bajo norma, se usó el cambio total de color, ΔE^* , por dos razones: la primera es porque su valor está en función de la diferencia entre la muestra de referencia y las muestras tratadas, ya sea con el láser o en el “weather-o-meter”, de los otros tres parámetros, L^* , a^* y b^* (ver fórmula I.10 del apéndice I), es decir, es el único de los parámetros de color que involucra la variación de los demás parámetros; y la segunda razón es por que nos permite relacionar directamente el numero de pulsos del láser con el número de horas de exposición en la cámara de envejecimiento acelerado y además con el cambio de color en la escala de grises.

4.4.1 ESCALA DE GRISES CONTRA CAMBIO TOTAL DEL COLOR ΔE^* .

La Fig. 4.32 muestra la gráfica del cambio de color en escala de grises contra el cambio total de color ΔE^* . La importancia de esta gráfica para el presente trabajo, y por lo que es citada antes de la obtención de la correlación, es que nos relaciona directamente el cambio total de color, ΔE^* , contra el cambio de color en escala de grises.

Estos valores fueron citados en la tabla 3.1 del capítulo 3, y son valores estandarizados, reportados en la literatura [1].

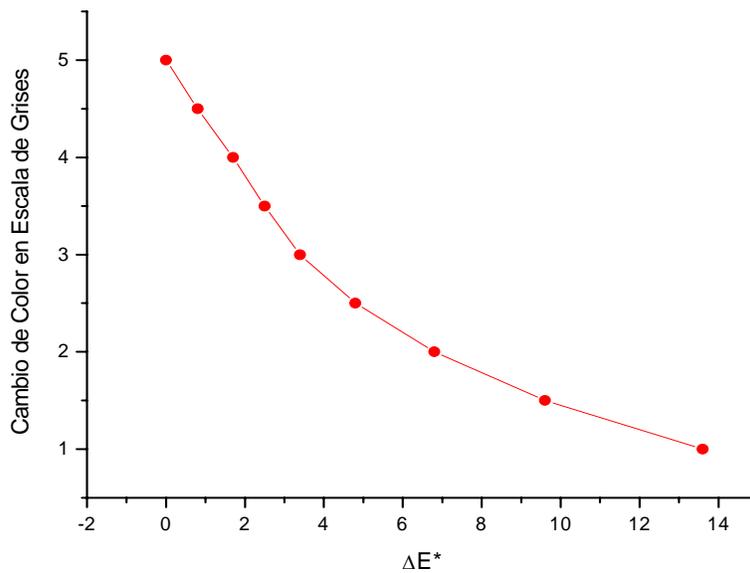


Fig. 4.32 Gráfica de Escala de grises contra cambio total del color ΔE^*

4.4.2 OBTENCIÓN DE LA FUNCIÓN POLINOMIAL DE LA GRÁFICA DE NÚMERO DE PULSOS CONTRA ΔE^* OBTENIDA CON EL LÁSER DE Nd:YAG.

De la gráfica mostrada en la Fig. 4.12, número de pulsos contra el cambio de color, ΔE^* , obtenido con el láser de Nd:YAG, se realizó un ajuste polinomial, mostrado en la Fig. 4.33, con la ayuda del paquete computacional Origin versión 6.1.

La función polinomial obtenida con el ajuste de la curva anterior es la siguiente:

$$\Delta E^* = 0.01706 + 2.15915X - 0.93642X^2 + 0.1852X^3 - 0.01747X^4 + 6.54487 \cdot 10^{-4}X^5$$

Esta función polinomial describe el comportamiento del ΔE^* en función del número de pulsos del láser de Nd:YAG depositados en la tela “outdoor “ color rey.

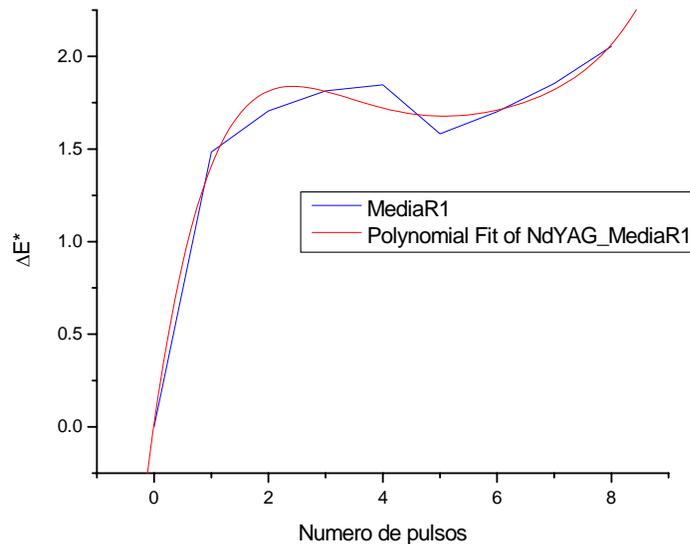


Fig. 4.33 Ajuste polinomial de la curva de número de pulsos contra ΔE^* obtenida con el láser de Nd:YAG.

En la figura 4.34 se muestra la gráfica obtenida de con la función polinomial anterior, con la cual podemos obtener la diferencia total de color conforme al número de pulsos que se depositen en la tela. Este resultado lo podemos obtener ya sea en forma gráfica o usando la función polinomial anterior.

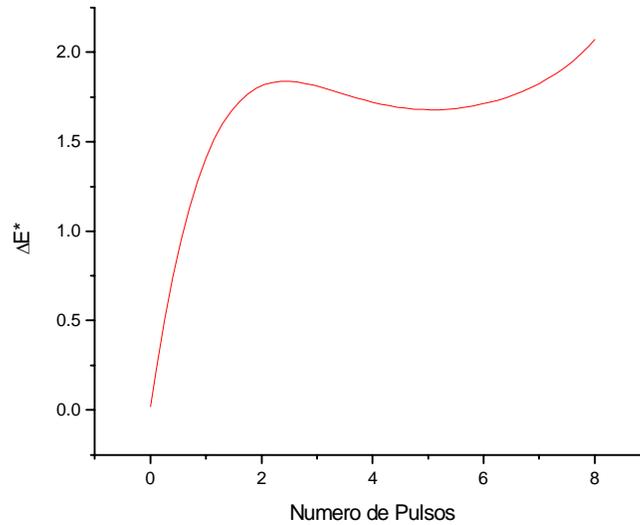


Fig. 4.34 Gráfica de número de pulsos contra ΔE^* obtenida con la función polinomial

4.4.3 OBTENCIÓN DE LA FUNCIÓN POLINOMIAL DE LA GRÁFICA DE ΔE^* CONTRA NÚMERO DE HORAS DE EXPOSICIÓN EN LA CÁMARA DE ENVEJECIMIENTO ACELERADO.

De la gráfica mostrada en la Fig. 4.31, tiempo de exposición en la cámara de envejecimiento acelerado contra ΔE^* obtenemos su función, que es un polinomio de orden 3, con la ayuda del paquete computacional Origin versión 6.1.

La función polinomial obtenida del ajuste de la gráfica anterior es la siguiente:

$$\Delta E^* = -6.3618 + 0.05835X - 1.15905 \cdot 10^{-4} X^2 + 7.52203 \cdot 10^{-8} X^3$$

La función polinomial anterior nos relaciona la diferencia total de color, ΔE^* , con el numero de horas de exposición en la cámara de envejecimiento.

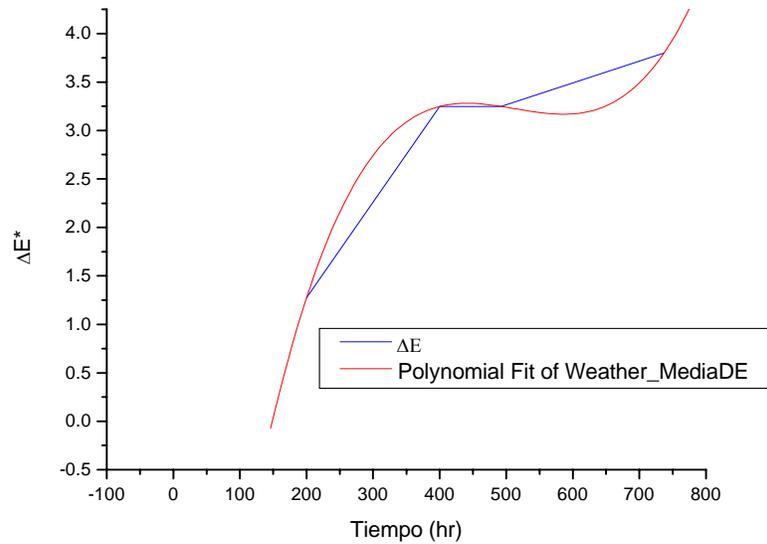


Fig. 4.35 Ajuste polinomial de la curva de tiempo de exposición en la cámara de envejecimiento acelerado contra el cambio de color ΔE^* .

En la tabla 4.5 se muestran los valores obtenidos con la función polinomial anterior.

Tiempo (hr)	ΔE^*
160	0.315
180	0.825
200	1.274
220	1.666
240	2.006
260	2.296
280	2.540
300	2.743
320	2.906
340	3.035
360	3.132
380	3.202
400	3.247
420	3.272
440	3.281
460	3.275
480	3.260
500	3.239
520	3.216
540	3.194
560	3.176
580	3.167
600	3.170

Tiempo (hr)	ΔE^*
620	3.188
640	3.226
660	3.287
680	3.373
700	3.490
720	3.641
740	3.829
760	4.057
780	4.331
800	4.652
820	5.025
840	5.453

Tabla 4.26 Datos obtenidos con la función polinomial del tiempo de exposición en el “weather-o-meter” contra ΔE^* .

En la Fig. 4.13 se muestra la gráfica obtenida con los valores contenidos en la tabla 4.5.

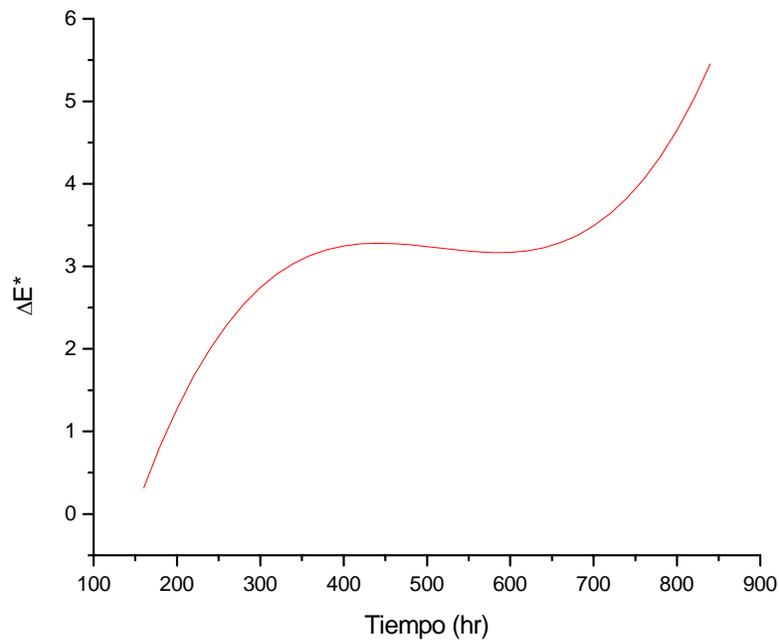


Fig. 4.36 Gráfica de tiempo de exposición en el “weather-o-meter” contra ΔE^* obtenida con la función polinomial.

Con los valores listados en la tabla 4.26, o bien con la gráfica anterior se obtendrá el número de horas de exposición en la cámara de envejecimiento con solo conocer el ΔE^* . Este ΔE^* será el obtenido de someter la muestra, que debe de ser de color rey, a irradiación con láser.

La tela a analizar será tratada como la tela de donde se obtuvo la correlación, es decir, se someterá a radiación láser de 1 a 8 pulsos para obtener la gráfica de ΔE^* contra número de pulsos láser; esta gráfica será relacionada con la curva obtenida del ajuste polinomial de número de horas de exposición en la cámara de envejecimiento contra ΔE^* , para conocer cuanto tiempo de exposición es necesario para generar este cambio de color.

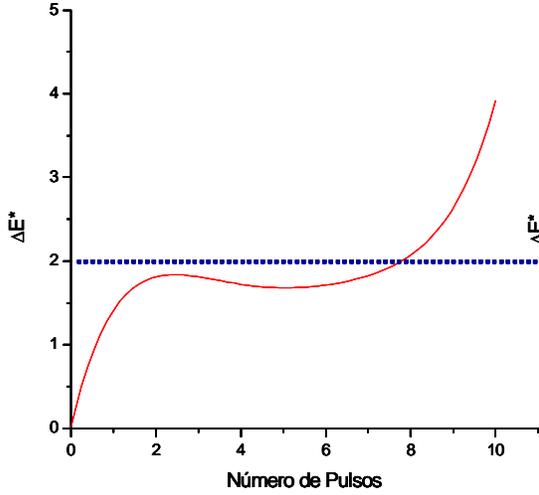
Enseguida se anexa un ejemplo de aplicación de este método. Sí al irradiar la tela con el láser de Nd:YAG, obtenemos un ΔE^* de 2.5; como se ilustra en la Fig. 4.37, por medio de la gráfica de número de horas de exposición en el “weather-o-meter” contra ΔE^* , conoceremos que este ΔE^* se generaría si la muestra fuese expuesta alrededor de 300 horas en la cámara de envejecimiento. Estas 300 horas equivalen a 15 meses de exposición a la radiación solar en el desierto de Arizona.

Aunado a esto también podemos conocer que un ΔE^* de 2.5 equivale a un cambio de color en la escala de grises de 3-4.

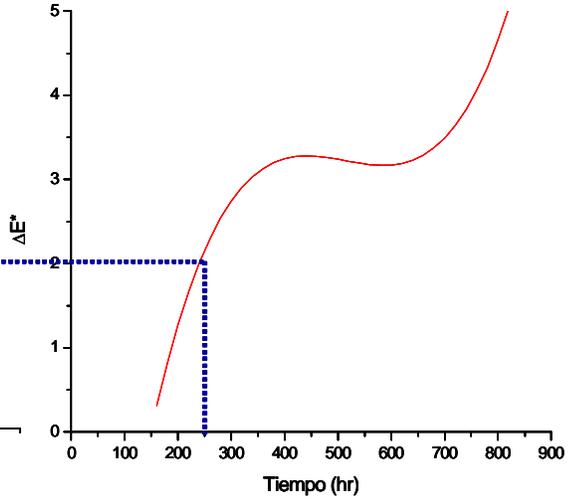
Con esta correlación obtenida, conoceremos a partir del ΔE^* obtenido de la irradiación con láser, tres parámetros importantes: el cambio de color en escala de grises, que es la forma en que generalmente se expresan las solideces del color, el número de horas de exposición en la cámara de envejecimiento acelerado que nos generarían este ΔE^* , el tiempo real de exposición que nos generaría este cambio de color.

La ventaja mas palpable de esta correlación es que los resultados los tendríamos en un máximo de dos días, lo que representa un ahorro invaluable, tanto en tiempo como en dinero.

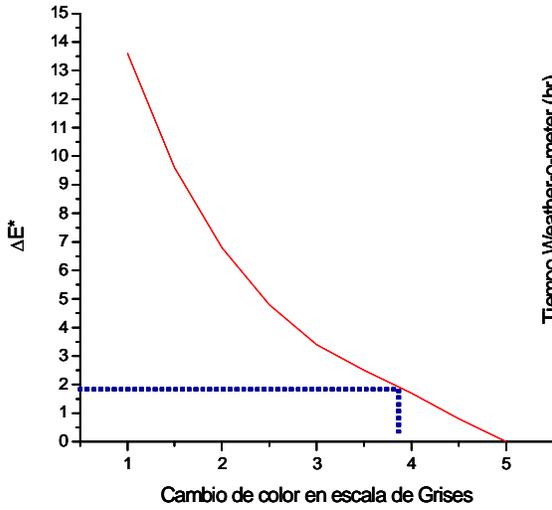
Gráfica de ΔE^* obtenida con el láser de Nd:YAG



Gráfica de ΔE^* obtenida con la cámara de envejecimiento



Gráfica de ΔE^* contra el cambio de color en escala de grises



Equivalencia del tiempo de exposición en la cámara de envejecimiento con tiempo real

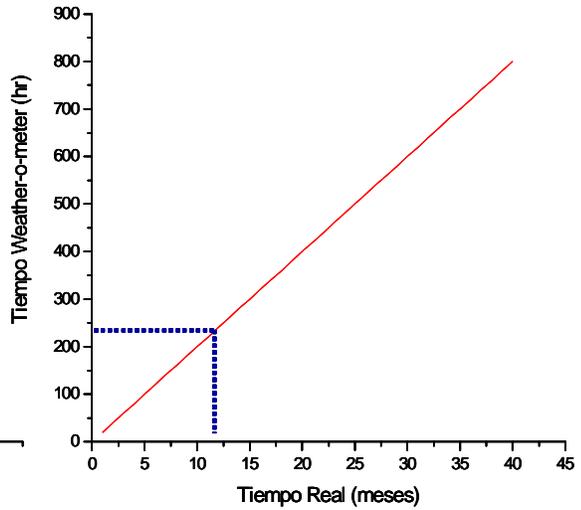


Fig. 4.37 Ejemplo de aplicación gráfica del método propuesto.

4.5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] AATCC Test Method 16-1998 Colorfastness to light. American Association of Textile, Chemist and Colorist. Technical Manual-1998.

CAPÍTULO V

ESTUDIO ECONÓMICO

Para la realización del estudio económico se contemplaron tanto el costo del equipo como los costos de instalación y mantenimiento cuando éste ya se encuentren en operación.

5.1 ESTUDIO ECONÓMICO DE LA PRUEBA DE SOLIDEZ DEL COLOR EN A CÁMARA DE ENVEJECIMIENTO.

Costos de Operación:

Mano de Obra:	Cantidad	Costo	Porcentaje	Costo de energía eléctrica*	
<i>Laboratorista</i>	1	\$24,000	6.9		
Materiales y suministros					
<i>Energía (W):</i>	4000	\$244,900	70.3	0.75 base	183090
<i>Agua (m3):</i>	1	\$500	0.1	0.13 Inter	30545
<i>Resinas p/Agua</i>	3	\$1,800	0.5	0.13 Punta	31265
<i>Lámpara</i>	1	\$20,000	5.7		
<i>Filtros</i>	1	\$500	0.1		
<i>Mto. Preventivo</i>	1/4 anual	\$5,000	1.4		
				* Fuente: www.cfe.gob.mx	
		SUBTOTAL:	\$296,700	85.2	

Costos Financieros:

Capacidad máxima del equipo 80 muestras

Maq. Y Equipo			
Weather-Ometer	\$1,000,000		
<i>Depreciación</i>	20 % Anual	\$50,000	14.4
Gastos de Instalación	\$30,000		
<i>Amortizaciones</i>	20 % Anual	\$1,500	
		SUBTOTAL:	\$51,500
			14.8

TOTAL	\$348,200	100.0
--------------	------------------	--------------

COSTO/PRUEBA \$4,353

5.3 ESTUDIO ECONÓMICO DE LA PRUEBA DE DEGRADACIÓN DE COLOR CON LÁSER.

Costos de Operación:		Mensual	Trimestral	Porcentaje
Mano de obra				
<i>1 Laboratorista</i>		\$8,000	\$24,000	52.9
<i>Mantenimiento</i>		\$167	\$500	1.1
Materiales y Suministros:				
<i>Energía (W)</i>		\$37	\$110	0.2
<i>Agua (m3)</i>		\$600	\$1,800	4.0
Costos Financieros:				
Maq. y Equipo				
<i>Láser</i>	300000			
<i>Depreciación</i>	20 %			
<i>Anual</i>		\$5,000	\$15,000	33.0
<i>Equipo Adicional</i>	\$32,000			
<i>Depreciación</i>	20 %			
<i>Anual</i>		\$417	\$1,250	2.8
<i>Depreciación</i>	100 %			
<i>Anual</i>		\$583	\$1,750	3.9
Gastos de Instalación \$20,000				
<i>Amortizaciones</i>	20%			
<i>Anual</i>		\$333	\$1,000	2.2
TOTAL:		\$45,410	100.0	

COSTO POR PRUEBA \$378.42

Watts:

600
 2 pruebas/día
 10 pruebas/semana
 40 Pruebas/mes
 120 Pruebas/trimestre

Equipo Adicional:

Artículo	Costo	Duración
Lámpara	\$6,000	10,000,000 1 por año
Etiquetadora	\$10,000	
Monturas	\$15,000	
Lentes	\$1,000	1 por año
<i>Total</i>	<i>\$32,000</i>	

5.3 CONCLUSIONES

Los altos costos de mantenimiento tanto correctivo como preventivo y de refacciones de la cámara de envejecimiento acelerado, aunado a la gran cantidad de energía eléctrica que consume, elevan el costo de las pruebas de solidez de color en este tipo de equipos; además de los cerca de tres meses de espera para conocer los resultados de la prueba.

Con el presente estudio económico podemos concluir que el proyecto desarrollado en la presente tesis es económicamente viable, ya que de obtener un método práctico y aplicable de degradación de color con láser, se tendría un ahorro bastante elevado, de alrededor del 90%, además de que los resultados se tendrían en no más de dos días.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

6.1 CONCLUSIONES

El propósito de esta tesis fue el obtener una correlación entre el método bajo norma de estabilidad del color a la luz, cuyas pruebas fueron realizadas en el Centro de Tecnología Textil, y un método propuesto de degradación de color con láser, sobre fibras acrílicas tipo “outdoors”.

Las pruebas exploratorias de degradación de color con láser indicaron que para cada color, y en su caso para cada tipo de fibra, se deben encontrar las condiciones óptimas de irradiación ya que cada color, y cada fibra, por su constitución química, tamaño de partícula, tamaño de molécula, etc. interacciona diferente con los diferentes tipos de láser. Para la obtención de la función polinomial que describiera el comportamiento de la diferencia total del color, ΔE^* , con respecto a los pulsos láser depositados, se probaron cuatro tipos de láseres:

El láser de Ho:YAG, con este láser el cambio de color total, ΔE^* , fue del orden de 0.6 el máximo, lo que indica una baja interacción de la radiación con la tela, además que el ΔE^* no se incrementó conforme aumentaba el número de pulsos; no se realizó una replica del experimento ya que no se logró un cambio de color significativo.

El láser de Nd:YAG, pulsado fue utilizado por que se encontró en la literatura que es de los láseres que mas usados en la degradación de color en materiales poliméricos, además la longitud de onda donde emite coincide con un pequeño pico de absorbancia que muestra el color rey, Fig. 2.16. El cambio total de color, ΔE^* , obtenido fue más significativo por lo que los resultados se utilizaron para obtener la correlación final. Se realizó, además, una repetición del experimento, cuyos datos se encuentran en el apéndice IV, para comprobar la repetibilidad de los resultados; esta repetibilidad de resultados abre las puertas para otra posible aplicación de los láseres que sería la degradación de color.

