

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

**“Implementación y Validación de una Metodología
Económica para la Medición de Color Aplicada en
Alimentos”**

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO DE ALIMENTOS

Presentada por:

Galo Wenceslao Chuchuca Morán

Arianna Karina Dick Zambrano

Jaime Fernando Peñafiel Ube

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2012

AGRADECIMIENTO

A nuestra directora de tesis, Ing. Fabiola Cornejo y a la Ing. Grace Vásquez por su apoyo y confianza.

A la empresa TIOSA por habernos facilitado el uso de sus instalaciones.

A nuestros compañeros por habernos acompañado en esta etapa de nuestras vidas.

DEDICATORIA

A mis padres y hermanas.

Galo

DEDICATORIA

A mis padres, por su
incondicional apoyo y
confianza.

Arianna

DEDICATORIA

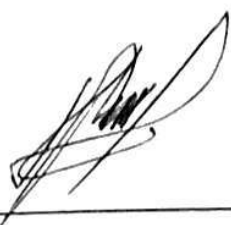
Dedico el resultado del presente trabajo a mi padre, quien además de su apoyo moral y económico, desde muy niño me incentivó un tenaz deseo continuo de aprendizaje y conocimiento, lo que a su vez creo en mí un enorme entusiasmo por la lectura, en especial todo aquello relacionado con las ciencias.

Merece un lugar muy especial mi recordada madre, para quien no significó ningún sacrificio el levantarse muy por la mañana durante todos mis años de estudio, especialmente en mi etapa universitaria, facilitándome todos los recursos necesarios para que pudiera cumplir con mis deberes de estudiante.

Sin el apoyo, dedicación y cariño de ambos hubiera sido muy difícil culminar con éxitos mis estudios

Fernando

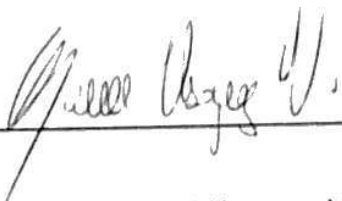
TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



Dr. Kléber Barcia V.
DECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE



Ing. Fabiola Cornejo Z.
DIRECTORA DE TESIS

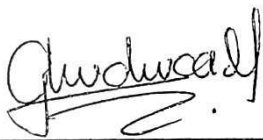


Ing. Grace Vásquez V.
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).



Galo Wencesalo Chuchuca M.



Arianna Karina Dick Z.



Jaime Fernando Peñafiel U.

RESUMEN

Este trabajo se realizó con la finalidad de implementar y validar un método económico de medición de color aplicado en alimentos, tomando como referencia un colorímetro Konika Minolta CR-400, ampliamente utilizado en la industria.

Para ello, fue necesaria la implementación de un Sistema de Visión Computarizada (SVC), compuesto por un escenario con condiciones de iluminación D65, una cámara digital CCD y un ordenador con software gráfico. La medición del color consistió en capturar imágenes a muestras de arroz con diferente tamaño de partícula, y pan con diferente estructura de la matriz alimentaria. El procesamiento de las imágenes se llevó a cabo con el software Adobe® Photoshop® CS5, empleando técnicas de preprocesamiento para mejorar la calidad de las imágenes obtenidas, segmentación para obtener la región de interés en la imagen, y promediado para conseguir un valor de color en coordenadas L^* , a^* y b^* , representativo del color de la muestra.

Con el fin de validar el SVC empleado en ésta tesis en alimentos con diferente tamaño de partícula, se utilizó arroz blanco que fue separado en tres partes iguales. Dos partes fueron molidas hasta obtener arroz quebrado (AE) y harina de arroz AH), dejando la tercera parte como arroz entero (AE); mientras que, para validar el SVC en alimentos con diferente estructura de la matriz alimentaria, se utilizó pan de hamburguesa (MG), en representación de un pan con miga gruesa; pan de molde (MF), en representación de un pan con miga fina, y la superficie de un pan precocido para una estructura cerrada completa (C).

Una vez analizados los datos, no fue posible validar el SVC, tomando como método de referencia un colorímetro Konika Minolta CR-400, debido a que se encontró diferencia significativa entre las mediciones de ambos equipos. Pero se pudo conocer estimaciones de cuantas unidades varían en las mediciones entre métodos.