Cabe destacar que al depositar 9 pulsos con este tipo de láser, la muestra se carbonizaba, por lo que solo se utilizaron hasta 8 pulsos de irradiación.

El láser de Nd:YAG con “Q-Switching” fue utilizado, pero se descartó porque fundía la fibra. El láser de CO₂ también fue utilizado, siendo descartado porque evaporaba la fibra, haciendo que el tejido pareciese más abierto.

Quisiera mencionar un aspecto importante, y que personalmente llamó sobremanera mi atención, del comportamiento de las gráficas de ΔE^* contra el número de pulsos de ambos láseres utilizados: la gráfica obtenida con el láser de Ho:YAG, Fig. 4.4, muestra que se tienen 4 puntos máximos de ΔE^* , en 4, 8, 12 y 16 pulsos, y cuatro puntos mínimos, en 2, 6, 10 y 14 pulsos, lo que demuestra un comportamiento, aunque en diferente magnitud, periódico; la gráfica 4.6 muestra que ΔE^* se incrementa conforme incrementa el número de pulsos, obteniéndose un máximo en 4 pulsos, en 5 pulsos se tiene un decremento, pero a partir de este punto comienza a incrementarse nuevamente hasta obtener otro máximo en 8 pulsos. La diferencia total de color indica que para ambos láseres se tienen máximos, en 4 y 8 pulsos.

Con el objetivo de que la correlación que se obtuviese en este trabajo fuese confiable y pudiésemos obtener resultados con un alto grado de exactitud, se realizó un análisis estadístico a cada uno de los parámetros de color, donde comprobamos las diferencias significativas entre cada diferente número de pulsos.

La correlación obtenida funciona bastante bien a partir de 160 horas, esto debido a que la mínima cantidad de horas a la que son sometidas las fibras “outdoors” son 200 horas.

Una observación muy importante que debe ser puntualizada, es que la correlación obtenida en el presente trabajo de tesis se obtuvo para el color rey, cuya fibra textil es acrílica, del tipo “outdoor”; y dicha correlación solo es aplicable y válida para este color y en este tipo de fibra.

El estudio económico comparativo realizado indica que de lograr obtener un método de degradación de color por medio de láser y de implementarlo, con todos los cambios que

esto involucra, se tendría un ahorro de un 90%, ya que las pruebas por el método tradicional son muy costosas, además de la rapidez con que se tendrían los resultados.

6.2 TRABAJO FUTURO

Aunque el objetivo del presente trabajo se logró, obtener una correlación entre el método bajo norma de estabilidad del color a la luz y la degradación de color con láser; varios aspectos del comportamiento del cambio total del color no fueron completamente entendidos, lo que quedaría como un trabajo futuro a nivel doctorado.

Uno de estos aspectos es el poder explicar el comportamiento de las gráficas de número de pulsos contra ΔE^* , ya que en ambos tipos de láseres utilizados, se tuvieron máximos en 4 y 8 pulsos.

Otros puntos importantes serían los siguientes: conocer cuantos enlaces químicos, de los colorantes, es necesario romper para generar un cambio de color que sea visualmente perceptible; determinar el mecanismo de degradación de los colorantes o pigmentos utilizados; cuales son los productos de degradación cuando la radiación degrada a la fibra. Algunos de estos puntos están reportados en la literatura, pero únicamente han sido realizados para la radiación solar, no para la radiación de algún tipo de láser donde podemos manipular su energía y se dispone de un amplio rango de longitudes de onda.

APÉNDICE I

LA PERCEPCIÓN HUMANA DE LA RADIACIÓN

I.1 INTRODUCCION

La función del ojo es la de comunicar al observador información sobre el mundo que le rodea. Todos los objetos irradian o reflejan luz en la región visible del espectro electromagnético; como el ojo es sensible en esta región, produce las sensaciones de la visión y del color

El mecanismo de la percepción del color y de la visión en el ojo humano es extremadamente complicado, aún no se conocen por completo, pero funciona semejante a los otros detectores de luz. De hecho, el ojo, el nervio óptico y el cerebro forman un sistema de detección en el cuerpo humano. La sensación de color y la visión son funciones de la calidad física de la luz, del proceso fisiológico en la retina y el cerebro y de la interpretación psicológica del proceso fisiológico por parte del cerebro. Todas estas operaciones se realizan a la velocidad de la luz y la sensación de visión se experimenta casi instantáneamente.

I.2 ¿QUE ES EL COLOR?

El color se puede definir como una sensación visual que se origina por la estimulación de la retina del ojo. Es algo psicofísico, ya que es una respuesta psicológica a un estímulo físico.

El color puede tener diferentes significados para cada persona; para el químico, el color se debe a un compuesto químico, un colorante o un pigmento; para el físico, el color se debe a la reflectancia, absorbancia o dispersión de la luz por un objeto; para el médico, el

color es un complejo proceso en el cerebro que interpreta la señal del nervio óptico; para el artista, el color es el medio para crear sensaciones agradables o desagradables en la mente del observador.

I.3 LA PERCEPCION DEL COLOR

La percepción del color implica una serie de hechos que son interdisciplinarios por naturaleza. La percepción del color incluye una fuente de luz, un objeto que es iluminado y el observador que percibe el color. Estos tres elementos son indispensables para que la percepción del color se lleve a cabo; en la oscuridad o si cerramos los ojos no podemos ver el color, y sino tenemos un objeto iluminado, el color no existe.

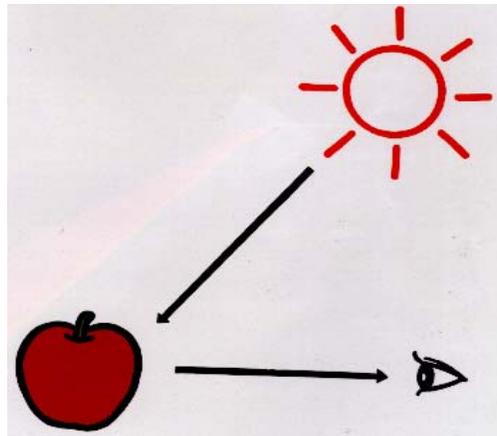


Fig. 1 Mecanismo de visión del color

I.4 EL OJO

Las principales características del ojo humano, que es un detector, se muestran en la figura 2.

El mecanismo de visión es descrito a continuación: la luz entra al ojo a través de la córnea, un segmento transparente de un radio bastante menor que el resto del globo ocular, su superficie mas externa se mantiene en una buena condición óptica mediante agua salada. Detrás de la córnea se encuentra el iris, que es una membrana fibrosa con

una abertura circular en el centro, llamada pupila, cuya función es controlar la cantidad de luz que llega a la retina, por lo que disminuye su diámetro conforme aumenta la intensidad luminosa. El cristalino, que está situado detrás del iris, tiene una curvatura o poder de convergencia tal que puede ser cambiada a voluntad para enfocar la imagen del objeto en la retina. Las regiones de atrás y de delante del cristalino están rellenas por unas sustancias transparentes conocidas como humor vítreo y humor acuoso respectivamente.

La luz recogida por el cristalino se concentra en la retina; siendo ésta el elemento sensible del ojo en el cual se forma la imagen. En la retina se transforma la energía luminosa en estímulos nerviosos. La retina está formada por varias capas, la más interna, la más cercana al vítreo, está compuesta de células y fibras nerviosas, mientras la parte externa es la más sensible a la luz y esta cubierta por células llamadas conos y bastones, además de un pigmento protector.

La fovea es una pequeña zona, cerca del eje óptico, donde la retina se hace más delgada, ya que no existen vasos sanguíneos ni fibras nerviosas. El centro de la fovea contiene solamente conos, empacados más densamente que en el resto de la retina, que son los elementos sensibles a la luz. Fuera de la fovea los elementos sensibles a la luz son los bastones.

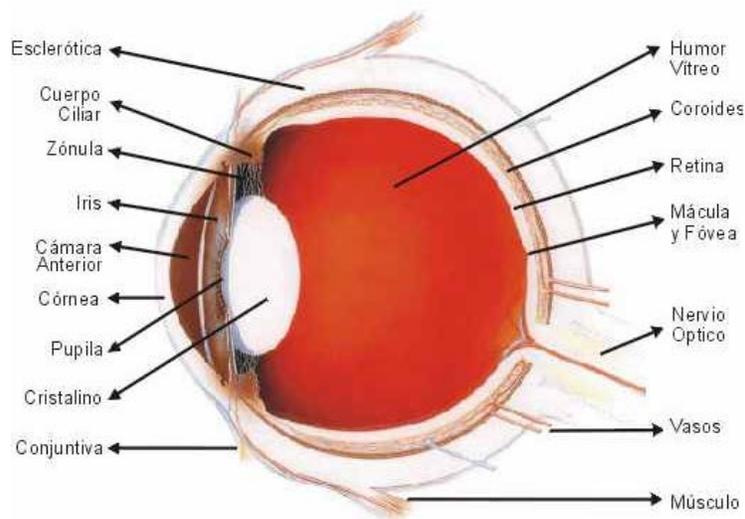


Fig. 2 Diagrama esquemático del ojo

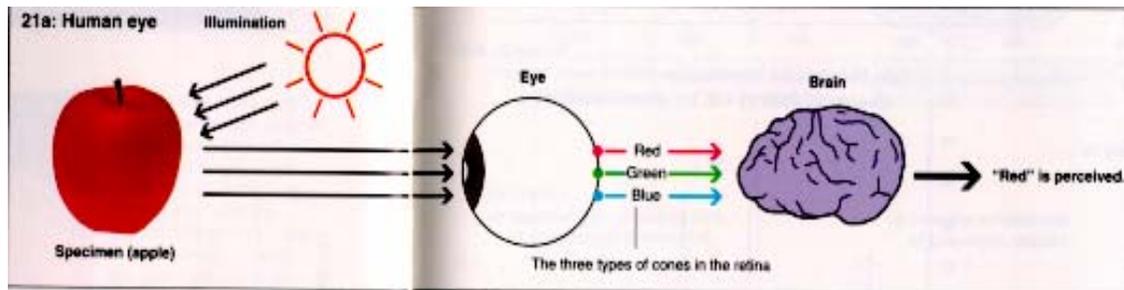


Fig. 3 Mecanismo de percepción humana de la radiación.

I.4.1 VISIÓN FOTÓPICA Y ESCOTÓPICA.

Como se mencionó en el párrafo anterior, existen dos tipos de elementos sensibles a la luz, los conos y los bastones. Los bastones son muy sensibles a intensidades luminosas muy bajas y son los responsables de la visión en la noche llamada visión escotópica, cuya máxima eficiencia luminosa es para la longitud de onda de 505 nm.

Los conos son menos sensibles a la luz que los bastones, y son los responsables de la visión del color de día o visión fotópica, donde la máxima eficiencia luminosa es en el color correspondiente a 555 nm. Existen tres clases de elementos sensibles al color: los conos-L para percibir longitudes de onda largas o luz roja, los conos-M para percibir longitudes de onda medias o luz verde, los conos-S para percibir longitudes de onda cortas o luz azul.

A niveles medios de iluminación intervienen tanto conos como bastones y es llamada visión mesóptica.

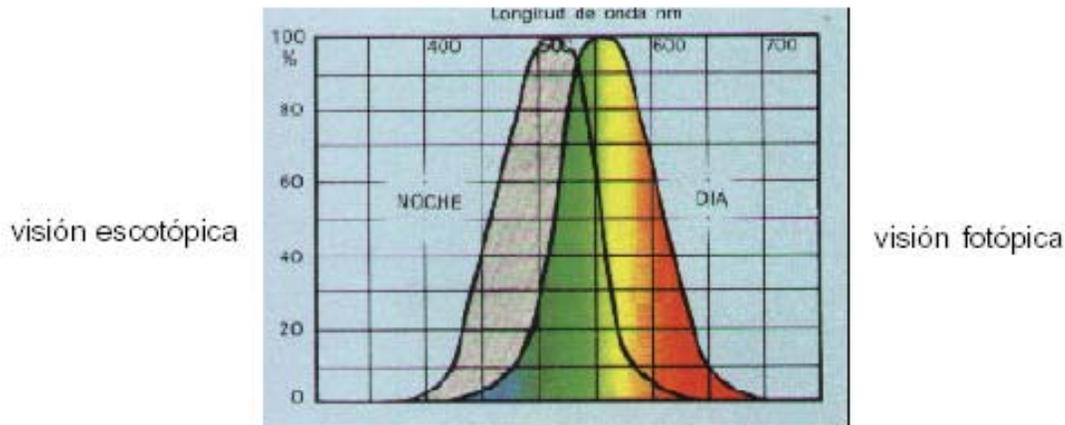


Fig. 4 Visión escotópica y fotópica

I.5 ILUMINANTES ESTÁNDARES

El color percibido de un objeto iluminado no depende únicamente de la reflectancia de éste, sino de la distribución espectral de la fuente de luz.

Fuentes de radiación e iluminantes son ligeramente diferentes conceptos. Desde un punto de vista formal, una fuente de radiación existe físicamente en la vida real. Por otro lado los iluminantes son descripciones matemáticas de fuentes de radiación ideales. Sin embargo algunas fuentes de radiación son diseñadas y construidas para simular los iluminantes; por lo que ambos términos se hacen casi equivalentes en muchos casos.

El principal uso de los iluminantes son los cálculos colorimétricos, las fuentes de radiación son necesarias para evaluaciones visuales del color.

A continuación se describen algunos iluminantes considerados de los más importantes en colorimetría y que han sido definidos por la CIE (Comisión Internacional de Iluminación).

Obviamente la fuente más importante de luz es la luz de día, desafortunadamente sus características espectrales varían con el tiempo, la localización geográfica y el clima. Una

atmósfera transparente o con nubes puede cambiar sus características espectrales en cuestión de minutos. Las temperaturas de color de la luz del día varían de cerca de 2000 K en la mañana, a cerca de 10,000 K en la tarde.

La luz natural del día es simulada por los iluminantes D. Estos iluminantes son definidos de tal manera que permiten calcular la distribución espectral de la luz de día en un amplio rango de temperaturas de color.

I.5.1 ILUMINANTE D65

El iluminante D65 representa la luz de día (incluyendo el ultravioleta) con una temperatura de color de 6504 K. Este iluminante debe ser usado para evaluar muestras que van a ser iluminadas con luz de día, incluyendo el ultravioleta, por ejemplo pinturas, textiles, plásticos. Fig. 5

I.5.2 ILUMINANTE D50

Representa la luz del día a una temperatura de color de 5000 K, y es usado en la industria de las artes gráficas y de las computadoras. Fig. 5

I.5.3 FUENTE C

Antes del desarrollo de los iluminantes D, la fuente C era usado para simular la luz de día, aunque no incluye la región ultravioleta, tiene una temperatura de color de 6774 K. En la actualidad no se recomienda usarlo debido a su deficiencia en la región ultravioleta, Fig. 5.

I.5.4 FUENTE A

Representa la luz incandescente, y es equivalente a la radiación de un cuerpo negro con una temperatura de color de 2856 K; su distribución espectral ha sido calculada por medio de la fórmula de Planck para la radiación. Este fuente debe se usada para medir o evaluar muestras que serán iluminadas con lámparas incandescentes.

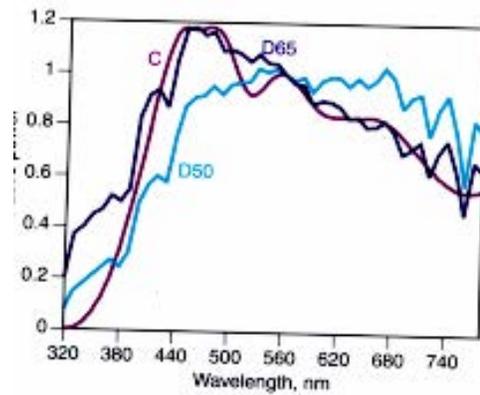


Fig. 5 Distribución espectral de los iluminantes D65, D50 y C

I.5.5 FUENTE B

Fue desarrollado como un intento para representar la luz directa del sol con una temperatura de color de aproximadamente 4874 K.

I.5.6 FUENTE F

La serie de iluminantes F, definen una categoría de lámparas fluorescentes incluyendo la lámpara de luz blanca fría (“cool white”), lámpara de luz blanca caliente (“warm white”), la lámpara de “espectro completo” y la lámpara de tres bandas. Ver Fig. 6.

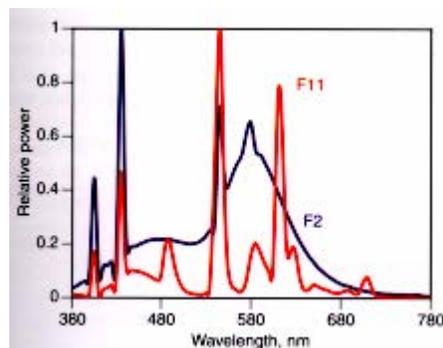


Fig. 6 Distribución espectral de los iluminantes F2 y F11

I.6 SISTEMAS DE ORDENACIÓN DE COLOR

Es práctica común describir el color en términos de rojo, verde o amarillo verdoso, etc. Esto no es suficiente para comunicar detalles completos sobre el color; por ejemplo, el amarillo verdoso no lleva implícito ningún significado de cuanto verde o cuanto amarillo tiene ese color. Por lo anterior fue necesario el desarrollo de métodos para describir el color con precisión, de modo que se pueda tener una correlación con la sensación de color que percibe el ojo humano. Esto ha ayudado a tratar el tema del color a largas distancias, en un lapso de tiempo, sin la necesidad de una muestra física verdadera. Los sistemas ideados para describir cuantitativamente el color reciben el nombre de sistemas (de ordenación) de color.

Los sistemas de color se pueden clasificar en dos grupos:

I.6.1 SISTEMAS DE ORDENACIÓN DE COLOR BASADOS EN LA PERCEPCIÓN DEL COLOR.

El sistema Munsell, el sistema Ostwald, el sistema natural del color, el sistema OSA-UCS (sistema de escalas de color uniforme) y muchos otros más se encuentran dentro de esta clase. Cada uno de estos sistemas está representado por su atlas de color, el cual contiene varios cartoncitos de colores, que están dispuestos en una configuración determinada y son identificados mediante nombre o números determinados.

- a) Sistema Munsell. Este sistema fue desarrollado por Munsell, quien dividió el espacio tridimensional del color en tono, valor y croma.

El tono de Munsell es lo que nosotros conocemos como color, rojo, amarillo, etc. Consta de 10 tonos principales acomodados en un círculo: rojo, amarillo-rojizo, amarillo, amarillo-verdoso, verde, azul-verdoso, azul, azul-púrpura, púrpura y rojo-púrpura.

El valor de Munsell es lo que normalmente conocemos como claridad y varía de negro en el fondo, que toma un valor de 0, a blanco arriba, con valor de 10.

El croma de Munsell tiene valor cero para el color neutro, y aumenta de 2 en 2, de tal forma que los colores mas saturados se encuentran en la periferia. En colores rojos y amarillos se llega a tener una saturación de hasta 14.

La notación de Munsell es definida como H V/C, donde H representa el tono, V es el valor y C es el croma.

I.6.2 SISTEMAS BASADOS EN LA IGUALACIÓN DEL COLOR O ESPACIOS DE COLOR.

En estos sistemas, las descripciones del color están basadas en la medición de la reflectancia espectral de la muestra. Los sistemas Hunter Lab, CIE L*a*b*, CIE LCh y otros se clasifican dentro de este sistema de color. Estos sistemas de color se utilizan en las medidas instrumentales del color.

Como se mencionó anteriormente, para percibir el color es necesario una fuente de luz, un objeto y un observador. En 1931 la CIE introdujo un sistema para cuantificar los colores en términos de números matemáticos. Para el desarrollo de dicho sistema, es necesario describir y cuantificar las fuentes estándares y el observador.

La CIE recomendó tres iluminantes estándares para realizar los cálculos de color, cuya distribución espectral ya era conocida, estas fuentes eran A, B, y C, descritos anteriormente en el presente apéndice.

En el sistema CIE un objeto se caracteriza por su reflectancia a diferentes longitudes de onda en una región espectral visible, con respecto a un difusor perfecto.

- a) Observador Estándar. Fue muy difícil definir un observador estándar que definiera la visión normal del color de la media de la población humana; se empleó un colorímetro visual para obtener resultados de igualar los colores del espectro utilizando tres primarios. Los colores del espectro pueden igualarse añadiendo

diferentes proporciones de los primarios. A los resultados de estos experimentos, conocidos como funciones de igualación de color, con los símbolos \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} , se les conoce como observador estándar 2° 1931.

Los datos del observador estándar 2° 1931 se prepararon usando sólo una región fóveal del ojo humano. En la práctica, en la apreciación visual del color, se usan áreas mayores de la superficie de la retina. Por esta razón, la CIE definió otro observador utilizando un ángulo de visión de 10° , conocido como observador 10° 1964. Se ha demostrado que los resultados de la valoración visual coinciden mejor con los resultados obtenidos con instrumentos de medición de color que usan los datos del observador 10° que los que usan los datos de 2° .

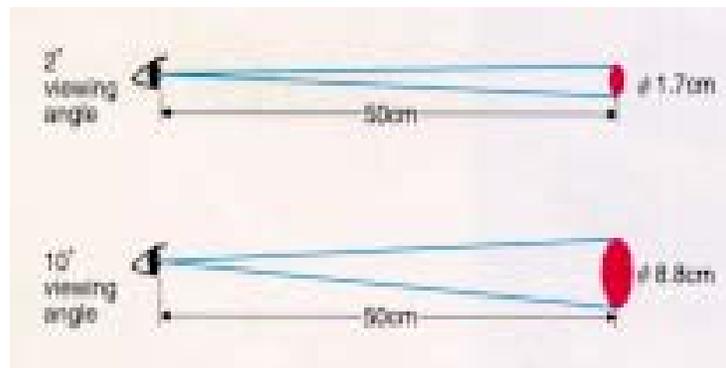


Fig. 7 Representación gráfica del observador estándar de 2° y 10° definidos por la CIE.

- b) Valores Triestímulos. Hasta el momento se ha descrito un método para expresar una fuente, un observador y un objeto en números. Estos componentes pueden combinarse de manera apropiada para describir el color de cualquier objeto. En 1931 la CIE propuso un método para reducir estos grupos de números a tres números, llamados valores triestímulos X, Y, Z. Estos valores son la sumatoria de la multiplicación de la distribución espectral del iluminante, la reflectancia del objeto y las funciones de igualación del ojo, en el intervalo visible del espectro.

$$X = k \sum PRx \quad (I.1)$$

$$Y = k \sum PRy \quad (I.2)$$

$$Z = k \sum PRz \quad (I.3)$$

Los valores triestímulos CIE X,Y,Z, únicamente definen el color en números y aunque lo describen con precisión, no dan ninguna información sobre su aspecto.

- c) **Coordenadas de Cromaticidad.** Para describir el color en una gráfica de dos dimensiones, la CIE definió las coordenadas de cromaticidad; que proporcionan alguna información sobre el tono y la saturación del color. Las coordenadas de cromaticidad vienen definidas por las ecuaciones sig:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (I.4)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (I.5)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (I.6)$$

La suma de las tres coordenadas de cromaticidad es igual a 1; por lo que la tercera puede determinarse si se conocen dos. En la práctica sólo se trazan las coordenadas x, y, dando como resultado una gráfica conocida como Diagrama de Cromaticidad, representado en la Fig. 8, con los colores espectralmente puros representados sobre el borde de la curva; La línea recta que une los extremos de esta curva representa los colores púrpura, formados por la combinación de diferentes proporciones del rojo con el azul. En este diagrama no puede ser representada la luminosidad, solo se representa la saturación y el tono de color. Así las coordenadas $x = 0.33$ e $y = 0.33$ que representan el blanco, pueden representar además el negro y la gama de grises.

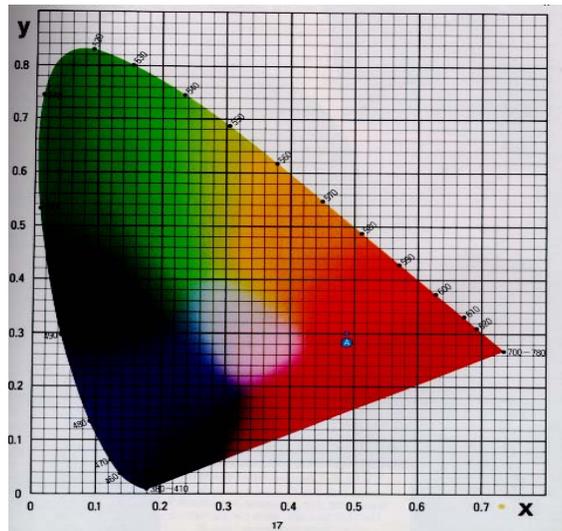


Fig. 8 Diagrama de Cromaticidad 1931

- b) Sistema de Color CIELAB. En 1976, la CIE recomendó el espacio de color CIEL*a*b* o CIELAB, en la actualidad es el método más usado para medir y controlar el color, principalmente en las industrias textiles, del plástico y de pinturas. El espacio de color CIELAB puede ser visualizado como un espacio tridimensional, donde cada color puede ser localizado. La luminancia es representada por L^* y tiene valores de 0 para el negro y 100 para el blanco perfecto. La coordenada a^* representa el eje rojo-verde, el a^* positivo representa la cantidad de rojo y el a^* negativo la cantidad de verde. Del mismo modo la coordenada b^* representa el eje amarillo-azul, b^* positivo indica la cantidad de amarillo y el b^* negativo la cantidad de azul. Ver Fig. 9.

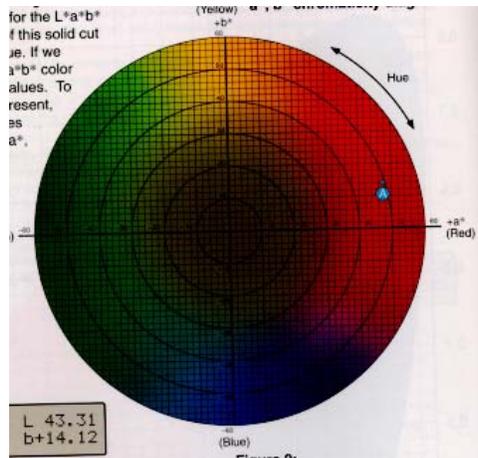


Fig. 9 Espacio de color CIEL*a*b*

Las coordenadas de color CIEL*a*b* se calculan a partir de los valores triestímulos de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$L^* = 116 \left(\sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} \right) - 16 \quad (I.7)$$

$$a^* = 500 \left[\left(\sqrt[3]{\frac{X}{X_n}} \right) - \left(\sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} \right) \right] \quad (I.8)$$

$$b^* = 200 \left[\left(\sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} \right) - \left(\sqrt[3]{\frac{Z}{Z_n}} \right) \right] \quad (I.9)$$

Donde:

X, Y, Z: Son los valores triestímulos de la muestra

Xn, Yn, Zn: Son los valores triestímulos del blanco de referencia

Y la diferencia total del color se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (\text{I.10})$$

Donde:

ΔL^* , Δa^* , Δb^* : Son las diferencias individuales entre el color de la muestra y el color del estándar.

El color puede además ser descrito y localizado en el espacio CIELAB usando un método alternativo, como son las coordenadas L^*C^*h . En este método L^* es la luminosidad, como en $L^*a^*b^*$, mientras que C^* , que representa el croma, y h^0 , que representa el tono y es expresado en grados, son obtenidas a partir de las coordenadas a^* y b^* usando las siguientes ecuaciones:

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (\text{I.11})$$

$$h = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (\text{I.12})$$

El espacio de color L^*C^*h es tridimensional y el color es localizado usando coordenadas cilíndricas. Ver Fig. 10.

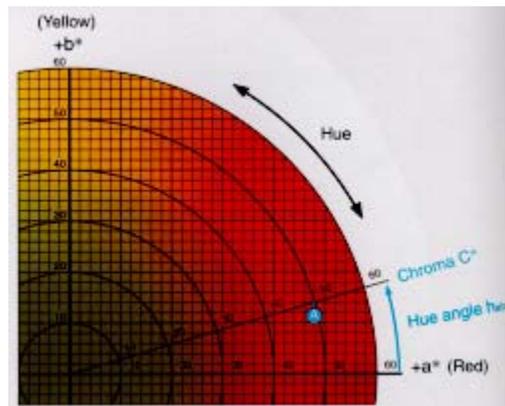


Fig. 10 Espacio de color CIEL*C*h.

I.7 MEDICIÓN DE COLOR

La medición de color es un tema muy importante, con aplicaciones en muchos tipos de actividades industriales, principalmente en la industria textil, papel, cuero, artes gráficas , etc.

El objetivo de la medición instrumental del color es estimar lo que un observador ve. Existen varios instrumentos que pueden estimar lo que el observador ve, usando la colorimetría o la metodología definida por la CIE.

Entre estos equipos se encuentran los sig:

Colorímetro: Instrumento usado para medir directamente cantidades colorimétricas.

Espectrómetro: Es un instrumento para medir una propiedad óptica específica en función de la longitud de onda

Espectrofotómetro: Es un espectrómetro diseñado para medir reflectancia o transmitancia espectral.

I.7.1 GEOMETRÍA DE MEDICIÓN.

Cuando la luz interactúa con un objeto, una porción de aquella es reflejada, ya sea especularmente, siguiendo la ley de la reflexión, o difusamente; transmitida regular o difusamente y absorbida. La combinación de cada uno de estos componentes depende de las propiedades de la fuente de luz, el material y su interacción geométrica.

Cuando se mide el color de un objeto, es muy importante que se mida solo la luz reflejada difusamente, que es la que define el color del objeto, y no la luz reflejada especularmente, que define el brillo de la muestra. La luz reflejada especularmente puede evitarse usando una iluminación asimétrica.

Geometrías estándares de medición recomendadas por la CIE:

45/0. La muestra es iluminada a 45 de su normal y observada sobre ésta. Fig.11

0/45. La muestra es iluminada sobre su normal y observada a 45. Fig. 11.

d/0. La muestra es iluminada difusamente y observada sobre su normal. Fig. 12.

0/d. La muestra es iluminada sobre su normal y observada difusamente. Fig.12

D/8. La muestra es iluminada difusamente y observada a 8° de su normal. Fig.13.

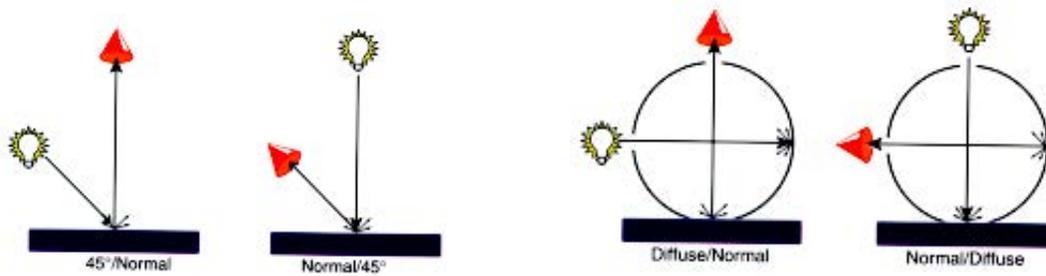


Fig. 11 Geometría de medición 45/0 y 0/45 Fig. 12 Geometría de medición d/0 y 0/d

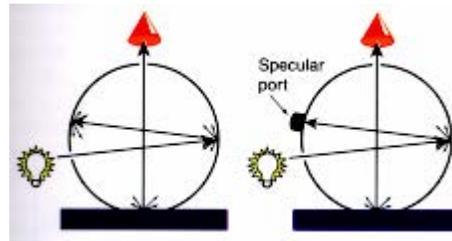


Fig. 13 Geometría d/8

I.7.2 MÉTODO ESPECTROFOTOMÉTRICO DE MEDICIÓN DE COLOR.

El espectrofotómetro es un instrumento que mide la reflectancia o transmitancia de un objeto en función de su longitud de onda. Además de la medición del color, son usados en muchas otras aplicaciones. Los equipos usados sólo para la medición del color tienen un ancho de longitud de onda de 380 a 750 nm, ver Fig.14.

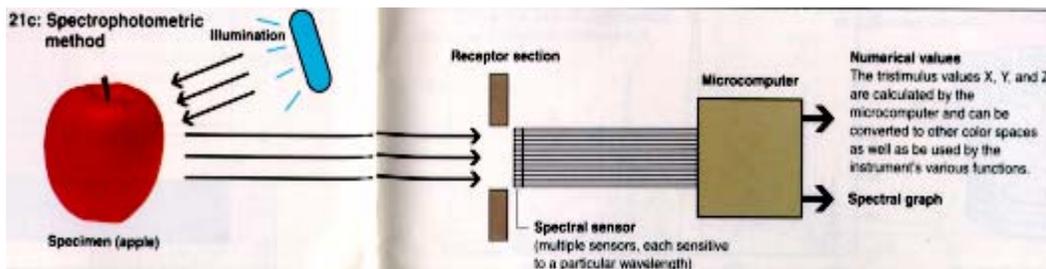


Fig. 14 Método espectrofotométrico de medición de color.

Los principales componentes de un espectrofotómetro para medición del color son: la fuente de radiación, un sistema óptico para definir las condiciones de medición, algunos medios para dispersar la luz, el detector y el sistema de procesador de señales que convierte la luz en señales útiles para su análisis.

I.7.3 COLORÍMETRO

El colorímetro es un instrumento que mide directamente coordenadas de color. Su principio se basa en que la luz que requiere medirse, es simultáneamente colectada por tres sistemas de detección, cada uno con sensibilidades espectrales iguales a cada una de las funciones de igualación de color del observador estándar definido por la CIE, es decir, la respuesta del sistema de detección es idéntico al observador estándar, ver Fig. 15.

Existen dos tipos de colorímetros, los diseñados para medir fuentes de radiación y los diseñados para medir materiales. El colorímetro para medir materiales es diseñado para simular iluminantes recomendados por la CIE, usualmente el iluminante C o D65, la mayoría usa geometría 45/0.

El sistema de detección consiste de un filtro de vidrio coloreado y un fotodetector, usualmente un fotodiodo de silicón. El conocimiento de la sensibilidad espectral del detector permite calcular las características de transmitancia del filtro.

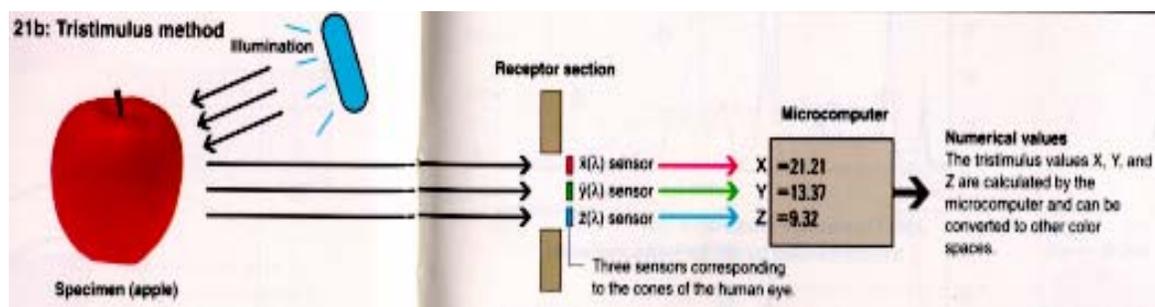


Fig. 15 Método colorimétrico de medición de color.

I.8 BIBLIOGRAFÍA

1. Malacara Daniel, Óptica Básica, capítulo 7, 22 y 23, Fondo de Cultura Económica, 1989
2. Günter Wyszecki, W.S.Stiles, Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae, Capítulo 1, 2, 3 y 4, John Wiley & Sons, 1982
3. Malacara Daniel, Color Vision and Colorimetry Theory and Applications, Capítulo 1, 2, 7 y 8 SPIE, 2002
4. S. Berns Roy, Principles of Color Technology, Capítulo 1, 2 y 3, John Wiley & Sons, 2000
5. Shah H.S. y Gandhi R.S. Instrumental Color Measurements and Computer Aided Color Matching for Textiles. Versión en español Medida e Igualación del Color, Traducido por Amparo Marín Escalera, capítulo 1 y 2 AIDO, 1993
6. Minolta, "Precise Color Communication"
7. http://www.datacolor.com/color_experts.shtml

APÉNDICE II

RESULTADOS INDIVIDUALES DE LAS MUESTRAS IRRADIADAS CON LÁSER DE Nd:YAG.

a) Reflectancia. Enseguida se anexa el gran promedio de los valores de reflectancia de las muestras irradiadas con diferente número de pulsos.

λ (nm)	Ref.	1 pulso	2 pulsos	3 pulsos	4 pulsos	5 pulsos	6 pulsos	7 pulsos	8 pulsos
360	2.369	2.568	2.507	2.515	2.462	2.588	2.541	2.516	2.462
370	2.446	2.674	2.617	2.620	2.570	2.697	2.638	2.615	2.554
380	3.106	3.371	3.304	3.305	3.246	3.397	3.331	3.292	3.215
390	4.889	5.120	5.030	5.019	4.942	5.139	5.066	4.997	4.873
400	7.842	8.006	7.868	7.838	7.735	8.001	7.917	7.795	7.596
410	10.916	10.974	10.784	10.734	10.607	10.942	10.845	10.668	10.386
420	12.567	12.518	12.295	12.243	12.100	12.476	12.373	12.168	11.841
430	15.199	15.054	14.776	14.720	14.553	14.984	14.866	14.611	14.212
440	20.036	19.824	19.445	19.377	19.161	19.684	19.558	19.200	18.661
450	23.407	23.099	22.655	22.588	22.342	22.934	22.805	22.379	21.751
460	23.755	23.382	22.925	22.870	22.629	23.229	23.094	22.670	22.039
470	22.856	22.425	21.976	21.931	21.702	22.298	22.156	21.759	21.161
480	20.724	20.297	19.876	19.830	19.625	20.182	20.030	19.680	19.153
490	18.438	17.997	17.609	17.567	17.389	17.900	17.745	17.442	16.992
500	15.980	15.552	15.207	15.159	15.004	15.464	15.317	15.056	14.684
510	12.910	12.519	12.229	12.177	12.050	12.443	12.305	12.095	11.820
520	9.755	9.403	9.175	9.118	9.017	9.336	9.217	9.059	8.871
530	7.225	6.912	6.736	6.679	6.597	6.860	6.758	6.640	6.517
540	5.246	5.035	4.900	4.851	4.785	4.996	4.910	4.825	4.747
550	3.690	3.593	3.490	3.455	3.397	3.571	3.499	3.440	3.387
560	2.713	2.708	2.628	2.608	2.553	2.703	2.640	2.599	2.558
570	2.219	2.298	2.231	2.217	2.164	2.302	2.242	2.213	2.176
580	2.003	2.121	2.061	2.053	2.001	2.134	2.076	2.051	2.015
590	1.879	2.025	1.970	1.964	1.912	2.043	1.985	1.965	1.929
600	1.801	1.976	1.922	1.921	1.870	1.999	1.942	1.922	1.888
610	1.759	1.946	1.894	1.893	1.841	1.972	1.913	1.894	1.860
620	1.750	1.945	1.895	1.895	1.843	1.971	1.913	1.897	1.862
630	1.747	1.949	1.900	1.901	1.848	1.978	1.920	1.903	1.868
640	1.738	1.948	1.899	1.900	1.848	1.977	1.918	1.902	1.866
650	1.744	1.960	1.911	1.912	1.861	1.991	1.932	1.916	1.879
660	1.755	1.981	1.932	1.932	1.882	2.014	1.954	1.936	1.899
670	1.752	1.969	1.921	1.921	1.870	2.002	1.942	1.925	1.888
680	1.719	1.947	1.899	1.900	1.848	1.979	1.918	1.901	1.865

690	1.702	1.937	1.889	1.890	1.839	1.972	1.911	1.895	1.858
700	1.730	1.958	1.911	1.913	1.861	1.993	1.932	1.916	1.879
710	1.803	2.050	2.002	2.004	1.952	2.085	2.027	2.010	1.972
720	1.983	2.246	2.195	2.200	2.145	2.285	2.224	2.204	2.162
730	2.264	2.543	2.489	2.493	2.434	2.584	2.522	2.498	2.449
740	3.031	3.354	3.287	3.289	3.223	3.396	3.323	3.289	3.225
750	5.417	5.881	5.766	5.751	5.671	5.898	5.804	5.732	5.623

b) Valores individuales de los parámetros de color. Enseguida se listan los valores individuales de los parámetros de color. Cabe mencionar que la comparación se realizó tomando la media de las mediciones de la referencia.

Muestra	L*	a*	b*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*	Cambio de Color en Escala de Grises
Ref.	31.12	-9.151	-35.464					
Ref.	31.095	-9.106	-35.429					
Ref.	30.988	-8.985	-35.407					
Ref.	30.942	-9.061	-35.531					
Ref.	30.937	-9.011	-35.589					
Media Ref.	31.016	-9.063	-35.484					
1 pulso	30.933	-7.551	-35.805	-0.083	1.512	-0.321	1.548	4
1 pulso	30.908	-7.558	-35.646	-0.108	1.505	-0.162	1.517	4
1 pulso	30.893	-7.586	-35.856	-0.123	1.477	-0.372	1.528	4
1 pulso	30.859	-7.534	-35.857	-0.157	1.529	-0.373	1.581	4
1 pulso	30.752	-7.571	-35.765	-0.264	1.492	-0.281	1.541	4
1 pulso	30.786	-7.707	-35.747	-0.230	1.356	-0.263	1.400	4
1 pulso	30.749	-7.685	-35.74	-0.267	1.378	-0.256	1.427	4
1 pulso	30.677	-7.674	-35.734	-0.339	1.389	-0.250	1.451	4
1 pulso	30.666	-7.718	-35.747	-0.350	1.345	-0.263	1.414	4
1 pulso	30.616	-7.62	-35.773	-0.400	1.443	-0.289	1.525	4
1 pulso	30.872	-7.596	-35.683	-0.144	1.467	-0.199	1.487	4
1 pulso	30.857	-7.526	-35.626	-0.159	1.537	-0.142	1.552	4
1 pulso	30.852	-7.613	-35.699	-0.164	1.450	-0.215	1.475	4
1 pulso	30.843	-7.442	-35.809	-0.173	1.621	-0.325	1.662	4
1 pulso	30.837	-7.537	-35.651	-0.179	1.526	-0.167	1.545	4
1 pulso	30.809	-7.684	-35.312	-0.207	1.379	0.172	1.405	4
1 pulso	30.782	-7.73	-35.559	-0.234	1.333	-0.075	1.355	4
1 pulso	30.757	-7.723	-35.579	-0.259	1.340	-0.095	1.368	4
1 pulso	30.73	-7.626	-35.502	-0.286	1.437	-0.018	1.465	4
1 pulso	30.726	-7.659	-35.601	-0.290	1.404	-0.117	1.438	4
2 pulsos	30.474	-7.516	-35.798	-0.542	1.547	-0.314	1.669	4
2 pulsos	30.429	-7.538	-35.844	-0.587	1.525	-0.360	1.673	4
2 pulsos	30.423	-7.524	-35.739	-0.593	1.539	-0.255	1.669	4
2 pulsos	30.415	-7.392	-35.69	-0.601	1.671	-0.206	1.788	4