Además, se analizó en el arroz, si el factor tamaño de partícula incidía en el color de la muestra, encontrando como resultado que si existe diferencia significativa en los valores obtenidos.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN	II
ÍNDICE GENERAL.....	IV
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XI
INTRODUCCIÓN	1
 CAPÍTULO 1	
1. GENERALIDADES	3
1.1. El color en los alimentos	3
1.2. Elementos de la percepción del color	7
1.3. Sistemas de medición de color	14
1.4. Equipos de medición de color	29
 CAPÍTULO 2	
2. METODOLOGÍA DE MEDICIÓN DE COLOR	36
2.1. Componentes del sistema	36
2.2. Procedimiento para toma, acondicionamiento y análisis de la muestra	43
2.3. Procesamiento y análisis de datos	46

CAPÍTULO 3

3. VALIDACIÓN DEL MÉTODO EN ALIMENTOS CON DIFERENTE TAMAÑO DE PARTÍCULA	53
3.1. Materiales	53
3.2. Comparación de medidas con método de referencia	55
3.3. Comparación de medidas entre muestras.	65
3.4. Análisis de Resultados.....	70

CAPÍTULO 4

4. APLICACIÓN DEL MÉTODO EN ALIMENTOS SEGÚN LA ESTRUCTURA DE LA MATRIZ ALIMENTARIA.....	77
4.1. Materiales	77
4.2. Comparación de medidas con método de referencia	79
4.3. Análisis de Resultados.....	89

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	94
---	----

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ABREVIATURAS

CIE	Commission Internationale de l'Eclairage
UV	Ultravioleta
ISO	International Organization for Standardization
arctan	Arcotangente
RGB	Red, Green, Blue
CMYK	Cyan, Magenta, Yellow, Black
nm	nanómetros
s.f.	Sin fecha
CIELAB	Sistema CIE L* a* b*
H V/C	Tono, claridad/croma
YR	Yellow-Red
X, Y, Z	Valores triestímulo
x, y, z	Coordenadas de cromaticidad
L, a, b	Coordenadas de color Hunter Lab
L* a* b*	Coordenadas de color CIELAB
L* C* h*	Luminosidad, croma y tono
sRGB	Standard Red, Green, Blue
d/0	Iluminación difusa/ángulo de visión 0°
mm	milímetro
SVC	Sistema de Visión Computarizada
CCD	Dispositivo de carga acoplada
cm	centímetro
K	Kelvin
CMOS	Semi-conductor de óxido de metal complementario
EV	Valor de exposición
g	gramos
m ²	metros cuadrados
AH	Harina de arroz

AQ	Arroz quebrado
AE	Arroz entero
n	Número de observaciones
vs.	Versus
IC	Intervalo de confianza
MG	Miga gruesa
MF	Miga fina
C	Estructura cerrada completa

SIMBOLOGÍA

$\bar{x}(\lambda)$	Funciones de coincidencia en la región de longitud de onda del rojo
$\bar{y}(\lambda)$	Funciones de coincidencia en la región de longitud de onda del verde
$\bar{z}(\lambda)$	Funciones de coincidencia en la región de longitud de onda del azul
λ	Longitud de onda
Δ	Delta
ΔE	Diferencia de color
\$	Dólares americanos
H_0	Hipótesis nula
H_1	Hipótesis alterna
%	Porcentaje
>	Mayor que
<	Menor que

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1. Círculo Cromático	10
Figura 1.2. Distribución de conos y bastones en la retina.....	12
Figura 1.3. Observador estándar CIE 1931	14
Figura 1.4. Sistema Munsell.....	16
Figura 1.5. Diagrama de cromaticidad	20
Figura 1.6. Escala de color Hunter Lab.....	21
Figura 1.7. Modelo CIELAB	25
Figura 1.8. Sistema de iluminación unidireccional	30
Figura 1.9. Colorímetro Konika Minolta CR-400	34
Figura 2.1. Dimensionamiento de la estructura.....	37
Figura 2.2. Procesamiento para toma, acondicionamiento y análisis de la muestra.....	45
Figura 2.3. Calibración de color de la pantalla	47
Figura 2.4. Introducción de la imagen al software:.....	48
Figura 2.5. Cambio del perfil de color	49
Figura 2.6. Ajuste del canal RGB.....	50
Figura 2.7. Segmentación de la imagen	51
Figura 2.8. Promediado de la imagen	51
Figura 2.9. Obtención de coordenadas L^* , a^* , y b^*	52
Figura 3.1. Muestras de arroz	54

Figura 3.2. Resumen Gráfico de la coordenada L^* medida por colorímetro Konika Minolta CR-400 para la muestra Arroz Entero (AE)	58
Figura 4.1. Muestras de pan	78
Figura 4.2. Resumen Gráfico para la coordenada L^* medida por el colorímetro Konika Minolta CR-400 para la muestra Pan de Hamburguesa (MG)	82