Muestra	L*	a*	b*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*	Cambio de Color en Escala de Grises
2 pulsos	30.302	-7.538	-35.603	-0.714	1.525	-0.119	1.688	4
2 pulsos	30.369	-7.571	-35.558	-0.647	1.492	-0.074	1.628	4
2 pulsos	30.361	-7.522	-35.639	-0.655	1.541	-0.155	1.682	4
2 pulsos	30.35	-7.631	-35.467	-0.666	1.432	0.017	1.579	4
2 pulsos	30.303	-7.482	-35.547	-0.713	1.581	-0.063	1.735	4
2 pulsos	30.292	-7.505	-35.602	-0.724	1.558	-0.118	1.722	4
2 pulsos	30.483	-7.489	-35.463	-0.533	1.574	0.021	1.662	4
2 pulsos	30.477	-7.345	-35.417	-0.539	1.718	0.067	1.802	4
2 pulsos	30.456	-7.432	-35.522	-0.560	1.631	-0.038	1.725	4
2 pulsos	30.451	-7.392	-35.49	-0.565	1.671	-0.006	1.764	4
2 pulsos	30.445	-7.564	-35.332	-0.571	1.499	0.152	1.611	4
2 pulsos	30.456	-7.482	-35.331	-0.560	1.581	0.153	1.684	4
2 pulsos	30.447	-7.397	-35.449	-0.569	1.666	0.035	1.761	4
2 pulsos	30.356	-7.377	-35.375	-0.660	1.686	0.109	1.814	4
2 pulsos	30.336	-7.415	-35.296	-0.680	1.648	0.188	1.793	4
2 pulsos	30.319	-7.543	-35.344	-0.697	1.520	0.140	1.678	4
3 pulsos	30.424	-7.319	-35.787	-0.592	1.744	-0.303	1.866	4
3 pulsos	30.391	-7.361	-35.771	-0.625	1.702	-0.287	1.836	4
3 pulsos	30.381	-7.305	-35.733	-0.635	1.758	-0.249	1.886	4
3 pulsos	30.345	-7.392	-35.786	-0.671	1.671	-0.302	1.826	4
3 pulsos	30.3	-7.291	-35.793	-0.716	1.772	-0.309	1.936	4
3 pulsos	30.245	-7.331	-35.505	-0.771	1.732	-0.021	1.896	4
3 pulsos	30.204	-7.457	-35.507	-0.812	1.606	-0.023	1.800	4
3 pulsos	30.165	-7.445	-35.5	-0.851	1.618	-0.016	1.828	4
3 pulsos	30.108	-7.502	-35.457	-0.908	1.561	0.027	1.806	4
3 pulsos	30.067	-7.482	-35.432	-0.949	1.581	0.052	1.845	4
3 pulsos	30.432	-7.284	-35.536	-0.584	1.779	-0.052	1.873	4
3 pulsos	30.428	-7.279	-35.538	-0.588	1.784	-0.054	1.879	4
3 pulsos	30.422	-7.329	-35.517	-0.594	1.734	-0.033	1.833	4
3 pulsos	30.401	-7.689	-35.359	-0.615	1.374	0.125	1.511	4
3 pulsos	30.375	-7.309	-35.433	-0.641	1.754	0.051	1.868	4
3 pulsos	30.492	-7.435	-35.552	-0.524	1.628	-0.068	1.712	4
3 pulsos	30.472	-7.352	-35.481	-0.544	1.711	0.003	1.795	4
3 pulsos	30.358	-7.52	-35.391	-0.658	1.543	0.093	1.680	4
3 pulsos	30.247	-7.405	-35.371	-0.769	1.658	0.113	1.831	4
3 pulsos	30.233	-7.479	-35.295	-0.783	1.584	0.189	1.777	4
4 pulsos	30.31	-7.437	-35.602	-0.706	1.626	-0.118	1.777	4
4 pulsos	30.179	-7.457	-35.602	-0.837	1.606	-0.118	1.815	4
4 pulsos	30.093	-7.442	-35.444	-0.923	1.621	0.040	1.866	4
4 pulsos	30.089	-7.439	-35.556	-0.927	1.624	-0.072	1.871	4
4 pulsos	30.023	-7.406	-35.563	-0.993	1.657	-0.079	1.933	4
4 pulsos	30.097	-7.534	-35.431	-0.919	1.529	0.053	1.785	4
4 pulsos	30.067	-7.515	-35.466	-0.949	1.548	0.018	1.816	4
4 pulsos	30.02	-7.489	-35.528	-0.996	1.574	-0.044	1.863	4
4 pulsos	30.013	-7.533	-35.315	-1.003	1.530	0.169	1.837	4
4 pulsos	29.947	-7.495	-35.729	-1.069	1.568	-0.245	1.914	4

Muestra	L*	a*	b*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*	Cambio de Color en Escala de Grises
4 pulsos	30.179	-7.413	-35.564	-0.837	1.650	-0.080	1.852	4
4 pulsos	30.062	-7.39	-35.495	-0.954	1.673	-0.011	1.926	4
4 pulsos	30.056	-7.38	-35.5	-0.960	1.683	-0.016	1.938	4
4 pulsos	30.036	-7.371	-35.419	-0.980	1.692	0.065	1.956	4
4 pulsos	30.013	-7.386	-35.431	-1.003	1.677	0.053	1.955	4
4 pulsos	30.319	-7.448	-35.519	-0.697	1.615	-0.035	1.759	4
4 pulsos	30.258	-7.504	-35.319	-0.758	1.559	0.165	1.741	4
4 pulsos	30.246	-7.477	-35.565	-0.770	1.586	-0.081	1.765	4
4 pulsos	30.169	-7.659	-35.179	-0.847	1.404	0.305	1.668	4
4 pulsos	30.16	-7.387	-35.335	-0.856	1.676	0.149	1.888	4
5 pulsos	30.878	-7.461	-35.787	-0.138	1.602	-0.303	1.636	4
5 pulsos	30.824	-7.439	-35.756	-0.192	1.624	-0.272	1.658	4
5 pulsos	30.713	-7.432	-35.755	-0.303	1.631	-0.271	1.681	4
5 pulsos	30.601	-7.464	-35.703	-0.415	1.599	-0.219	1.666	4
5 pulsos	30.529	-7.468	-35.698	-0.487	1.595	-0.214	1.681	4
5 pulsos	30.84	-7.497	-35.218	-0.176	1.566	0.266	1.598	4
5 pulsos	30.789	-7.532	-35.349	-0.227	1.531	0.135	1.553	4
5 pulsos	30.669	-7.486	-35.46	-0.347	1.577	0.024	1.615	4
5 pulsos	30.647	-7.487	-35.449	-0.369	1.576	0.035	1.619	4
5 pulsos	30.557	-7.445	-35.582	-0.459	1.618	-0.098	1.685	4
5 pulsos	30.714	-7.479	-35.537	-0.302	1.584	-0.053	1.613	4
5 pulsos	30.712	-7.528	-35.53	-0.304	1.535	-0.046	1.565	4
5 pulsos	30.708	-7.54	-35.471	-0.308	1.523	0.013	1.554	4
5 pulsos	30.696	-7.583	-35.556	-0.320	1.480	-0.072	1.516	4
5 pulsos	30.686	-7.537	-35.518	-0.330	1.526	-0.034	1.562	4
5 pulsos	30.806	-7.844	-35.377	-0.210	1.219	0.107	1.241	4
5 pulsos	30.709	-7.733	-35.41	-0.307	1.330	0.074	1.367	4
5 pulsos	30.663	-7.503	-35.49	-0.353	1.560	-0.006	1.599	4
5 pulsos	30.648	-7.499	-35.422	-0.368	1.564	0.062	1.608	4
5 pulsos	30.625	-7.488	-35.416	-0.391	1.575	0.068	1.624	4
6 pulsos	30.539	-7.43	-35.761	-0.477	1.633	-0.277	1.724	4
6 pulsos	30.51	-7.42	-35.754	-0.506	1.643	-0.270	1.740	4
6 pulsos	30.496	-7.48	-35.778	-0.520	1.583	-0.294	1.692	4
6 pulsos	30.479	-7.375	-35.805	-0.537	1.688	-0.321	1.800	4
6 pulsos	30.47	-7.501	-35.687	-0.546	1.562	-0.203	1.667	4
6 pulsos	30.51	-7.455	-35.622	-0.506	1.608	-0.138	1.691	4
6 pulsos	30.497	-7.487	-35.696	-0.519	1.576	-0.212	1.673	4
6 pulsos	30.486	-7.46	-35.763	-0.530	1.603	-0.279	1.711	4
6 pulsos	30.338	-7.337	-35.673	-0.678	1.726	-0.189	1.864	4
6 pulsos	30.239	-7.397	-35.571	-0.777	1.666	-0.087	1.840	4
6 pulsos	30.573	-7.477	-35.611	-0.443	1.586	-0.127	1.652	4
6 pulsos	30.544	-7.463	-35.553	-0.472	1.600	-0.069	1.670	4
6 pulsos	30.53	-7.447	-35.543	-0.486	1.616	-0.059	1.688	4
6 pulsos	30.487	-7.474	-35.575	-0.529	1.589	-0.091	1.677	4
6 pulsos	30.451	-7.361	-35.547	-0.565	1.702	-0.063	1.794	4
6 pulsos	30.552	-7.486	-35.61	-0.464	1.577	-0.126	1.649	4

Muestra	L*	a*	b*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*	Cambio de Color en Escala de Grises
6 pulsos	30.548	-7.427	-35.553	-0.468	1.636	-0.069	1.703	4
6 pulsos	30.537	-7.544	-35.581	-0.479	1.519	-0.097	1.596	4
6 pulsos	30.518	-7.554	-35.287	-0.498	1.509	0.197	1.601	4
6 pulsos	30.512	-7.545	-35.608	-0.504	1.518	-0.124	1.604	4
7 pulsos	30.328	-7.234	-35.3	-0.688	1.829	0.184	1.963	4
7 pulsos	30.211	-7.416	-35.591	-0.805	1.647	-0.107	1.836	4
7 pulsos	30.202	-7.266	-35.378	-0.814	1.797	0.106	1.976	4
7 pulsos	30.196	-7.307	-35.394	-0.820	1.756	0.090	1.940	4
7 pulsos	30.19	-7.47	-35.403	-0.826	1.593	0.081	1.796	4
7 pulsos	30.287	-7.433	-35.297	-0.729	1.630	0.187	1.795	4
7 pulsos	30.284	-7.392	-35.376	-0.732	1.671	0.108	1.827	4
7 pulsos	30.23	-7.42	-35.322	-0.786	1.643	0.162	1.829	4
7 pulsos	30.193	-7.403	-35.584	-0.823	1.660	-0.100	1.856	4
7 pulsos	30.133	-7.376	-35.478	-0.883	1.687	0.006	1.904	4
7 pulsos	30.366	-7.467	-35.584	-0.650	1.596	-0.100	1.726	4
7 pulsos	30.226	-7.501	-35.237	-0.790	1.562	0.247	1.768	4
7 pulsos	30.193	-7.347	-35.452	-0.823	1.716	0.032	1.903	4
7 pulsos	30.185	-7.388	-35.226	-0.831	1.675	0.258	1.888	4
7 pulsos	30.179	-7.378	-35.257	-0.837	1.685	0.227	1.895	4
7 pulsos	30.378	-7.485	-35.621	-0.638	1.578	-0.137	1.708	4
7 pulsos	30.293	-7.394	-35.177	-0.723	1.669	0.307	1.845	4
7 pulsos	30.226	-7.39	-35.445	-0.790	1.673	0.039	1.851	4
7 pulsos	30.195	-7.406	-35.227	-0.821	1.657	0.257	1.867	4
7 pulsos	30.17	-7.39	-35.135	-0.846	1.673	0.349	1.907	4
8 pulsos	29.864	-7.469	-34.799	-1.152	1.594	0.685	2.083	3-4
8 pulsos	29.856	-7.423	-34.732	-1.160	1.640	0.752	2.145	3-4
8 pulsos	29.808	-7.333	-35.376	-1.208	1.730	0.108	2.113	3-4
8 pulsos	29.799	-7.425	-34.633	-1.217	1.638	0.851	2.211	3-4
8 pulsos	29.778	-7.412	-34.924	-1.238	1.651	0.560	2.138	3-4
8 pulsos	30.032	-7.722	-34.714	-0.984	1.341	0.770	1.833	4
8 pulsos	29.872	-7.475	-34.647	-1.144	1.588	0.837	2.129	3-4
8 pulsos	29.865	-7.336	-34.937	-1.151	1.727	0.547	2.146	3-4
8 pulsos	29.817	-7.538	-34.861	-1.199	1.525	0.623	2.038	3-4
8 pulsos	29.687	-7.476	-34.962	-1.329	1.587	0.522	2.135	3-4
8 pulsos	30.014	-7.605	-34.918	-1.002	1.458	0.566	1.858	4
8 pulsos	29.967	-7.41	-34.983	-1.049	1.653	0.501	2.021	3-4
8 pulsos	29.943	-7.433	-34.918	-1.073	1.630	0.566	2.032	3-4
8 pulsos	29.926	-7.355	-35.058	-1.090	1.708	0.426	2.071	3-4
8 pulsos	29.883	-7.484	-34.817	-1.133	1.579	0.667	2.055	3-4
8 pulsos	30.189	-7.445	-35.324	-0.827	1.618	0.160	1.824	4
8 pulsos	30.034	-7.392	-35.05	-0.982	1.671	0.434	1.986	4
8 pulsos	29.821	-7.488	-34.894	-1.195	1.575	0.590	2.063	3-4
8 pulsos	29.814	-7.488	-34.642	-1.202	1.575	0.842	2.153	3-4
8 pulsos	29.809	-7.52	-34.866	-1.207	1.543	0.618	2.054	3-4

APÉNDICE III

RESULTADOS INDIVIDUALES DE LAS MUESTRAS IRRADIADAS CON LÁSER DE Ho:YAG.

a) Reflectancia. Enseguida se anexa el gran promedio de los valores de reflectancia de las muestras irradiadas con diferente número de pulsos.

λ (nm)	Rey -13	1 pulso	2 pulsos	3 pulsos	4 pulsos	5 pulsos	6 pulsos	7 pulsos	8 pulsos
360	2.330	2.482	2.476	2.480	2.461	2.479	2.476	2.424	2.443
370	2.416	2.579	2.575	2.590	2.563	2.569	2.573	2.518	2.536
380	3.057	3.247	3.246	3.256	3.232	3.247	3.240	3.176	3.195
390	4.821	5.008	5.011	5.008	4.980	5.012	4.995	4.899	4.914
400	7.736	7.959	7.954	7.943	7.898	7.967	7.935	7.773	7.792
410	10.762	10.999	10.991	10.953	10.901	11.018	10.973	10.736	10.753
420	12.386	12.600	12.591	12.531	12.476	12.626	12.571	12.288	12.308
430	14.988	15.202	15.191	15.104	15.039	15.239	15.173	14.819	14.835
440	19.828	20.086	20.078	19.936	19.846	20.148	20.070	19.591	19.598
450	23.180	23.366	23.363	23.177	23.076	23.456	23.366	22.802	22.807
460	23.519	23.647	23.652	23.458	23.360	23.744	23.649	23.074	23.082
470	22.609	22.754	22.762	22.585	22.481	22.845	22.756	22.193	22.208
480	20.467	20.606	20.615	20.449	20.357	20.676	20.589	20.073	20.093
490	18.179	18.352	18.362	18.225	18.142	18.412	18.329	17.860	17.892
500	15.716	15.908	15.916	15.805	15.738	15.953	15.879	15.477	15.509
510	12.650	12.861	12.865	12.787	12.736	12.886	12.825	12.499	12.540
520	9.508	9.714	9.723	9.668	9.634	9.722	9.670	9.440	9.478
530	7.004	7.206	7.213	7.182	7.156	7.203	7.166	7.001	7.042
540	5.056	5.264	5.273	5.254	5.237	5.255	5.233	5.123	5.160
550	3.555	3.748	3.756	3.747	3.734	3.738	3.727	3.656	3.686
560	2.617	2.794	2.798	2.798	2.785	2.784	2.778	2.730	2.756
570	2.152	2.329	2.336	2.336	2.326	2.324	2.320	2.281	2.307
580	1.948	2.121	2.127	2.133	2.123	2.122	2.117	2.083	2.108
590	1.843	2.015	2.020	2.029	2.016	2.015	2.013	1.981	2.003
600	1.768	1.949	1.952	1.969	1.953	1.953	1.948	1.920	1.939
610	1.736	1.909	1.911	1.929	1.911	1.909	1.904	1.880	1.899
620	1.727	1.899	1.904	1.922	1.901	1.902	1.895	1.870	1.891
630	1.729	1.885	1.889	1.906	1.886	1.887	1.881	1.853	1.874
640	1.717	1.881	1.885	1.908	1.884	1.884	1.877	1.851	1.874
650	1.728	1.894	1.898	1.918	1.897	1.897	1.891	1.862	1.886
660	1.739	1.915	1.915	1.939	1.915	1.920	1.909	1.881	1.906
670	1.737	1.899	1.902	1.920	1.901	1.903	1.890	1.867	1.890
680	1.705	1.876	1.879	1.902	1.881	1.882	1.871	1.846	1.872
690	1.688	1.872	1.875	1.900	1.878	1.879	1.866	1.844	1.871
700	1.718	1.883	1.886	1.908	1.889	1.889	1.880	1.858	1.884
710	1.796	1.976	1.979	2.002	1.980	1.984	1.975	1.950	1.978

720	1.978	2.157	2.160	2.185	2.163	2.168	2.159	2.127	2.158
730	2.260	2.438	2.442	2.465	2.441	2.451	2.440	2.404	2.434
740	3.034	3.260	3.265	3.289	3.260	3.278	3.265	3.214	3.245
750	5.432	5.849	5.857	5.881	5.833	5.884	5.854	5.773	5.795

λ (nm)	9 pulsos	10 pulsos	11 pulsos	12 pulsos	13 pulsos	14 pulsos	15 pulsos	16 pulsos
360	2.522	2.470	2.455	2.422	2.496	2.459	2.437	2.422
370	2.617	2.564	2.556	2.520	2.596	2.563	2.535	2.519
380	3.297	3.233	3.219	3.185	3.281	3.232	3.201	3.184
390	5.082	4.993	4.979	4.928	5.072	4.989	4.946	4.918
400	8.083	7.942	7.919	7.851	8.068	7.943	7.868	7.825
410	11.178	10.993	10.949	10.865	11.164	10.988	10.890	10.822
420	12.808	12.594	12.538	12.446	12.786	12.586	12.475	12.392
430	15.459	15.199	15.119	15.018	15.439	15.193	15.058	14.947
440	20.445	20.102	19.972	19.844	20.401	20.084	19.909	19.748
450	23.801	23.408	23.244	23.104	23.756	23.390	23.190	22.990
460	24.090	23.687	23.527	23.389	24.048	23.674	23.471	23.273
470	23.188	22.800	22.647	22.514	23.159	22.790	22.598	22.415
480	20.984	20.630	20.493	20.372	20.964	20.616	20.442	20.279
490	18.692	18.371	18.258	18.146	18.685	18.360	18.207	18.069
500	16.193	15.916	15.826	15.728	16.193	15.901	15.770	15.661
510	13.080	12.855	12.794	12.709	13.085	12.841	12.734	12.656
520	9.863	9.693	9.658	9.594	9.873	9.682	9.598	9.547
530	7.303	7.178	7.159	7.106	7.312	7.167	7.101	7.067
540	5.324	5.235	5.227	5.182	5.333	5.228	5.175	5.158
550	3.782	3.718	3.714	3.679	3.784	3.715	3.676	3.667
560	2.814	2.764	2.762	2.728	2.813	2.765	2.733	2.724
570	2.350	2.306	2.303	2.272	2.344	2.309	2.279	2.275
580	2.143	2.101	2.100	2.068	2.136	2.110	2.082	2.074
590	2.036	1.998	1.993	1.962	2.026	2.005	1.977	1.969
600	1.972	1.936	1.930	1.899	1.959	1.945	1.914	1.907
610	1.931	1.893	1.891	1.861	1.918	1.904	1.876	1.866
620	1.923	1.884	1.882	1.853	1.908	1.896	1.868	1.857
630	1.907	1.867	1.864	1.835	1.892	1.879	1.849	1.842
640	1.906	1.866	1.866	1.834	1.892	1.878	1.848	1.836
650	1.921	1.877	1.877	1.847	1.905	1.893	1.862	1.850
660	1.941	1.897	1.895	1.866	1.926	1.907	1.877	1.867
670	1.922	1.879	1.880	1.848	1.908	1.892	1.861	1.853
680	1.900	1.860	1.856	1.827	1.884	1.870	1.842	1.832
690	1.895	1.854	1.854	1.824	1.880	1.866	1.838	1.828
700	1.907	1.866	1.865	1.836	1.893	1.878	1.852	1.841
710	2.004	1.960	1.959	1.927	1.989	1.972	1.943	1.933
720	2.191	2.143	2.141	2.108	2.175	2.156	2.127	2.116
730	2.480	2.425	2.422	2.385	2.460	2.440	2.408	2.393
740	3.317	3.248	3.244	3.200	3.296	3.263	3.226	3.208
750	5.945	5.839	5.825	5.762	5.919	5.855	5.798	5.773

b) Valores individuales de los parámetros de color. Enseguida se listan los valores individuales de los parámetros de color. Cabe mencionar que la comparación se realizó tomando la media de las mediciones de la referencia.

Muestra	L*	a*	b*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*	Cambio de Color en Escala de Grises
Ref.	31.101	-8.382	-35.32					
Ref.	31.08	-8.192	-35.608					
Ref.	31.202	-8.309	-35.543					
Ref.	31.199	-8.272	-35.571					
Ref.	31.126	-8.211	-35.653					
Media Ref.	31.142	-8.273	-35.539					
1 pulso	30.937	-8.395	-35.752	-0.205	-0.122	-0.213	0.319	5
1 pulso	30.937	-8.411	-35.549	-0.205	-0.138	-0.010	0.247	5
1 pulso	31.166	-8.434	-35.604	0.024	-0.161	-0.065	0.175	5
1 pulso	31.06	-8.446	-35.773	-0.082	-0.173	-0.234	0.302	5
1 pulso	31.078	-8.426	-35.801	-0.064	-0.153	-0.262	0.310	5
1 pulso	30.921	-8.403	-35.618	-0.221	-0.130	-0.079	0.268	5
1 pulso	31.12	-8.534	-35.632	-0.022	-0.130	-0.093	0.278	5
1 pulso	31.098	-8.408	-35.714	-0.044	-0.130	-0.175	0.225	5
1 pulso	31.11	-8.497	-35.133	-0.032	-0.130	0.406	0.465	4-5
1 pulso	31.177	-8.509	-35.583	0.035	-0.130	-0.044	0.242	5
1 pulso	31.18	-8.509	-35.414	0.038	-0.130	0.125	0.270	5
1 pulso	30.979	-8.435	-35.589	-0.163	-0.130	-0.050	0.235	5
1 pulso	31.259	-8.534	-35.499	0.117	-0.130	0.040	0.289	5
1 pulso	31.041	-8.459	-35.083	-0.101	-0.130	0.456	0.503	4-5
1 pulso	31.224	-8.491	-35.491	0.082	-0.130	0.048	0.238	5
1 pulso	31.372	-8.582	-35.625	0.230	-0.130	-0.086	0.395	5
1 pulso	31.388	-8.6	-35.549	0.246	-0.130	-0.010	0.409	5
1 pulso	31.296	-8.512	-35.422	0.154	-0.130	0.117	0.307	5
1 pulso	30.77	-8.446	-35.072	-0.372	-0.130	0.467	0.621	4-5
1 pulso	31.262	-8.568	-35.611	0.120	-0.130	-0.072	0.326	5
2 pulsos	31.084	-8.544	-35.641	-0.058	-0.130	-0.102	0.295	5
2 pulsos	31.002	-8.479	-35.572	-0.140	-0.130	-0.033	0.251	5
2 pulsos	31.142	-8.444	-35.662	0.000	-0.130	-0.123	0.210	5
2 pulsp	31.172	-8.5	-35.746	0.030	-0.130	-0.207	0.309	5
2 pulsos	31.034	-8.417	-35.6	-0.108	-0.130	-0.061	0.190	5
2 pulsos	30.695	-8.54	-34.885	-0.447	-0.130	0.654	0.836	4-5
2 pulsos	31.195	-8.573	-35.246	0.053	-0.130	0.293	0.423	5
2 pulsos	31.278	-8.561	-35.539	0.136	-0.130	0.000	0.318	5
2 pulsos	31.216	-8.499	-35.604	0.074	-0.130	-0.065	0.246	5
2 pulsos	31.072	-8.435	-35.297	-0.070	-0.130	0.242	0.299	5
2 pulsos	31.332	-8.6	-35.607	0.190	-0.130	-0.068	0.384	5
2 pulsos	31.122	-8.458	-35.682	-0.020	-0.130	-0.143	0.234	5
2 pulsos	31.07	-8.455	-35.537	-0.072	-0.130	0.002	0.195	5
2 pulsos	31.081	-8.434	-35.401	-0.061	-0.130	0.138	0.220	5

Muestra	L*	a*	b*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*	Cambio de Color en Escala de Grises
2 pulsos	31.277	-8.574	-35.612	0.135	-0.130	-0.073	0.338	5
2 pulsos	31.326	-8.573	-35.507	0.184	-0.130	0.032	0.353	5
2 pulsos	31.083	-8.526	-35.448	-0.059	-0.130	0.091	0.275	5
2 pulsos	31.337	-8.592	-35.357	0.195	-0.130	0.182	0.416	5
2 pulsos	31.084	-8.416	-35.592	-0.058	-0.130	-0.053	0.163	5
2 pulsos	31.068	-8.446	-35.442	-0.074	-0.130	0.097	0.211	5
3 pulsos	31.188	-8.48	-35.319	0.046	-0.130	0.220	0.305	5
3 pulsos	31.026	-8.442	-35.329	-0.116	-0.130	0.210	0.293	5
3 pulsos	30.598	-8.444	-35.025	-0.544	-0.130	0.514	0.767	4-5
3 pulsos	30.585	-8.441	-35.022	-0.557	-0.130	0.517	0.778	4-5
3 pulsos	31.145	-8.367	-35.348	0.003	-0.130	0.191	0.213	5
3 pulsos	30.658	-8.438	-34.908	-0.484	-0.130	0.631	0.812	4-5
3 pulsos	30.801	-8.389	-35.316	-0.341	-0.130	0.223	0.423	5
3 pulsos	30.648	-8.434	-34.94	-0.494	-0.130	0.599	0.793	4-5
3 pulsos	31.063	-8.349	-35.478	-0.079	-0.130	0.061	0.125	5
3 pulsos	31.203	-8.349	-35.486	0.061	-0.130	0.053	0.111	5
3 pulsos	30.978	-8.415	-35.518	-0.164	-0.130	0.021	0.218	5
3 pulsos	31.099	-8.439	-35.477	-0.043	-0.130	0.062	0.182	5
3 pulsos	31.267	-8.345	-35.45	0.125	-0.130	0.089	0.170	5
3 pulsos	31.194	-8.421	-35.556	0.052	-0.130	-0.017	0.158	5
3 pulsos	31.193	-8.432	-35.562	0.051	-0.130	-0.023	0.168	5
3 pulsos	31.24	-8.506	-35.613	0.098	-0.130	-0.074	0.263	5
3 pulsos	31.429	-8.531	-35.431	0.287	-0.130	0.108	0.401	5
3 pulsos	31.419	-8.58	-35.367	0.277	-0.130	0.172	0.448	4-5
3 pulsos	31.248	-8.461	-35.263	0.106	-0.130	0.276	0.350	5
3 pulsos	31.21	-8.409	-35.33	0.068	-0.130	0.209	0.258	5
4 pulsos	30.976	-8.457	-35.43	-0.166	-0.130	0.109	0.270	5
4 pulsos	31	-8.364	-35.12	-0.142	-0.130	0.419	0.452	4-5
4 pulsos	31.023	-8.485	-35.473	-0.119	-0.130	0.066	0.252	5
4 pulsos	31.13	-8.556	-35.661	-0.012	-0.130	-0.122	0.308	5
4 pulsos	31.008	-8.497	-35.43	-0.134	-0.130	0.109	0.283	5
4 pulsos	30.93	-8.316	-35.284	-0.212	-0.130	0.255	0.334	5
4 pulsos	31.059	-8.431	-35.179	-0.083	-0.130	0.360	0.402	5
4 pulsos	30.982	-8.538	-35.538	-0.160	-0.130	0.001	0.309	5
4 pulsos	31.125	-8.48	-35.286	-0.017	-0.130	0.253	0.327	5
4 pulsos	30.876	-8.385	-35.299	-0.266	-0.130	0.240	0.375	5
4 pulsos	31.049	-8.551	-35.447	-0.093	-0.130	0.092	0.307	5
4 pulsos	31.078	-8.487	-35.143	-0.064	-0.130	0.396	0.455	4-5
4 pulsos	30.987	-8.388	-35.003	-0.155	-0.130	0.536	0.570	4-5
4 pulsos	30.965	-8.416	-35.275	-0.177	-0.130	0.264	0.348	5
4 pulsos	30.802	-8.505	-35.048	-0.340	-0.130	0.491	0.640	4-5
4 pulsos	30.793	-8.351	-35.341	-0.349	-0.130	0.198	0.408	5
4 pulsos	31.043	-8.48	-35.409	-0.099	-0.130	0.130	0.263	5
4 pulsos	30.927	-8.596	-35.105	-0.215	-0.130	0.434	0.582	4-5
4 pulsos	31.048	-8.499	-35.109	-0.094	-0.130	0.430	0.495	4-5
4 pulsos	31.038	-8.474	-35.118	-0.104	-0.130	0.421	0.478	4-5

Muestra	L*	a*	b*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*	Cambio de Color en Escala de Grises
5 pulsos	31.285	-8.462	-35.713	0.143	-0.130	-0.174	0.294	5
5 pulsos	31.273	-8.521	-35.61	0.131	-0.130	-0.071	0.289	5
5 pulsos	31.297	-8.426	-35.723	0.155	-0.130	-0.184	0.285	5
5 pulsos	31.328	-8.519	-35.594	0.186	-0.130	-0.055	0.313	5
5 pulsos	31.218	-8.456	-35.53	0.076	-0.130	0.009	0.198	5
5 pulsos	31.33	-8.499	-35.871	0.188	-0.130	-0.332	0.444	4-5
5 pulsos	30.94	-8.332	-35.609	-0.202	-0.130	-0.070	0.221	5
5 pulsos	30.903	-8.352	-35.58	-0.239	-0.130	-0.041	0.255	5
5 pulsos	30.954	-8.368	-35.573	-0.188	-0.130	-0.034	0.213	5
5 pulsos	30.922	-8.432	-34.952	-0.220	-0.130	0.587	0.647	4-5
5 pulsos	30.979	-8.341	-35.524	-0.163	-0.130	0.015	0.177	5
5 pulsos	30.999	-8.422	-35.664	-0.143	-0.130	-0.125	0.241	5
5 pulsos	31.108	-8.419	-35.624	-0.034	-0.130	-0.085	0.172	5
5 pulsos	31.184	-8.493	-35.777	0.042	-0.130	-0.238	0.327	5
5 pulsos	31.328	-8.477	-35.726	0.186	-0.130	-0.187	0.334	5
5 pulsos	31.175	-8.426	-35.69	0.033	-0.130	-0.151	0.217	5
5 pulsos	31.133	-8.457	-35.693	-0.009	-0.130	-0.154	0.240	5
5 pulsos	31.125	-8.439	-35.682	-0.017	-0.130	-0.143	0.220	5
5 pulsos	31.212	-8.48	-35.718	0.070	-0.130	-0.179	0.282	5
5 pulsos	31.114	-8.439	-35.604	-0.028	-0.130	-0.065	0.180	5
6 pulsos	31.157	-8.411	-35.674	0.015	-0.130	-0.135	0.194	5
6 pulsos	31.158	-8.477	-35.819	0.016	-0.130	-0.280	0.347	5
6 pulsos	31.117	-8.385	-35.733	-0.025	-0.130	-0.194	0.225	5
6 pulsos	31.157	-8.419	-35.772	0.015	-0.130	-0.233	0.275	5
6 pulsos	31.154	-8.399	-35.679	0.012	-0.130	-0.140	0.189	5
6 pulsos	31.048	-8.403	-35.618	-0.094	-0.130	-0.079	0.178	5
6 pulsos	31.247	-8.495	-35.493	0.105	-0.130	0.046	0.250	5
6 pulsos	31.062	-8.393	-35.658	-0.080	-0.130	-0.119	0.187	5
6 pulsos	30.945	-8.394	-35.592	-0.197	-0.130	-0.053	0.237	5
6 pulsos	30.945	-8.451	-35.143	-0.197	-0.130	0.396	0.477	4-5
6 pulsos	30.906	-8.358	-35.242	-0.236	-0.130	0.297	0.388	5
6 pulsos	30.957	-8.262	-35.54	-0.185	-0.130	-0.001	0.185	5
6 pulsos	30.969	-8.352	-35.566	-0.173	-0.130	-0.027	0.192	5
6 pulsos	31.133	-8.375	-35.616	-0.009	-0.130	-0.077	0.128	5
6 pulsos	30.94	-8.339	-35.347	-0.202	-0.130	0.192	0.286	5
6 pulsos	31.149	-8.507	-35.575	0.007	-0.130	-0.036	0.237	5
6 pulsos	31.029	-8.344	-35.598	-0.113	-0.130	-0.059	0.146	5
6 pulsos	31.202	-8.365	-35.592	0.060	-0.130	-0.053	0.122	5
6 pulsos	31.146	-8.406	-35.686	0.004	-0.130	-0.147	0.198	5
6 pulsos	31.094	-8.405	-35.608	-0.048	-0.130	-0.069	0.156	5
7 pulsos	31.087	-8.324	-35.346	-0.055	-0.130	0.193	0.207	5
7 pulsos	30.772	-8.244	-35.54	-0.370	-0.130	-0.001	0.371	5
7 pulsos	31.029	-8.237	-35.336	-0.113	-0.130	0.203	0.235	5
7 pulsos	30.891	-8.247	-35.491	-0.251	-0.130	0.048	0.256	5
7 pulsos	30.954	-8.186	-35.347	-0.188	-0.130	0.192	0.282	5
7 pulsos	30.661	-8.243	-35.277	-0.481	-0.130	0.262	0.548	4-5

Muestra	L*	a*	b*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*	Cambio de Color en Escala de Grises
7 pulsos	30.461	-8.155	-35.248	-0.681	-0.130	0.291	0.750	4-5
7 pulsos	30.619	-8.102	-35.138	-0.523	-0.130	0.401	0.681	4-5
7 pulsos	30.906	-8.382	-35.263	-0.236	-0.130	0.276	0.379	5
7 pulsos	30.624	-8.3	-35.101	-0.518	-0.130	0.438	0.679	4-5
7 pulsos	30.601	-8.291	-35.097	-0.541	-0.130	0.442	0.699	4-5
7 pulsos	30.585	-8.417	-34.888	-0.557	-0.130	0.651	0.868	4-5
7 pulsos	30.683	-8.37	-35.193	-0.459	-0.130	0.346	0.583	4-5
7 pulsos	30.516	-8.168	-35.207	-0.626	-0.130	0.332	0.716	4-5
7 pulsos	30.673	-8.38	-35.179	-0.469	-0.130	0.360	0.600	4-5
7 pulsos	30.828	-8.372	-35.3	-0.314	-0.130	0.239	0.406	5
7 pulsos	30.639	-8.218	-35.268	-0.503	-0.130	0.271	0.574	4-5
7 pulsos	30.584	-8.231	-35.22	-0.558	-0.130	0.319	0.644	4-5
7 pulsos	30.479	-8.135	-35.245	-0.663	-0.130	0.294	0.738	4-5
7 pulsos	30.723	-8.145	-35.309	-0.419	-0.130	0.230	0.495	4-5
8 pulsos	31.065	-8.33	-35.394	-0.077	-0.130	0.145	0.174	5
8 pulsos	30.925	-8.159	-35.395	-0.217	-0.130	0.144	0.284	5
8 pulsos	31.003	-8.191	-35.227	-0.139	-0.130	0.312	0.351	5
8 pulsos	31.139	-8.156	-35.3	-0.003	-0.130	0.239	0.266	5
8 pulsos	31.202	-8.278	-35.363	0.060	-0.130	0.176	0.186	5
8 pulsos	30.663	-8.197	-34.906	-0.479	-0.130	0.633	0.797	4-5
8 pulsos	30.711	-8.317	-34.984	-0.431	-0.130	0.555	0.704	4-5
8 pulsos	30.712	-8.217	-34.963	-0.430	-0.130	0.576	0.721	4-5
8 pulsos	30.674	-8.442	-35.197	-0.468	-0.130	0.342	0.603	4-5
8 pulsos	30.432	-8.303	-34.966	-0.710	-0.130	0.573	0.913	4-5
8 pulsos	30.725	-8.436	-35.218	-0.417	-0.130	0.321	0.551	4-5
8 pulsos	30.571	-8.362	-35.143	-0.571	-0.130	0.396	0.700	4-5
8 pulsos	30.788	-8.314	-35.242	-0.354	-0.130	0.297	0.464	4-5
8 pulsos	30.806	-8.201	-34.887	-0.336	-0.130	0.652	0.737	4-5
8 pulsos	30.692	-8.332	-35.144	-0.450	-0.130	0.395	0.601	4-5
8 pulsos	30.704	-8.412	-35.205	-0.438	-0.130	0.334	0.568	4-5
8 pulsos	30.875	-8.349	-35.068	-0.267	-0.130	0.471	0.546	4-5
8 pulsos	30.685	-8.364	-35.169	-0.457	-0.130	0.370	0.595	4-5
8 pulsos	30.737	-8.36	-35.216	-0.405	-0.130	0.323	0.525	4-5
8 pulsos	30.553	-8.38	-35.196	-0.589	-0.130	0.343	0.690	4-5
9 pulsos	31.327	-8.546	-36.018	0.185	-0.130	-0.479	0.582	4-5
9 pulsos	31.301	-8.517	-36	0.159	-0.130	-0.461	0.545	4-5
9 pulsos	31.423	-8.334	-35.823	0.281	-0.130	-0.284	0.404	5
9 pulsos	31.506	-8.484	-35.94	0.364	-0.130	-0.401	0.581	4-5
9 pulsos	31.361	-8.461	-35.886	0.219	-0.130	-0.347	0.451	4-5
9 pulsos	31.304	-8.445	-35.873	0.162	-0.130	-0.334	0.409	5
9 pulsos	31.482	-8.548	-35.845	0.340	-0.130	-0.306	0.534	4-5
9 pulsos	31.337	-8.501	-35.768	0.195	-0.130	-0.229	0.378	5
9 pulsos	31.536	-8.594	-35.771	0.394	-0.130	-0.232	0.559	4-5
9 pulsos	31.287	-8.423	-35.843	0.145	-0.130	-0.304	0.369	5
9 pulsos	31.335	-8.436	-35.784	0.193	-0.130	-0.245	0.352	5
9 pulsos	31.284	-8.497	-35.904	0.142	-0.130	-0.365	0.451	4-5

Muestra	L*	a*	b*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*	Cambio de Color en Escala de Grises
9 pulsos	31.229	-8.59	-35.724	0.087	-0.130	-0.185	0.377	5
9 pulsos	31.184	-8.439	-35.718	0.042	-0.130	-0.179	0.248	5
9 pulsos	31.495	-8.547	-35.897	0.353	-0.130	-0.358	0.573	4-5
9 pulsos	31.448	-8.528	-35.788	0.306	-0.130	-0.249	0.470	4-5
9 pulsos	31.141	-8.507	-35.344	-0.001	-0.130	0.195	0.304	5
9 pulsos	31.537	-8.6	-35.782	0.395	-0.130	-0.243	0.568	4-5
9 pulsos	31.262	-8.438	-35.837	0.120	-0.130	-0.298	0.361	5
9 pulsos	31.381	-8.543	-35.833	0.239	-0.130	-0.294	0.465	4-5
10 pulsos	31.341	-8.47	-35.591	0.199	-0.130	-0.052	0.285	5
10 pulsos	31.236	-8.495	-35.838	0.094	-0.130	-0.299	0.384	5
10 pulsos	31.318	-8.612	-35.563	0.176	-0.130	-0.024	0.383	5
10 pulsos	31.301	-8.623	-35.767	0.159	-0.130	-0.228	0.447	4-5
10 pulsos	31.296	-8.517	-35.785	0.154	-0.130	-0.246	0.379	5
10 pulsos	31.003	-8.388	-35.68	-0.139	-0.130	-0.141	0.229	5
10 pulsos	31.092	-8.434	-35.741	-0.050	-0.130	-0.202	0.263	5
10 pulsos	31.149	-8.431	-35.646	0.007	-0.130	-0.107	0.191	5
10 pulsos	31.055	-8.328	-35.712	-0.087	-0.130	-0.173	0.201	5
10 pulsos	31.046	-8.367	-35.695	-0.096	-0.130	-0.156	0.206	5
10 pulsos	30.884	-8.45	-35.584	-0.258	-0.130	-0.045	0.316	5
10 pulsos	31.003	-8.476	-35.658	-0.139	-0.130	-0.119	0.273	5
10 pulsos	31.028	-8.433	-35.514	-0.114	-0.130	0.025	0.198	5
10 pulsos	31.101	-8.356	-35.62	-0.041	-0.130	-0.081	0.123	5
10 pulsos	30.982	-8.421	-35.694	-0.160	-0.130	-0.155	0.267	5
10 pulsos	30.993	-8.413	-35.618	-0.149	-0.130	-0.079	0.219	5
10 pulsos	31.029	-8.509	-35.591	-0.113	-0.130	-0.052	0.266	5
10 pulsos	30.885	-8.386	-35.579	-0.257	-0.130	-0.040	0.283	5
10 pulsos	30.998	-8.466	-35.589	-0.144	-0.130	-0.050	0.246	5
10 pulsos	30.917	-8.507	-35.227	-0.225	-0.130	0.312	0.450	4-5
11 pulsos	31.107	-8.52	-35.649	-0.035	-0.130	-0.110	0.272	5
11 pulsos	31.089	-8.543	-35.774	-0.053	-0.130	-0.235	0.362	5
11 pulsos	31.105	-8.518	-35.893	-0.037	-0.130	-0.354	0.432	5
11 pulsos	30.985	-8.479	-35.551	-0.157	-0.130	-0.012	0.259	5
11 pulsos	31	-8.526	-35.476	-0.142	-0.130	0.063	0.297	5
11 pulsos	31.075	-8.43	-35.648	-0.067	-0.130	-0.109	0.202	5
11 pulsos	30.69	-8.328	-35.448	-0.452	-0.130	0.091	0.464	4-5
11 pulsos	31.142	-8.568	-35.652	0.000	-0.130	-0.113	0.316	5
11 pulsos	31.08	-8.478	-35.534	-0.062	-0.130	0.005	0.214	5
11 pulsos	30.893	-8.43	-35.251	-0.249	-0.130	0.288	0.411	5
11 pulsos	31.216	-8.603	-35.481	0.074	-0.130	0.058	0.343	5
11 pulsos	31.208	-8.578	-35.494	0.066	-0.130	0.045	0.315	5
11 pulsos	30.705	-8.345	-35.158	-0.437	-0.130	0.381	0.584	4-5
11 pulsos	30.694	-8.308	-35.179	-0.448	-0.130	0.360	0.575	4-5
11 pulsos	31.24	-8.587	-35.384	0.098	-0.130	0.155	0.364	5
11 pulsos	31.226	-8.609	-35.598	0.084	-0.130	-0.059	0.351	5
11 pulsos	30.908	-8.438	-35.343	-0.234	-0.130	0.196	0.347	5
11 pulsos	30.984	-8.394	-35.425	-0.158	-0.130	0.114	0.229	5

Muestra	L*	a*	b*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*	Cambio de Color en Escala de Grises
11 pulsos	31.023	-8.436	-35.494	-0.119	-0.130	0.045	0.206	5
11 pulsos	30.968	-8.357	-35.524	-0.174	-0.130	0.015	0.193	5
12 pulsos	30.899	-8.378	-35.485	-0.243	-0.130	0.054	0.270	5
12 pulsos	30.969	-8.427	-35.54	-0.173	-0.130	-0.001	0.231	5
12 pulsos	31.095	-8.52	-35.596	-0.047	-0.130	-0.057	0.258	5
12 pulsos	31.048	-8.334	-35.431	-0.094	-0.130	0.108	0.155	5
12 pulsos	30.959	-8.472	-35.586	-0.183	-0.130	-0.047	0.274	5
12 pulsos	30.876	-8.513	-35.498	-0.266	-0.130	0.041	0.360	5
12 pulsos	30.85	-8.505	-35.451	-0.292	-0.130	0.088	0.383	5
12 pulsos	30.921	-8.551	-35.551	-0.221	-0.130	-0.012	0.355	5
12 pulsos	30.873	-8.481	-35.574	-0.269	-0.130	-0.035	0.341	5
12 pulsos	30.817	-8.41	-35.592	-0.325	-0.130	-0.053	0.356	5
12 pulsos	30.8	-8.508	-35.461	-0.342	-0.130	0.078	0.422	5
12 pulsos	30.709	-8.518	-35.366	-0.433	-0.130	0.173	0.526	4-5
12 pulsos	30.9	-8.584	-35.335	-0.242	-0.130	0.204	0.443	5
12 pulsos	30.821	-8.533	-35.488	-0.321	-0.130	0.051	0.416	5
12 pulsos	30.841	-8.492	-35.41	-0.301	-0.130	0.129	0.394	5
12 pulsos	30.974	-8.525	-35.503	-0.168	-0.130	0.036	0.305	5
12 pulsos	30.972	-8.51	-35.499	-0.170	-0.130	0.040	0.294	5
12 pulsos	30.877	-8.556	-35.44	-0.265	-0.130	0.099	0.400	5
12 pulsos	30.893	-8.562	-35.474	-0.249	-0.130	0.065	0.387	5
12 pulsos	30.759	-8.483	-35.163	-0.383	-0.130	0.376	0.576	4-5
13 pulsos	31.248	-8.437	-35.981	0.106	-0.130	-0.442	0.483	4-5
13 pulsos	31.23	-8.376	-35.83	0.088	-0.130	-0.291	0.321	5
13 pulsos	31.333	-8.428	-35.918	0.191	-0.130	-0.379	0.452	4-5
13 pulsos	31.285	-8.4	-35.841	0.143	-0.130	-0.302	0.358	4-5
13 pulsos	31.292	-8.467	-35.916	0.150	-0.130	-0.377	0.450	4-5
13 pulsos	31.14	-8.501	-35.698	-0.002	-0.130	-0.159	0.278	5
13 pulsos	31.404	-8.733	-35.784	0.262	-0.130	-0.245	0.583	4-5
13 pulsos	31.303	-8.597	-35.868	0.161	-0.130	-0.329	0.489	4-5
13 pulsos	31.282	-8.628	-35.774	0.140	-0.130	-0.235	0.448	5
13 pulsos	31.409	-8.752	-35.711	0.267	-0.130	-0.172	0.575	4-5
13 pulsos	31.308	-8.59	-35.812	0.166	-0.130	-0.273	0.450	5
13 pulsos	31.2	-8.47	-35.693	0.058	-0.130	-0.154	0.257	5
13 pulsos	31.357	-8.538	-35.862	0.215	-0.130	-0.323	0.470	4-5
13 pulsos	31.468	-8.731	-35.807	0.326	-0.130	-0.268	0.623	4-5
13 pulsos	31.524	-8.769	-35.688	0.382	-0.130	-0.149	0.644	4-5
13 pulsos	31.517	-8.762	-35.675	0.375	-0.130	-0.136	0.631	4-5
13 pulsos	31.361	-8.66	-35.795	0.219	-0.130	-0.256	0.513	4-5
13 pulsos	31.491	-8.756	-35.632	0.349	-0.130	-0.093	0.603	4-5
13 pulsos	31.374	-8.671	-35.757	0.232	-0.130	-0.218	0.510	4-5
13 pulsos	31.454	-8.729	-35.429	0.312	-0.130	0.110	0.563	4-5
14 pulsos	31.183	-8.477	-35.537	0.041	-0.130	0.002	0.208	5
14 pulsos	31.279	-8.504	-35.88	0.137	-0.130	-0.341	0.434	4-5
14 pulsos	31.302	-8.47	-35.62	0.160	-0.130	-0.081	0.266	5
14 pulsos	31.321	-8.564	-35.687	0.179	-0.130	-0.148	0.372	5