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
TABLA 1Especificaciones Konika Minolta CR-400	33
TABLA 2Coordenadas L^* , a^* y b^* para arroz entero según color del fondo del escenario	38
TABLA 3Coordenadas L^* , a^* , b^* según el balance de blancos	41
TABLA 4Costo del SVC	43
TABLA 5Tamaño de partícula de las muestras de arroz	54
TABLA 6Promedio de las mediciones de color en muestras de arroz	56
TABLA 7Valor p de la prueba de normalidad para las coordenadas de color de las muestras de arroz	59
TABLA 8Medianas de las coordenadas de color para las muestras de arroz	61
TABLA 9Colores contruidos a partir de las medianas para las muestras de arroz	62
TABLA 10Resultado de la prueba de Mann-Whitney de la coordenada L^* de la muestra arroz entero (AE).....	63
TABLA 11Valor p de la prueba de Mann-Whitney de las coordenadas de color para las muestras de arroz	64
TABLA 12Resultado de la prueba de Kruskal-Wallis entre las muestras de arroz para la coordenada L^*	67

TABLA 13.Valor p de la prueba de Kruskal-Wallis para las coordenadas de color L*, a* y b*	68
TABLA 14Resultado de la prueba de Mann-Whitney para la coordenada L* entre el Tratamiento 1 y el Tratamiento 2	69
TABLA 15Valor p de la prueba de Mann-Whitney entre tratamientos para las coordenadas de color	70
TABLA 16Tamaño de poro de las muestras de pan	78
TABLA 17Promedio de las mediciones de color en muestras de pan	80
TABLA 18Valor p de la prueba de normalidad para las coordenadas de color de las muestras de pan	83
TABLA 19Medianas de las coordenadas de color para las muestras de pan	85
TABLA 20Colores contruidos a partir de las medianas para las muestras de pan.....	86
TABLA 21Resultado de la prueba de Mann-Whitney para la coordenada L* de la muestra pan de hamburguesa (MG)	88
TABLA 22Valor p de la prueba de Mann-Whitney para las coordenadas de color de las muestras de pan.....	88

INTRODUCCIÓN

El color es una sensación generada a partir de la cantidad de luz reflejada por un objeto, al incidir sobre la retina del ojo humano; la percepción de dicha luz es procesada por el cerebro, dando una respuesta mental al estímulo producido en la retina. La percepción del color se ve afectada por la distribución espectral de la luz incidente, la capacidad del objeto para transformarla, y la fisiología del observador. Esto explica que el color que percibe el observador, no es una característica propia del objeto, ya que puede variar al cambiar la fuente de luz que incide sobre el mismo.

El color es un atributo que ayuda a inferir en la calidad de un producto, causando cierto rechazo por parte del consumidor, al percibir cambios o anomalías en su coloración. Sin embargo, cada consumidor describe el color de un producto de modo distinto, dando como resultado una amplia subjetividad. Por lo tanto, en la industria de alimentos es imprescindible contar con un equipo que permita medir este atributo, como es el colorímetro.

Los colorímetros, por lo general, poseen un costo elevado. Un método más económico y versátil para determinar el color en superficies de alimentos, comprende una cámara digital, un escenario con condiciones de iluminación establecidas, una computadora y un software gráfico.

En esta tesis, se busca implementar y validar un sistema de visión computarizada, como una metodología económica para la medición de color en alimentos, tomando como referencia un colorímetro Konika Minolta CR-400. El sistema quedará a disposición de los alumnos de la carrera de Ingeniería en Alimentos para estudios posteriores de características colorimétricas en productos de su interés.

CAPÍTULO 1

1. GENERALIDADES

1.1. El color en los alimentos

El color es un atributo muy importante a la hora de medir la calidad de un alimento, y en base a este se identifican muchas de las propiedades del mismo, de hecho, el color es el primer contacto que tiene el consumidor con los productos y posteriormente, los juzga por sus demás características sensoriales como textura, sabor, etc. Esto es contundente, ya que cuando el color de un alimento cambia (manteniendo su forma, sabor, aroma, etc.), se obtiene una respuesta de rechazo de parte de los consumidores, o incluso, de los catadores entrenados.

Es por ello que los procesadores de alimentos prestan una atención muy especial, tanto a la coloración de los ingredientes, como a los cambios de coloración de los productos durante su procesamiento, ya que ambos aspectos van a determinar la coloración del producto final.

Un ejemplo muy difundido es la coloración de los vinos, lo cual es un factor de elevada importancia para la definición de muchas de sus características. Otro ejemplo, tiene que ver con el color dorado de la superficie de un pan horneado y su aceptación o rechazo de parte del consumidor; así como procesos de deterioro de la mioglobina en carnes, grado de maduración en frutas, nivel de tostado en frutos secos y granos. En fin, se podrían citar muchos ejemplos pero lo cierto es que el color es una cuestión de percepción, dado a que el ojo humano difiere su visión de los colores, lo que provoca que cada persona defina de manera desigual las coloraciones de los diferentes alimentos, resultando así una amplia subjetividad (González, 2005).

Por estas razones es difícil comunicar objetivamente un color específico a otra persona sin tener algún tipo de norma como base de referencia, es por ello que en el pasado diferentes personas han creado métodos para cuantificar el color y expresarlo numéricamente con el objetivo de que todos pudiéramos comunicar los colores de un modo más sencillo y preciso (Konica Minolta Sensing Americas, 2011).