Muestra	L*	a*	b*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*	Cambio de Color en Escala de Grises
14 pulsos	31.277	-8.499	-35.525	0.135	-0.130	0.014	0.264	5
14 pulsos	30.906	-8.34	-35.602	-0.236	-0.130	-0.063	0.253	5
14 pulsos	31.127	-8.469	-35.873	-0.015	-0.130	-0.334	0.387	5
14 pulsos	30.879	-8.331	-35.535	-0.263	-0.130	0.004	0.269	5
14 pulsos	30.919	-8.338	-35.568	-0.223	-0.130	-0.029	0.234	5
14 pulsos	30.968	-8.332	-35.573	-0.174	-0.130	-0.034	0.186	5
14 pulsos	30.657	-8.278	-35.337	-0.485	-0.130	0.202	0.525	4-5
14 pulsos	31.031	-8.372	-35.628	-0.111	-0.130	-0.089	0.173	5
14 pulsos	30.813	-8.459	-35.533	-0.329	-0.130	0.006	0.378	5
14 pulsos	31.123	-8.308	-35.652	-0.019	-0.130	-0.113	0.120	5
14 pulsos	30.96	-8.383	-35.623	-0.182	-0.130	-0.084	0.228	5
14 pulsos	31.115	-8.278	-35.704	-0.027	-0.130	-0.165	0.167	5
14 pulsos	31.055	-8.377	-35.629	-0.087	-0.130	-0.090	0.162	5
14 pulsos	31.074	-8.357	-35.63	-0.068	-0.130	-0.091	0.141	5
14 pulsos	31.304	-8.45	-35.6	0.162	-0.130	-0.061	0.248	5
14 pulsos	31.268	-8.51	-35.609	0.126	-0.130	-0.070	0.277	5
15 pulsos	31.082	-8.527	-35.678	-0.060	-0.130	-0.139	0.295	5
15 pulsos	31.123	-8.481	-35.679	-0.019	-0.130	-0.140	0.251	5
15 pulsos	31.11	-8.455	-35.743	-0.032	-0.130	-0.204	0.275	5
15 pulsos	31.201	-8.478	-35.887	0.059	-0.130	-0.348	0.408	5
15 pulsos	31.082	-8.496	-35.706	-0.060	-0.130	-0.167	0.285	5
15 pulsos	30.759	-8.262	-35.419	-0.383	-0.130	0.120	0.401	5
15 pulsos	30.819	-8.356	-35.662	-0.323	-0.130	-0.123	0.355	5
15 pulsos	30.977	-8.419	-35.587	-0.165	-0.130	-0.048	0.225	5
15 pulsos	30.742	-8.343	-35.235	-0.400	-0.130	0.304	0.507	4-5
15 pulsos	31.12	-8.538	-35.32	-0.022	-0.130	0.219	0.344	5
15 pulsos	31.06	-8.511	-35.551	-0.082	-0.130	-0.012	0.252	5
15 pulsos	31.031	-8.479	-35.673	-0.111	-0.130	-0.134	0.269	5
15 pulsos	30.849	-8.437	-35.591	-0.293	-0.130	-0.052	0.339	5
15 pulsos	30.673	-8.244	-35.526	-0.469	-0.130	0.013	0.470	4-5
15 pulsos	30.723	-8.231	-35.447	-0.419	-0.130	0.092	0.431	5
15 pulsos	30.298	-8.36	-34.807	-0.844	-0.130	0.732	1.120	4-5
15 pulsos	30.96	-8.433	-35.696	-0.182	-0.130	-0.157	0.288	5
15 pulsos	31.016	-8.415	-35.556	-0.126	-0.130	-0.017	0.190	5
15 pulsos	31.012	-8.433	-35.576	-0.130	-0.130	-0.037	0.209	5
15 pulsos	30.933	-8.433	-35.43	-0.209	-0.130	0.109	0.284	5
16 pulsos	31.137	-8.594	-35.615	-0.005	-0.130	-0.076	0.330	5
16 pulsos	31.255	-8.566	-35.694	0.113	-0.130	-0.155	0.350	5
16 pulsos	30.941	-8.463	-35.415	-0.201	-0.130	0.124	0.303	5
16 pulsos	31.19	-8.569	-35.637	0.048	-0.130	-0.098	0.315	5
16 pulsos	31.054	-8.492	-35.521	-0.088	-0.130	0.018	0.236	5
16 pulsos	30.907	-8.455	-35.476	-0.235	-0.130	0.063	0.303	5
16 pulsos	30.895	-8.451	-35.413	-0.247	-0.130	0.126	0.329	5
16 pulsos	30.642	-8.442	-35.307	-0.500	-0.130	0.232	0.576	4-5
16 pulsos	30.729	-8.411	-35.322	-0.413	-0.130	0.217	0.486	4-5
16 pulsos	30.793	-8.497	-35.417	-0.349	-0.130	0.122	0.432	5

Muestra	L*	a*	b*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*	Cambio de Color en Escala de Grises
16 pulsos	30.895	-8.42	-35.414	-0.247	-0.130	0.125	0.313	5
16 pulsos	30.883	-8.485	-35.411	-0.259	-0.130	0.128	0.358	5
16 pulsos	30.735	-8.382	-35.358	-0.407	-0.130	0.181	0.458	4-5
16 pulsos	30.543	-8.371	-35.14	-0.599	-0.130	0.399	0.726	4-5
16 pulsos	30.733	-8.471	-34.987	-0.409	-0.130	0.552	0.715	4-5
16 pulsos	30.574	-8.397	-35.165	-0.568	-0.130	0.374	0.691	4-5
16 pulsos	30.758	-8.386	-35.334	-0.384	-0.130	0.205	0.449	5
16 pulsos	30.611	-8.227	-35.402	-0.531	-0.130	0.137	0.550	4-5
16 pulsos	30.762	-8.388	-35.354	-0.380	-0.130	0.185	0.438	5
16 pulsos	30.68	-8.496	-35.326	-0.462	-0.130	0.213	0.555	4-5

APÉNDICE IV

RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS MUESTRAS IRRADIADAS CON LÁSER DE Nd:YAG, REPLICA 2.

a) Reflectancia. Enseguida se anexa el gran promedio de los valores de reflectancia de las muestras irradiadas con diferente número de pulsos.

λ (nm)	Rey -17	1 pulso	2 pulso	3 pulso	4 pulsos	5 pulsos	6 pulsos	7 pulsos	8 pulsos
360	2.369	2.560	2.520	2.526	2.476	2.522	2.539	2.469	2.459
370	2.446	2.688	2.636	2.654	2.597	2.647	2.672	2.602	2.584
380	3.106	3.378	3.340	3.351	3.285	3.356	3.373	3.293	3.268
390	4.889	5.155	5.092	5.103	5.003	5.120	5.129	5.027	4.948
400	7.842	8.076	7.960	7.971	7.832	8.013	8.025	7.872	7.705
410	10.916	11.065	10.891	10.903	10.729	10.971	10.972	10.768	10.511
420	12.567	12.614	12.407	12.423	12.234	12.500	12.497	12.269	11.965
430	15.199	15.172	14.903	14.931	14.703	15.028	15.014	14.736	14.356
440	20.036	19.994	19.624	19.669	19.373	19.790	19.768	19.392	18.858
450	23.407	23.199	22.764	22.829	22.494	22.985	22.950	22.516	21.888
460	23.755	23.458	23.004	23.076	22.750	23.243	23.201	22.765	22.145
470	22.856	22.505	22.068	22.140	21.839	22.320	22.275	21.864	21.291
480	20.724	20.354	19.941	20.002	19.737	20.164	20.118	19.741	19.243
490	18.438	18.065	17.685	17.735	17.510	17.890	17.848	17.517	17.095
500	15.980	15.611	15.270	15.304	15.113	15.437	15.404	15.111	14.760
510	12.910	12.567	12.272	12.289	12.134	12.396	12.377	12.133	11.869
520	9.755	9.441	9.201	9.202	9.079	9.279	9.274	9.086	8.896
530	7.225	6.966	6.767	6.760	6.659	6.812	6.819	6.671	6.537
540	5.246	5.072	4.916	4.907	4.827	4.944	4.956	4.846	4.758
550	3.690	3.623	3.506	3.499	3.433	3.522	3.536	3.457	3.403
560	2.713	2.732	2.645	2.646	2.587	2.654	2.674	2.607	2.579
570	2.219	2.313	2.243	2.247	2.195	2.250	2.271	2.212	2.197
580	2.003	2.134	2.075	2.083	2.034	2.080	2.101	2.044	2.038
590	1.879	2.042	1.988	1.996	1.949	1.992	2.016	1.957	1.958
600	1.801	1.988	1.940	1.951	1.903	1.946	1.969	1.910	1.917
610	1.759	1.962	1.913	1.925	1.877	1.920	1.941	1.883	1.895
620	1.750	1.960	1.919	1.928	1.882	1.920	1.943	1.885	1.898
630	1.747	1.951	1.909	1.923	1.875	1.916	1.938	1.878	1.895
640	1.738	1.957	1.917	1.931	1.885	1.923	1.945	1.886	1.902
650	1.744	1.974	1.936	1.948	1.903	1.941	1.961	1.906	1.920
660	1.755	2.003	1.963	1.979	1.931	1.972	1.990	1.928	1.948
670	1.752	1.985	1.944	1.958	1.911	1.952	1.971	1.911	1.929
680	1.719	1.965	1.922	1.939	1.894	1.931	1.951	1.890	1.908
690	1.702	1.962	1.917	1.932	1.889	1.928	1.946	1.887	1.909
700	1.730	1.972	1.928	1.944	1.903	1.937	1.955	1.899	1.922
710	1.803	2.073	2.028	2.041	2.001	2.035	2.055	1.993	2.020

720	1.983	2.268	2.224	2.242	2.197	2.233	2.253	2.189	2.213
730	2.264	2.558	2.519	2.535	2.490	2.529	2.551	2.484	2.500
740	3.031	3.397	3.345	3.363	3.306	3.368	3.388	3.306	3.312
750	5.417	6.010	5.916	5.926	5.846	5.962	5.980	5.866	5.809

En la fig. IV.1 se muestra la gráfica de λ contra el porcentaje de reflectancia, en la cual podemos observar el cambio mas significativo se da alrededor de los 460 nm; este cambio es suficiente para generar un cambio en la diferencia total del color.

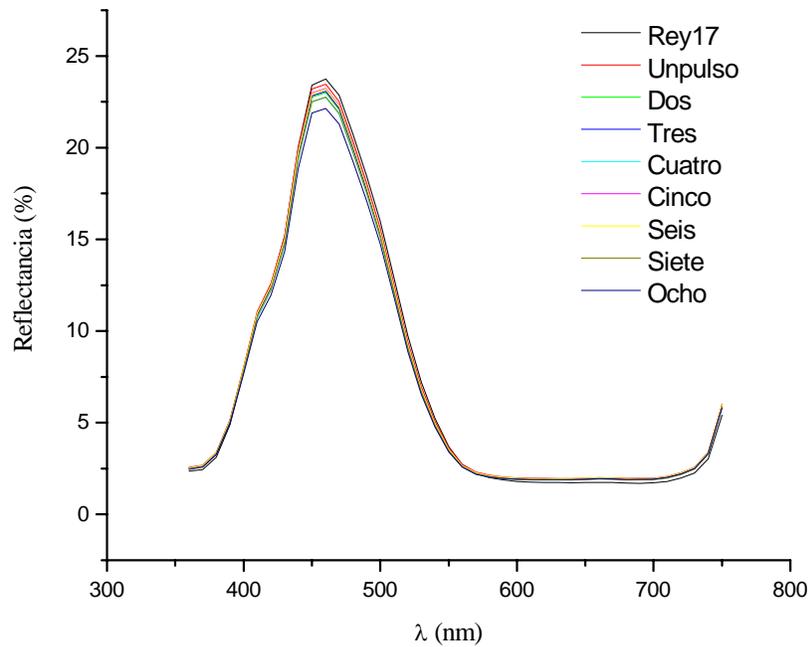


Fig. IV.1 Gráfica de λ contra reflectancia de las muestras irradiadas con láser de Nd:YAG, en la segunda corrida.

b) Valores individuales de los parámetros de color. Enseguida se listan los valores individuales de los parámetros de color. Cabe mencionar que la comparación se realizó tomando la media de las mediciones de la referencia.

Muestra	L*	a*	b*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*	Cambio de Color en Escala de Grises
Ref.	31.12	-9.151	-35.464					
Ref.	31.095	-9.106	-35.429					
Ref.	30.988	-8.985	-35.407					
Ref.	30.942	-9.061	-35.531					
Ref.	30.937	-9.011	-35.589					
Media Ref.	31.016	-9.06	-35.48					
1 pulso	30.732	-7.553	-35.938	-0.284	1.510	-0.454	1.602	4
1 pulso	30.784	-7.513	-35.942	-0.232	1.550	-0.458	1.633	4
1 pulso	30.731	-7.515	-35.984	-0.285	1.548	-0.500	1.651	4
1 pulso	30.832	-7.486	-35.954	-0.184	1.577	-0.470	1.656	4
1 pulso	30.701	-7.496	-35.802	-0.315	1.567	-0.318	1.630	4
1 pulso	30.772	-7.473	-35.986	-0.244	1.590	-0.502	1.685	4
1 pulso	30.801	-7.601	-35.772	-0.215	1.462	-0.288	1.505	4
1 pulso	30.974	-7.65	-35.892	-0.042	1.413	-0.408	1.471	4
1 pulso	30.83	-7.452	-35.886	-0.186	1.611	-0.402	1.671	4
1 pulso	30.759	-7.79	-35.234	-0.257	1.273	0.250	1.322	4
1 pulso	30.77	-7.675	-35.584	-0.246	1.388	-0.100	1.413	4
1 pulso	30.892	-7.529	-35.799	-0.124	1.534	-0.315	1.571	4
1 pulso	31.07	-7.577	-35.986	0.054	1.486	-0.502	1.569	4
1 pulso	31.232	-7.556	-35.894	0.216	1.507	-0.410	1.576	4
1 pulso	31.037	-7.55	-36.076	0.021	1.513	-0.592	1.625	4
1 pulso	30.8	-7.564	-35.797	-0.216	1.499	-0.313	1.546	4
1 pulso	30.801	-7.691	-35.501	-0.215	1.372	-0.017	1.389	4
1 pulso	30.812	-7.526	-35.881	-0.204	1.537	-0.397	1.600	4
1 pulso	31.182	-7.578	-35.804	0.166	1.485	-0.320	1.528	4
1 pulso	30.818	-7.478	-35.932	-0.198	1.585	-0.448	1.659	4
2 pulsos	30.633	-7.499	-35.698	-0.383	1.564	-0.214	1.624	4
2 pulsos	30.208	-7.304	-35.49	-0.808	1.759	-0.006	1.936	4
2 pulsos	30.432	-7.38	-35.646	-0.584	1.683	-0.162	1.789	4
2 pulsos	30.261	-7.357	-35.626	-0.755	1.706	-0.142	1.871	4
2 pulsos	30.556	-7.416	-35.662	-0.460	1.647	-0.178	1.719	4
2 pulsos	30.413	-7.308	-35.728	-0.603	1.755	-0.244	1.872	4
2 pulsos	30.124	-7.317	-35.434	-0.892	1.746	0.050	1.961	4
2 pulsos	30.373	-7.349	-35.655	-0.643	1.714	-0.171	1.839	4
2 pulsos	30.581	-7.406	-35.509	-0.435	1.657	-0.025	1.713	4
2 pulsos	30.625	-7.405	-35.688	-0.391	1.658	-0.204	1.716	4
2 pulsos	30.388	-7.458	-35.735	-0.628	1.605	-0.251	1.742	4
2 pulsos	30.377	-7.343	-35.636	-0.639	1.720	-0.152	1.841	4

Muestra	L*	a*	b*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*	Cambio de Color en Escala de Grises
2 pulsos	30.537	-7.328	-35.466	-0.479	1.735	0.018	1.800	4
2 pulsos	30.616	-7.454	-35.697	-0.400	1.609	-0.213	1.672	4
2 pulsos	30.478	-7.324	-35.835	-0.538	1.739	-0.351	1.854	4
2 pulsos	30.477	-7.383	-35.628	-0.539	1.680	-0.144	1.770	4
2 pulsos	30.682	-7.418	-35.545	-0.334	1.645	-0.061	1.680	4
2 pulsos	30.444	-7.358	-35.645	-0.572	1.705	-0.161	1.806	4
2 pulsos	30.609	-7.444	-35.449	-0.407	1.619	0.035	1.670	4
2 pulsos	30.543	-7.368	-35.638	-0.473	1.695	-0.154	1.766	4
3 pulsos	30.522	-7.324	-35.748	-0.494	1.739	-0.264	1.827	4
3 pulsos	30.673	-7.346	-35.645	-0.343	1.717	-0.161	1.758	4
3 pulsos	30.3	-7.244	-35.652	-0.716	1.819	-0.168	1.962	4
3 pulsos	30.29	-7.336	-35.641	-0.726	1.727	-0.157	1.880	4
3 pulsos	30.243	-7.272	-35.606	-0.773	1.791	-0.122	1.954	4
3 pulsos	30.555	-7.307	-35.76	-0.461	1.756	-0.276	1.836	4
3 pulsos	30.632	-7.394	-35.626	-0.384	1.669	-0.142	1.718	4
3 pulsos	30.46	-7.302	-35.714	-0.556	1.761	-0.230	1.861	4
3 pulsos	30.24	-7.378	-35.641	-0.776	1.685	-0.157	1.862	4
3 pulsos	30.557	-7.314	-35.715	-0.459	1.749	-0.231	1.823	4
3 pulsos	30.54	-7.225	-35.658	-0.476	1.838	-0.174	1.906	4
3 pulsos	30.792	-7.339	-35.681	-0.224	1.724	-0.197	1.749	4
3 pulsos	30.678	-7.291	-35.692	-0.338	1.772	-0.208	1.816	4
3 pulsos	30.377	-7.311	-35.691	-0.639	1.752	-0.207	1.876	4
3 pulsos	30.769	-7.296	-35.54	-0.247	1.767	-0.056	1.785	4
3 pulsos	30.523	-7.317	-35.725	-0.493	1.746	-0.241	1.830	4
3 pulsos	30.454	-7.274	-35.745	-0.562	1.789	-0.261	1.893	4
3 pulsos	30.491	-7.336	-35.711	-0.525	1.727	-0.227	1.819	4
3 pulsos	30.308	-7.26	-35.807	-0.708	1.803	-0.323	1.964	4
3 pulsos	30.453	-7.535	-35.603	-0.563	1.528	-0.119	1.633	4
4 pulsos	30.305	-7.322	-35.793	-0.711	1.741	-0.309	1.906	4
4 pulsos	30.208	-7.321	-35.807	-0.808	1.742	-0.323	1.947	4
4 pulsos	30.203	-7.359	-35.715	-0.813	1.704	-0.231	1.902	4
4 pulsos	30.246	-7.298	-35.783	-0.770	1.765	-0.299	1.949	4
4 pulsos	30.228	-7.42	-35.23	-0.788	1.643	0.254	1.840	4
4 pulsos	30.289	-7.449	-35.345	-0.727	1.614	0.139	1.776	4
4 pulsos	30.116	-7.391	-35.219	-0.900	1.672	0.265	1.917	4
4 pulsos	30.205	-7.339	-35.43	-0.811	1.724	0.054	1.906	4
4 pulsos	30.513	-7.451	-35.458	-0.503	1.612	0.026	1.689	4
4 pulsos	30.309	-7.443	-35.348	-0.707	1.620	0.136	1.773	4
4 pulsos	30.179	-7.373	-35.578	-0.837	1.690	-0.094	1.888	4
4 pulsos	30.236	-7.342	-35.512	-0.780	1.721	-0.028	1.890	4
4 pulsos	30.312	-7.38	-35.59	-0.704	1.683	-0.106	1.827	4
4 pulsos	30.122	-7.378	-35.445	-0.894	1.685	0.039	1.908	4
4 pulsos	30.271	-7.453	-35.548	-0.745	1.610	-0.064	1.775	4
4 pulsos	30.287	-7.338	-35.757	-0.729	1.725	-0.273	1.892	4
4 pulsos	30.303	-7.321	-35.693	-0.713	1.742	-0.209	1.894	4
4 pulsos	30.314	-7.504	-35.324	-0.702	1.559	0.160	1.717	4

Muestra	L*	a*	b*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*	Cambio de Color en Escala de Grises
4 pulsos	30.219	-7.4	-35.565	-0.797	1.663	-0.081	1.846	4
4 pulsos	30.146	-7.362	-35.573	-0.870	1.701	-0.089	1.913	4
5 pulsos	30.449	-7.628	-35.662	-0.567	1.435	-0.178	1.553	4
5 pulsos	30.551	-7.423	-35.824	-0.465	1.640	-0.340	1.738	4
5 pulsos	30.807	-7.427	-35.91	-0.209	1.636	-0.426	1.703	4
5 pulsos	30.836	-7.649	-35.652	-0.180	1.414	-0.168	1.435	4
5 pulsos	30.707	-7.469	-35.805	-0.309	1.594	-0.321	1.655	4
5 pulsos	30.703	-7.456	-35.807	-0.313	1.607	-0.323	1.669	4
5 pulsos	30.601	-7.455	-35.652	-0.415	1.608	-0.168	1.669	4
5 pulsos	30.601	-7.398	-35.922	-0.415	1.665	-0.438	1.771	4
5 pulsos	30.528	-7.454	-35.787	-0.488	1.609	-0.303	1.708	4
5 pulsos	30.818	-8.095	-35.217	-0.198	0.968	0.267	1.023	4
5 pulsos	30.466	-7.428	-35.807	-0.550	1.635	-0.323	1.755	4
5 pulsos	30.563	-7.48	-35.86	-0.453	1.583	-0.376	1.689	4
5 pulsos	30.614	-7.397	-35.89	-0.402	1.666	-0.406	1.761	4
5 pulsos	30.421	-7.21	-35.964	-0.595	1.853	-0.480	2.004	4
5 pulsos	30.495	-7.384	-35.843	-0.521	1.679	-0.359	1.794	4
5 pulsos	30.677	-7.355	-35.998	-0.339	1.708	-0.514	1.815	4
5 pulsos	30.423	-7.218	-35.879	-0.593	1.845	-0.395	1.978	4
5 pulsos	30.236	-7.17	-35.536	-0.780	1.893	-0.052	2.048	4
5 pulsos	30.854	-7.433	-35.892	-0.162	1.630	-0.408	1.688	4
5 pulsos	30.566	-7.425	-35.623	-0.450	1.638	-0.139	1.704	4
6 pulsos	30.659	-7.328	-35.836	-0.357	1.735	-0.352	1.806	4
6 pulsos	30.644	-7.403	-35.863	-0.372	1.660	-0.379	1.743	4
6 pulsos	30.696	-7.382	-35.892	-0.320	1.681	-0.408	1.759	4
6 pulsos	30.415	-7.28	-35.488	-0.601	1.783	-0.004	1.882	4
6 pulsos	30.393	-7.252	-35.454	-0.623	1.811	0.030	1.915	4
6 pulsos	30.613	-7.362	-35.799	-0.403	1.701	-0.315	1.776	4
6 pulsos	30.692	-7.352	-35.823	-0.324	1.711	-0.339	1.774	4
6 pulsos	30.652	-7.368	-35.847	-0.364	1.695	-0.363	1.771	4
6 pulsos	30.789	-7.592	-35.597	-0.227	1.471	-0.113	1.493	4
6 pulsos	30.73	-7.373	-35.884	-0.286	1.690	-0.400	1.760	4
6 pulsos	30.448	-7.222	-35.673	-0.568	1.841	-0.189	1.936	4
6 pulsos	30.443	-7.258	-35.594	-0.573	1.805	-0.110	1.897	4
6 pulsos	30.471	-7.242	-35.576	-0.545	1.821	-0.092	1.903	4
6 pulsos	30.35	-7.316	-35.332	-0.666	1.747	0.152	1.876	4
6 pulsos	30.735	-7.782	-35.222	-0.281	1.281	0.262	1.337	4
6 pulsos	30.781	-7.612	-35.635	-0.235	1.451	-0.151	1.478	4
6 pulsos	30.756	-7.499	-35.81	-0.260	1.564	-0.326	1.619	4
6 pulsos	30.638	-7.318	-35.842	-0.378	1.745	-0.358	1.821	4
6 pulsos	30.572	-7.358	-35.764	-0.444	1.705	-0.280	1.784	4
6 pulsos	30.72	-7.454	-35.92	-0.296	1.609	-0.436	1.693	4
7 pulsos	30.619	-8.04	-35.227	-0.397	1.023	0.257	1.127	4
7 pulsos	30.236	-7.225	-35.653	-0.780	1.838	-0.169	2.004	4
7 pulsos	30.233	-7.214	-35.638	-0.783	1.849	-0.154	2.014	4
7 pulsos	30.302	-7.247	-35.686	-0.714	1.816	-0.202	1.962	4

Muestra	L*	a*	b*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*	Cambio de Color en Escala de Grises
7 pulsos	30.391	-7.26	-35.802	-0.625	1.803	-0.318	1.935	4
7 pulsos	30.344	-7.337	-35.679	-0.672	1.726	-0.195	1.862	4
7 pulsos	30.3	-7.285	-35.653	-0.716	1.778	-0.169	1.924	4
7 pulsos	29.965	-7.2	-35.232	-1.051	1.863	0.252	2.154	4
7 pulsos	30.083	-7.249	-35.392	-0.933	1.814	0.092	2.042	4
7 pulsos	30.227	-7.321	-35.517	-0.789	1.742	-0.033	1.913	4
7 pulsos	29.978	-7.164	-35.328	-1.038	1.899	0.156	2.170	4
7 pulsos	30.262	-7.286	-35.701	-0.754	1.777	-0.217	1.942	4
7 pulsos	30.212	-7.336	-35.653	-0.804	1.727	-0.169	1.912	4
7 pulsos	30.208	-7.277	-35.584	-0.808	1.786	-0.100	1.963	4
7 pulsos	30.291	-7.526	-35.307	-0.725	1.537	0.177	1.709	4
7 pulsos	30.657	-7.802	-35.338	-0.359	1.261	0.146	1.319	4
7 pulsos	30.411	-7.515	-35.507	-0.605	1.548	-0.023	1.662	4
7 pulsos	30.19	-7.324	-35.495	-0.826	1.739	-0.011	1.925	4
7 pulsos	30.32	-7.362	-35.563	-0.696	1.701	-0.079	1.840	4
7 pulsos	30.38	-7.277	-35.659	-0.636	1.786	-0.175	1.904	4
8 pulsos	30.048	-7.395	-34.84	-0.968	1.668	0.644	2.033	3-4
8 pulsos	30.124	-7.312	-35.077	-0.892	1.751	0.407	2.007	3-4
8 pulsos	29.988	-7.396	-34.815	-1.028	1.667	0.669	2.070	3-4
8 pulsos	30.025	-7.341	-35.043	-0.991	1.722	0.441	2.035	3-4
8 pulsos	29.966	-7.298	-34.965	-1.050	1.765	0.519	2.118	3-4
8 pulsos	29.848	-7.295	-34.775	-1.168	1.768	0.709	2.234	3-4
8 pulsos	29.919	-7.349	-34.814	-1.097	1.714	0.670	2.142	3-4
8 pulsos	29.853	-7.299	-34.877	-1.163	1.764	0.607	2.198	3-4
8 pulsos	30.039	-7.368	-34.965	-0.977	1.695	0.519	2.024	3-4
8 pulsos	30.065	-7.251	-35.477	-0.951	1.812	0.007	2.046	3-4
8 pulsos	29.942	-7.226	-35.029	-1.074	1.837	0.455	2.176	3-4
8 pulsos	30.076	-7.408	-34.939	-0.940	1.655	0.545	1.980	3-4
8 pulsos	29.927	-7.354	-34.705	-1.089	1.709	0.779	2.171	3-4
8 pulsos	30.005	-7.403	-34.821	-1.011	1.660	0.663	2.054	3-4
8 pulsos	29.866	-7.268	-34.892	-1.150	1.795	0.592	2.213	3-4
8 pulsos	29.928	-7.119	-35.251	-1.088	1.944	0.233	2.240	3-4
8 pulsos	29.968	-7.239	-35.062	-1.048	1.824	0.422	2.146	3-4
8 pulsos	30.042	-7.207	-35.37	-0.974	1.856	0.114	2.099	3-4
8 pulsos	29.892	-7.131	-35.315	-1.124	1.932	0.169	2.242	3-4
8 pulsos	30.068	-7.252	-35.322	-0.948	1.811	0.162	2.051	3-4

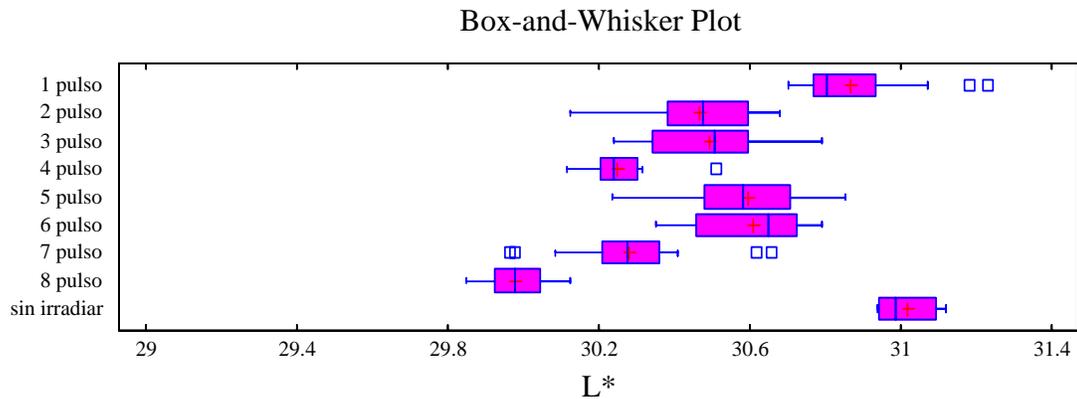
c) Análisis Estadístico del Parámetro de Color L*.

i) Sumario Estadístico.

Muestra	Mediciones	Media	Varianza	Desv. Std.
1 pulso	20	30.8665	0.0230059	0.151677
2 pulso	20	30.4678	0.0225222	0.150074
3 pulso	20	30.4928	0.0273829	0.165478
4 pulso	20	30.2505	0.00776847	0.0881389
5 pulso	20	30.5958	0.0261145	0.1616
6 pulso	20	30.6099	0.0196089	0.140032
7 pulso	20	30.2804	0.0293502	0.171319
8 pulso	20	29.9795	0.0065731	0.0810747
sin irradiar	5	31.0164	0.0073893	0.085961
Total	165	30.4603	0.0911461	0.301904

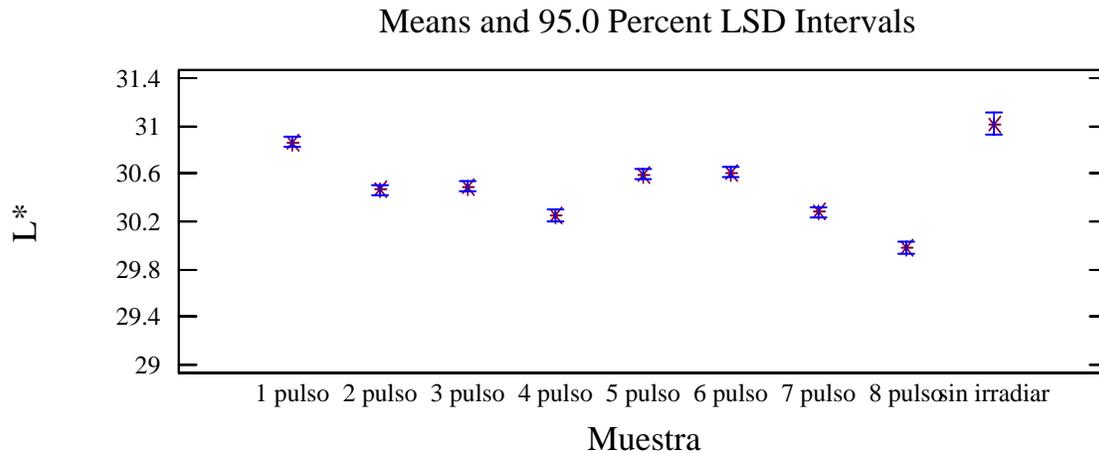
Muestra	Mínimo	Máximo	Rango
1 pulso	30.701	31.232	0.531
2 pulso	30.124	30.682	0.558
3 pulso	30.24	30.792	0.552
4 pulso	30.116	30.513	0.397
5 pulso	30.236	30.854	0.618
6 pulso	30.35	30.789	0.439
7 pulso	29.965	30.657	0.692
8 pulso	29.848	30.124	0.276
sin irradiar	30.937	31.12	0.183
Total	29.848	31.232	1.384

ii) Diagrama de Caja y Bigote.



iii) Prueba Fisher LSD. Esta prueba nos permite validar las diferencias estadísticas entre uno y otro valor.

Prueba de rangos múltiples para L^* .



Method: 95.0 percent LSD

Muestra	Mediciones	Media	Grupos Homogéneos
8 pulso	20	29.9795	X
4 pulso	20	30.2505	X
7 pulso	20	30.2804	X
2 pulso	20	30.4678	X
3 pulso	20	30.4928	X
5 pulso	20	30.5958	X
6 pulso	20	30.6099	X
1 pulso	20	30.8665	X
sin irradiar	5	31.0164	X

Contrast	Diferencia	+/- Límites
1 pulso - 2 pulso	*0.39865	0.0882492
1 pulso - 3 pulso	*0.37365	0.0882492
1 pulso - 4 pulso	*0.61595	0.0882492
1 pulso - 5 pulso	*0.2707	0.0882492
1 pulso - 6 pulso	*0.25665	0.0882492
1 pulso - 7 pulso	*0.58605	0.0882492
1 pulso - 8 pulso	*0.88705	0.0882492
1 pulso - sin irradiar	*-0.1499	0.139534

2 pulso - 3 pulso	-0.025	0.0882492
2 pulso - 4 pulso	*0.2173	0.0882492
2 pulso - 5 pulso	*-0.12795	0.0882492
2 pulso - 6 pulso	*-0.142	0.0882492
2 pulso - 7 pulso	*0.1874	0.0882492
2 pulso - 8 pulso	*0.4884	0.0882492
2 pulso - sin irradiar	*-0.54855	0.139534
3 pulso - 4 pulso	*0.2423	0.0882492
3 pulso - 5 pulso	*-0.10295	0.0882492
3 pulso - 6 pulso	*-0.117	0.0882492
3 pulso - 7 pulso	*0.2124	0.0882492
3 pulso - 8 pulso	*0.5134	0.0882492
3 pulso - sin irradiar	*-0.52355	0.139534
4 pulso - 5 pulso	*-0.34525	0.0882492
4 pulso - 6 pulso	*-0.3593	0.0882492
4 pulso - 7 pulso	-0.0299	0.0882492
4 pulso - 8 pulso	*0.2711	0.0882492
4 pulso - sin irradiar	*-0.76585	0.139534
5 pulso - 6 pulso	-0.01405	0.0882492
5 pulso - 7 pulso	*0.31535	0.0882492
5 pulso - 8 pulso	*0.61635	0.0882492
5 pulso - sin irradiar	*-0.4206	0.139534
6 pulso - 7 pulso	*0.3294	0.0882492
6 pulso - 8 pulso	*0.6304	0.0882492
6 pulso - sin irradiar	*-0.40655	0.139534
7 pulso - 8 pulso	*0.301	0.0882492
7 pulso - sin irradiar	*-0.73595	0.139534
8 pulso - sin irradiar	*-1.03695	0.139534

NOTA: En el valor donde aparece un * denota diferencia estadística significativa.

La tabla anterior muestra el proceso de comparación múltiple para determinar cuales medias son significativamente diferentes entre ellas. También se muestra la diferencia estimada entre cada par de comparaciones de media donde un * denota diferencia estadística significativa.

El análisis muestra que se tiene 33 pares de comparación con asterisco, indicando que estos pares muestran una diferencia significativa con un nivel de confianza del 95%.

Además muestra que se tienen 6 grupos homogéneos usando una X en la columna para identificarlos. X's alineadas muestran que no se tiene diferencia significativa. Con este método existe un 5.0% de riesgo de concluir que un par de medias es significativamente diferente cuando la diferencia entre ellas no sea significativa.

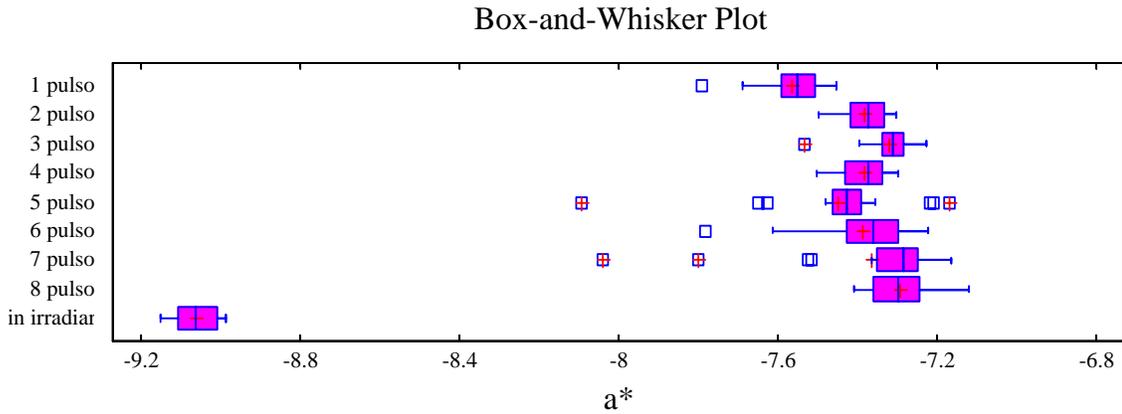
d) Análisis Estadístico del Parámetro de Color a*.

i) Sumario Estadístico.

Muestra	Mediciones	Medio	Varianza	Desv. Std.
1 pulso	20	-7.56265	0.00713687	0.08448
2 pulso	20	-7.38095	0.00305816	0.0553006
3 pulso	20	-7.32005	0.00428879	0.0654888
4 pulso	20	-7.3822	0.0031188	0.0558462
5 pulso	20	-7.4477	0.0368377	0.191931
6 pulso	20	-7.38765	0.0198461	0.140876
7 pulso	20	-7.36235	0.0461414	0.214805
8 pulso	20	-7.29555	0.00720058	0.0848562
sin irradiar	5	-9.0628	0.0045962	0.0677953
Total	165	-7.44301	0.103221	0.321281

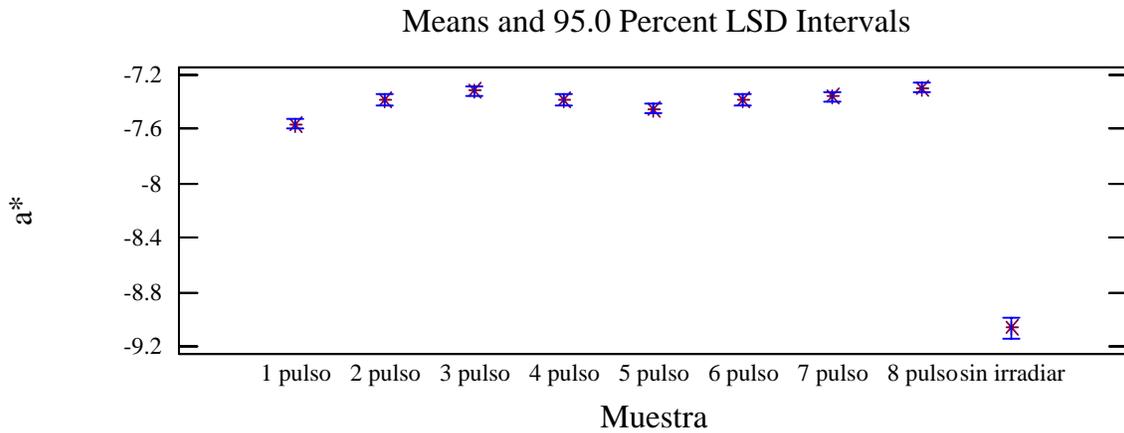
Muestra	Mínimo	Máximo	Rango
1 pulso	-7.79	-7.452	0.338
2 pulso	-7.499	-7.304	0.195
3 pulso	-7.535	-7.225	0.31
4 pulso	-7.504	-7.298	0.206
5 pulso	-8.095	-7.17	0.925
6 pulso	-7.782	-7.222	0.56
7 pulso	-8.04	-7.164	0.876
8 pulso	-7.408	-7.119	0.289
sin irradiar	-9.151	-8.985	0.166
Total	-9.151	-7.119	2.032

ii) Diagrama de Caja y Bigote.



iii) Prueba Fisher LSD.

Prueba de rangos múltiples para a^* :



Method: 95.0 percent LSD

Muestra	Mediciones	Media	Grupos Homogéneos
---------	------------	-------	-------------------

sin irradiar	5	-9.0628	X
1 pulso	20	-7.56265	X
5 pulso	20	-7.4477	X
6 pulso	20	-7.38765	XX
4 pulso	20	-7.3822	XX
2 pulso	20	-7.38095	XX
7 pulso	20	-7.36235	XX
3 pulso	20	-7.32005	XX
8 pulso	20	-7.29555	X

Contrastes	Diferencia	+/- Límites
1 pulso - 2 pulso	*-0.1817	0.0781735
1 pulso - 3 pulso	*-0.2426	0.0781735
1 pulso - 4 pulso	*-0.18045	0.0781735
1 pulso - 5 pulso	*-0.11495	0.0781735
1 pulso - 6 pulso	*-0.175	0.0781735
1 pulso - 7 pulso	*-0.2003	0.0781735
1 pulso - 8 pulso	*-0.2671	0.0781735
1 pulso - sin irradiar	*1.50015	0.123603
2 pulso - 3 pulso	-0.0609	0.0781735
2 pulso - 4 pulso	0.00125	0.0781735
2 pulso - 5 pulso	0.06675	0.0781735
2 pulso - 6 pulso	0.0067	0.0781735
2 pulso - 7 pulso	-0.0186	0.0781735
2 pulso - 8 pulso	*-0.0854	0.0781735
2 pulso - sin irradiar	*1.68185	0.123603
3 pulso - 4 pulso	0.06215	0.0781735
3 pulso - 5 pulso	*0.12765	0.0781735
3 pulso - 6 pulso	0.0676	0.0781735
3 pulso - 7 pulso	0.0423	0.0781735
3 pulso - 8 pulso	-0.0245	0.0781735
3 pulso - sin irradiar	*1.74275	0.123603
4 pulso - 5 pulso	0.0655	0.0781735
4 pulso - 6 pulso	0.00545	0.0781735
4 pulso - 7 pulso	-0.01985	0.0781735
4 pulso - 8 pulso	*-0.08665	0.0781735
4 pulso - sin irradiar	*1.6806	0.123603
5 pulso - 6 pulso	-0.06005	0.0781735
5 pulso - 7 pulso	*-0.08535	0.0781735
5 pulso - 8 pulso	*-0.15215	0.0781735
5 pulso - sin irradiar	*1.6151	0.123603
6 pulso - 7 pulso	-0.0253	0.0781735
6 pulso - 8 pulso	*-0.0921	0.0781735
6 pulso - sin irradiar	*1.67515	0.123603
7 pulso - 8 pulso	-0.0668	0.0781735
7 pulso - sin irradiar	*1.70045	0.123603
8 pulso - sin irradiar	*1.76725	0.123603

NOTA: En el valor donde aparece un * denota diferencia estadística significativa.

La tabla anterior muestra el proceso de comparación múltiple para determinar cuales medias son significativamente diferentes entre ellas. También se muestra la diferencia estimada entre cada par de comparaciones de media donde un * denota diferencia estadística significativa.

El análisis muestra que se tiene 21 pares de comparación con asterisco, indicando que estos pares muestran una diferencia significativa con un nivel de confianza del 95%. Además muestra que se tienen 5 grupos homogéneos usando una X en la columna para identificarlos. X's alineadas muestran que no se tiene diferencia significativa.

Con este método existe un 5.0% de riesgo de concluir que un par de medias es significativamente diferente cuando la diferencia entre ellas no sea significativa.

e) Análisis Estadístico del Parámetro de Color b*.

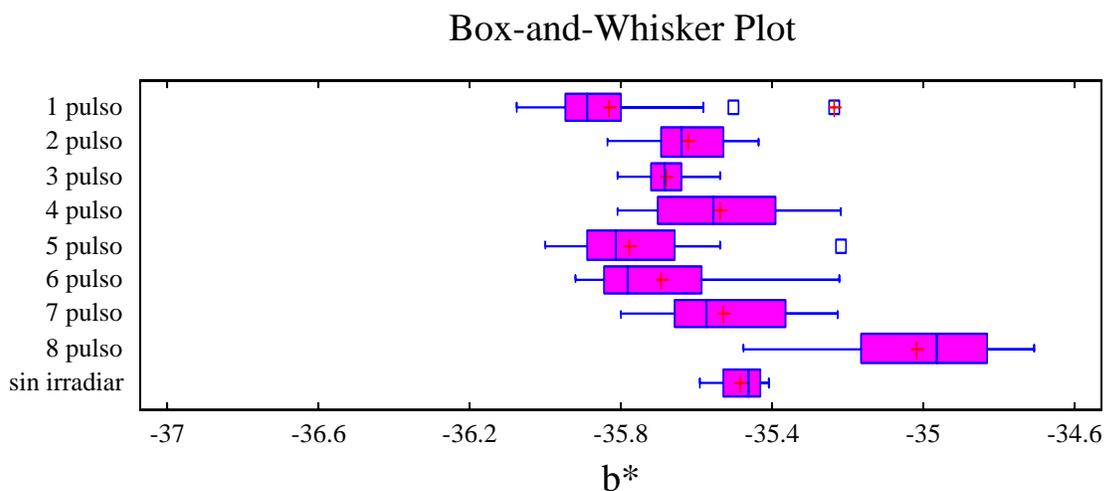
i) Sumario Estadístico.

Muestra	Mediciones	Media	Varianza	Desv. Std.
1 pulso	20	-35.8322	0.03828	0.195653
2 pulso	20	-35.6205	0.0113218	0.106404
3 pulso	20	-35.6801	0.00402458	0.0634395
4 pulso	20	-35.5357	0.0342175	0.18498
5 pulso	20	-35.7765	0.0323646	0.179902
6 pulso	20	-35.6925	0.0398693	0.199673
7 pulso	20	-35.5307	0.0292856	0.17113
8 pulso	20	-35.0177	0.0491375	0.22167
sin irradiar	5	-35.484	0.005647	0.0751465
Total	165	-35.5826	0.0825689	0.287348
Muestra	Mínimo	Máximo	Rango	
1 pulso	-36.076	-35.234	0.842	
2 pulso	-35.835	-35.434	0.401	
3 pulso	-35.807	-35.54	0.267	
4 pulso	-35.807	-35.219	0.588	
5 pulso	-35.998	-35.217	0.781	
6 pulso	-35.92	-35.222	0.698	

7 pulso	-35.802	-35.227	0.575
8 pulso	-35.477	-34.705	0.772
sin irradiar	-35.589	-35.407	0.182

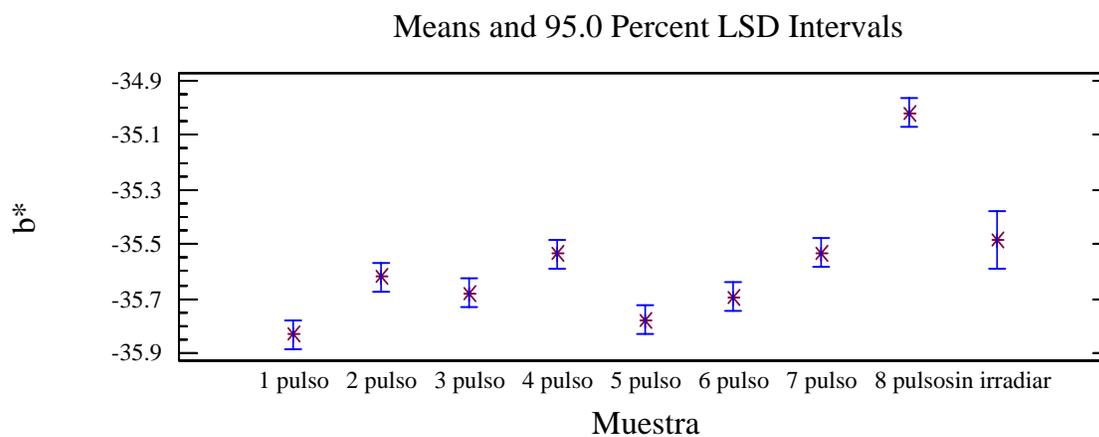
Total	-36.076	-34.705	1.371

ii) Diagrama de Caja y Bigote.



iii) Prueba Fisher LSD.

Prueba de rangos múltiples para a^* :



Method: 95.0 percent LSD

Muestra Mediciones Media Grupos Homogéneos

1 pulso	20	-35.8322	X
5 pulso	20	-35.7765	XX
6 pulso	20	-35.6925	XX
3 pulso	20	-35.6801	XX
2 pulso	20	-35.6205	XX
4 pulso	20	-35.5357	X
7 pulso	20	-35.5307	X
sin irradiar	5	-35.484	X
8 pulso	20	-35.0177	X

Contrastes Diferencia +/- Límites

1 pulso - 2 pulso	*-0.2117	0.106726
1 pulso - 3 pulso	*-0.15215	0.106726
1 pulso - 4 pulso	*-0.29655	0.106726
1 pulso - 5 pulso	-0.0557	0.106726
1 pulso - 6 pulso	*-0.13965	0.106726
1 pulso - 7 pulso	*-0.3015	0.106726
1 pulso - 8 pulso	*-0.8145	0.106726
1 pulso - sin irradiar	*-0.3482	0.168749
2 pulso - 3 pulso	0.05955	0.106726
2 pulso - 4 pulso	-0.08485	0.106726
2 pulso - 5 pulso	*0.156	0.106726
2 pulso - 6 pulso	0.07205	0.106726
2 pulso - 7 pulso	-0.0898	0.106726
2 pulso - 8 pulso	*-0.6028	0.106726
2 pulso - sin irradiar	-0.1365	0.168749
3 pulso - 4 pulso	*-0.1444	0.106726
3 pulso - 5 pulso	0.09645	0.106726
3 pulso - 6 pulso	0.0125	0.106726
3 pulso - 7 pulso	*-0.14935	0.106726
3 pulso - 8 pulso	*-0.66235	0.106726
3 pulso - sin irradiar	*-0.19605	0.168749
4 pulso - 5 pulso	*0.24085	0.106726
4 pulso - 6 pulso	*0.1569	0.106726
4 pulso - 7 pulso	-0.00495	0.106726
4 pulso - 8 pulso	*-0.51795	0.106726
4 pulso - sin irradiar	-0.05165	0.168749
5 pulso - 6 pulso	-0.08395	0.106726
5 pulso - 7 pulso	*-0.2458	0.106726
5 pulso - 8 pulso	*-0.7588	0.106726

5 pulso - sin irradiar	*-0.2925	0.168749
6 pulso - 7 pulso	*-0.16185	0.106726
6 pulso - 8 pulso	*-0.67485	0.106726
6 pulso - sin irradiar	*-0.20855	0.168749
7 pulso - 8 pulso	*-0.513	0.106726
7 pulso - sin irradiar	-0.0467	0.168749
8 pulso - sin irradiar	*0.4663	0.168749

NOTA: En el valor donde aparece un * denota diferencia estadística significativa.

La tabla anterior muestra el proceso de comparación múltiple para determinar cuales medias son significativamente diferentes entre ellas. También se muestra la diferencia estimada entre cada par de comparaciones de media donde un * denota diferencia estadística significativa.

El análisis muestra que se tiene 24 pares de comparación con asterisco, indicando que estos pares muestran una diferencia significativa con un nivel de confianza del 95%. Además muestra que se tienen 5 grupos homogéneos usando una X en la columna para identificarlos. X's alineadas muestran que no se tiene diferencia significativa. Con este método existe un 5.0% de riesgo de concluir que un par de medias es significativamente diferente cuando la diferencia entre ellas no sea significativa.

f) Análisis Estadístico del Parámetro de Color ΔE^* .

i) Sumario Estadístico.

Muestra	Mediciones	Media	Varianza	Desv. Std.
1 pulso	20	1.5651	0.0101186	0.100591
2 pulsos	20	1.78192	0.00841007	0.0917064
3 pulsos	20	1.83768	0.00692352	0.0832077
4 pulsos	20	1.85772	0.00562539	0.0750026
5 pulsos	20	1.7081	0.0462608	0.215083
6 pulsos	20	1.75104	0.0253988	0.15937
7 pulsos	20	1.86409	0.0632024	0.251401
8 pulsos	20	2.11395	0.00721815	0.0849597

sin irradiar	5	0.0	0.0	0.0

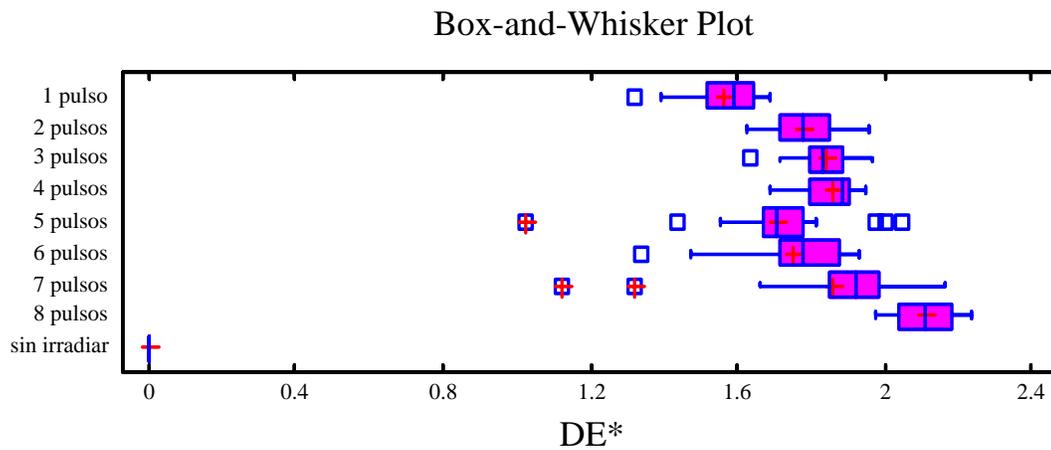
Total	165	1.7551	0.138005	0.37149

Muestra	Mínimo	Máximo	Rango	

1 pulso	1.32241	1.68499	0.36258	
2 pulsos	1.62427	1.9613	0.337027	
3 pulsos	1.63271	1.96373	0.33102	
4 pulsos	1.68878	1.9487	0.259919	
5 pulsos	1.02337	2.04803	1.02466	
6 pulsos	1.33727	1.93581	0.59854	
7 pulsos	1.12699	2.1698	1.04282	
8 pulsos	1.97983	2.24158	0.261748	
sin irradiar	0.0	0.0	0.0	

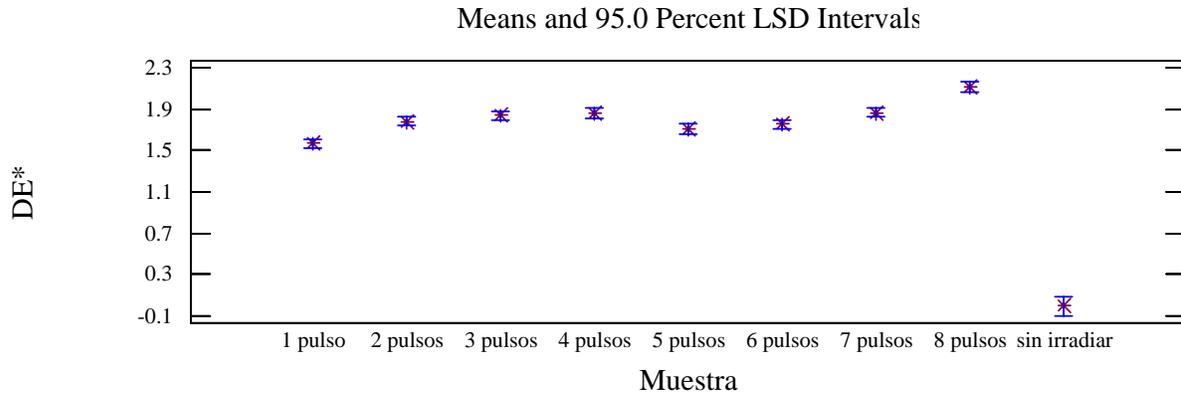
Total	0.0	2.24158	2.24158	

ii) Diagrama de Caja y Bigote.



iii) Prueba Fisher LSD

Prueba de rangos múltiples para α^* :



Method: 95.0 percent LSD

Muestra Mediciones Media Grupos Homogéneos

sin irradiar	5	0.0	X
1 pulso	20	1.5651	X
5 pulsos	20	1.7081	X
6 pulsos	20	1.75104	XX
2 pulsos	20	1.78192	XXX
3 pulsos	20	1.83768	XX
4 pulsos	20	1.85772	X
7 pulsos	20	1.86409	X
8 pulsos	20	2.11395	X

Contrast Diferencia +/- Límites

1 pulso - 2 pulsos	*-0.216812	0.0907124
1 pulso - 3 pulsos	*-0.272571	0.0907124
1 pulso - 4 pulsos	*-0.292613	0.0907124
1 pulso - 5 pulsos	*-0.142997	0.0907124
1 pulso - 6 pulsos	*-0.185933	0.0907124
1 pulso - 7 pulsos	*-0.298985	0.0907124
1 pulso - 8 pulsos	*-0.548845	0.0907124
1 pulso - sin irradiar	*1.5651	0.143429
2 pulsos - 3 pulsos	-0.0557592	0.0907124
2 pulsos - 4 pulsos	-0.0758014	0.0907124
2 pulsos - 5 pulsos	0.0738147	0.0907124

2 pulsos - 6 pulsos	0.0308788	0.0907124
2 pulsos - 7 pulsos	-0.082173	0.0907124
2 pulsos - 8 pulsos	*-0.332033	0.0907124
2 pulsos - sin irradiar	*1.78192	0.143429
3 pulsos - 4 pulsos	-0.0200422	0.0907124
3 pulsos - 5 pulsos	*0.129574	0.0907124
3 pulsos - 6 pulsos	0.086638	0.0907124
3 pulsos - 7 pulsos	-0.0264138	0.0907124
3 pulsos - 8 pulsos	*-0.276274	0.0907124
3 pulsos - sin irradiar	*1.83768	0.143429
4 pulsos - 5 pulsos	*0.149616	0.0907124
4 pulsos - 6 pulsos	*0.10668	0.0907124
4 pulsos - 7 pulsos	-0.00637157	0.0907124
4 pulsos - 8 pulsos	*-0.256231	0.0907124
4 pulsos - sin irradiar	*1.85772	0.143429
5 pulsos - 6 pulsos	-0.0429358	0.0907124
5 pulsos - 7 pulsos	*-0.155988	0.0907124
5 pulsos - 8 pulsos	*-0.405848	0.0907124
5 pulsos - sin irradiar	*1.7081	0.143429
6 pulsos - 7 pulsos	*-0.113052	0.0907124
6 pulsos - 8 pulsos	*-0.362912	0.0907124
6 pulsos - sin irradiar	*1.75104	0.143429
7 pulsos - 8 pulsos	*-0.24986	0.0907124
7 pulsos - sin irradiar	*1.86409	0.143429
8 pulsos - sin irradiar	*2.11395	0.143429

NOTA: En el valor donde aparece un * denota diferencia estadística significativa.

La tabla anterior muestra el proceso de comparación múltiple para determinar cuales medias son significativamente diferentes entre ellas. También se muestra la diferencia estimada entre cada par de comparaciones de media donde un * denota diferencia estadística significativa.

El análisis muestra que se tiene 26 pares de comparación con asterisco, indicando que estos pares muestran una diferencia significativa con un nivel de confianza del 95%. Además muestra que se tienen 6 grupos homogéneos usando una X en la columna para identificarlos. X's alineadas muestran que no se tiene diferencia significativa.

Con este método existe un 5.0% de riesgo de concluir que un par de medias es significativamente diferente cuando la diferencia entre ellas no sea significativa.

iv) Gráfica del Promedio de ΔE^* contra número de pulsos.

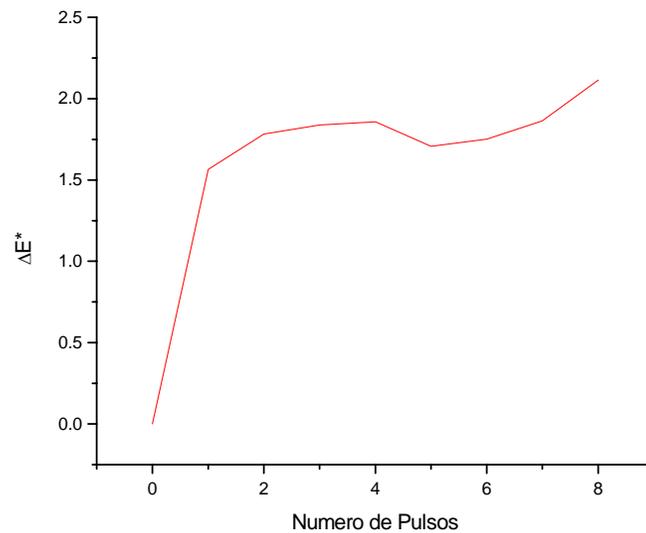


Fig. 4.8 Gráfica de número de pulsos contra ΔE^* obtenida con el láser de Nd:YAG en la réplica 2.

La gráfica anterior muestra un comportamiento similar al obtenido en la réplica 1 con este mismo tipo de láser; ya que ΔE^* se incrementa conforme incrementa el número de pulsos, obteniéndose un máximo en 4 pulsos, en 5 pulsos se tiene un decremento, y a partir de este punto comienza a incrementarse nuevamente hasta obtener otro máximo en 8 pulsos.

APÉNDICE V

RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS MUESTRAS SOMETIDAS A ENVEJECIMIENTO ACELERADO EN EL “WEATHER-O-METER”.

a) Reflectancia. Enseguida se anexa el gran promedio de los valores de reflectancia de las muestras expuestas a diferentes tiempos de exposición.

λ (nm)	rey 32	200 hr	400 hr	492 hr	737 hr
360	2.394	2.435	3.106	3.110	3.154
370	2.464	2.511	3.190	3.190	3.267
380	3.097	3.195	3.907	3.919	3.993
390	4.861	4.995	5.793	5.828	5.887
400	7.849	7.917	8.853	8.899	8.953
410	10.927	10.915	11.955	12.011	12.060
420	12.564	12.509	13.637	13.693	13.746
430	15.203	15.088	16.301	16.375	16.421
440	20.130	19.893	21.158	21.275	21.271
450	23.541	23.198	24.578	24.685	24.642
460	23.872	23.660	25.167	25.263	25.275
470	22.921	22.925	24.542	24.641	24.688
480	20.774	20.954	22.614	22.700	22.822
490	18.458	18.748	20.400	20.479	20.638
500	15.988	16.328	17.901	17.971	18.155
510	12.910	13.247	14.695	14.744	14.950
520	9.745	10.008	11.289	11.322	11.516
530	7.197	7.386	8.458	8.481	8.672
540	5.225	5.346	6.243	6.250	6.409
550	3.680	3.748	4.480	4.476	4.629
560	2.692	2.732	3.336	3.326	3.436
570	2.209	2.250	2.770	2.762	2.852
580	1.989	2.031	2.512	2.503	2.586
590	1.869	1.916	2.371	2.360	2.441
600	1.812	1.848	2.279	2.264	2.336
610	1.758	1.804	2.219	2.203	2.279
620	1.736	1.793	2.194	2.177	2.242
630	1.741	1.769	2.168	2.147	2.229
640	1.725	1.764	2.158	2.138	2.220
650	1.724	1.785	2.171	2.156	2.237
660	1.737	1.798	2.181	2.166	2.247
670	1.732	1.787	2.171	2.154	2.238
680	1.728	1.760	2.140	2.120	2.196
690	1.708	1.747	2.110	2.091	2.180
700	1.727	1.767	2.116	2.096	2.175
710	1.807	1.855	2.191	2.174	2.247
720	1.980	2.030	2.362	2.345	2.425

730	2.259	2.321	2.658	2.642	2.706
740	3.034	3.141	3.502	3.496	3.567
750	5.500	5.727	6.140	6.183	6.264

b) Valores individuales de los parámetros de color. Enseguida se listan los valores individuales de los parámetros de color. Cabe mencionar que la comparación se realizó tomando la media de las mediciones de la referencia.

Muestra	L*	a*	b*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*	Cambio de color en Escala de Grises
Ref.	31.09	-8.664	-35.959					
Ref.	31.08	-8.595	-36.138					
Ref.	31.07	-8.981	-35.815					
Ref.	31.006	-8.887	-35.936					
Media Ref.	31.06	-8.7818	-35.96					
200 hr	31.253	-9.800	-35.281	0.193	-1.018	0.681	1.240	4-5
200 hr	31.282	-9.896	-35.377	0.222	-1.114	0.585	1.278	4-5
200 hr	31.229	-9.780	-35.219	0.169	-0.998	0.743	1.256	4-5
200 hr	31.286	-9.816	-35.171	0.226	-1.034	0.791	1.322	4-5
400 hr	33.043	-10.892	-34.571	1.983	-2.110	1.391	3.213	3
400 hr	33.146	-10.852	-34.709	2.086	-2.070	1.253	3.195	3
400 hr	33.290	-10.690	-34.494	2.230	-1.908	1.468	3.282	3
400 hr	33.221	-10.912	-34.660	2.161	-2.130	1.302	3.302	3
492 hr	33.146	-10.852	-34.709	2.086	-2.070	1.253	3.195	3
492 hr	33.201	-10.856	-34.780	2.141	-2.074	1.182	3.207	3
492 hr	33.329	-10.919	-34.713	2.269	-2.137	1.249	3.358	3
492 hr	33.204	-10.854	-34.699	2.144	-2.072	1.263	3.238	3
737 hr	33.595	-11.215	-34.419	2.535	-2.433	1.543	3.838	3
737 hr	33.608	-11.229	-34.416	2.548	-2.447	1.546	3.856	3
737 hr	33.300	-11.185	-34.242	2.240	-2.403	1.720	3.708	3
737 hr	33.443	-11.163	-34.218	2.383	-2.381	1.744	3.793	3