Los colores de los alimentos se deben a distintos compuestos, principalmente orgánicos, algunos de los cuales son el resultado del procesamiento y manejo del alimento. Otros son pigmentos naturales o colorantes sintéticos añadidos. Cuando se someten a tratamientos térmicos, los alimentos desarrollan tonalidades que van desde un ligero amarillo hasta un café intenso, debido a las reacciones de caramelización y de Maillard (Badui, 2006).

En ciertos alimentos líquidos, la coloración del alimento se debe al efecto de la dispersión de la luz, como es el caso de la leche, donde los causantes de dicha dispersión son principalmente los glóbulos de grasa, aunque las micelas de

caseína, el fosfato de calcio coloidal, los carotenos y la riboflavina también inciden en la dispersión. Cuanto más pequeños son los glóbulos de grasa, mayor será el efecto de la dispersión y mayor la blancura de la leche (Jácome y Molina, 2008).

La mayoría de los alimentos vegetales deben su color a sus correspondientes pigmentos. Los principales pigmentos responsables de la coloración de los vegetales son: carotenoides, cuyo color varía de amarillo a naranja y rojo; clorofilas, el pigmento vegetal que más abunda en la naturaleza, las hojas de la mayoría de las plantas deben su color verde a este pigmento; antocianinas, responsables de los colores rojo, naranja, azul y púrpura; flavonoides, pigmentos, generalmente amarillos; betalaínas, divididos en dos grandes clases, betacianinas de coloración rojo, y betaxantinas de color amarillo; y taninos, cuya coloración varía de amarillo-café a incoloro (Contreras, 2007).

1.2. Elementos de la percepción del color

Para el correcto entendimiento de la percepción del color son fundamentales 3 elementos: la fuente de luz, el objeto y el observador. La interacción de estos elementos da como resultado la visualización del objeto por parte del observador, que puede ser el ojo humano o un equipo de medición de color.

Fuente de luz

Los cuerpos emisores de luz, como el sol o lámparas, emiten diferentes longitudes de ondas electromagnéticas que al estimular nuestros ojos provocan la sensación del color. La luz blanca del sol es un conjunto de ondas, dentro del espectro de 380 a 770 nm, (García, 2012), que al separarse en sus componentes se pueden ubicar los distintos colores que percibimos.

La luz puede provenir de fuentes naturales y artificiales, y en cada caso posee una serie de características. La luz natural es más difícil de controlar pues cambia constantemente de

intensidad, dirección, calidad y color, mientras que en la luz artificial, todos los parámetros anotados anteriormente pueden controlarse (Monje, 2008).

Los sistemas de medición de color utilizan fuentes de luz estandarizadas para obtener respuestas a la visión del color, obviando factores externos que puedan provocar variabilidad en la medición. Originalmente a la fuente de emisión que representaba la luz del día se la conocía como iluminante C, pero actualmente ha sido reemplazada por el iluminante D65, que incluye un espectro UV, con el fin de acercarse cada vez más a las condiciones de luz solar (MacDougall, 2002). Los nombres de la serie de luz del día (daylight) comienzan con la letra D mayúscula y dos cifras que indican la temperatura de color aproximada. Así, D50 tiene una temperatura de 5000 K cuando el sol es de medio día, mientras que cuando hay nubes en el cielo, tiene unos 6500 K (Debuire, 2008).

Objeto

La luz que incide sobre un objeto es transformada de acuerdo a las características del mismo (forma, espesor, longitud, composición química, etc.), dando fenómenos como transmisión, reflexión, absorción y dispersión (MetAs & Metrólogos Asociados, 2009). De estos, los más importantes para la percepción del color son la reflexión y la absorción, ya que cuando una luz blanca incide sobre el objeto, parte del espectro es absorbido, reflejando únicamente el espectro correspondiente al color del objeto. Sin embargo, los componentes reflejados dependen de la luz con la que se ilumine el objeto, debido a que si un objeto rojo es iluminado con una luz monocromática diferente de la roja, el objeto parecerá negro porque ese único componente será absorbido (García, 2012).

La apariencia del color de un objeto percibido por el observador se basa en tres atributos psicológicos: tono (hue), croma (chroma) y claridad (value) (Capilla, Artigas y Pujol, 2002), que permiten identificar un color específico.

El tono es el primer atributo que describe un observador y está asociado con la longitud de onda del color dominante, sea este espectral o no (Camporeale y Dutt, 2006), y comprende matices como el rojo, amarillo, naranja, verde, azul y púrpura. En la figura 1.1.a se observa cómo la combinación de matices alrededor del círculo cromático forma diferentes tonos dominantes y complementarios.

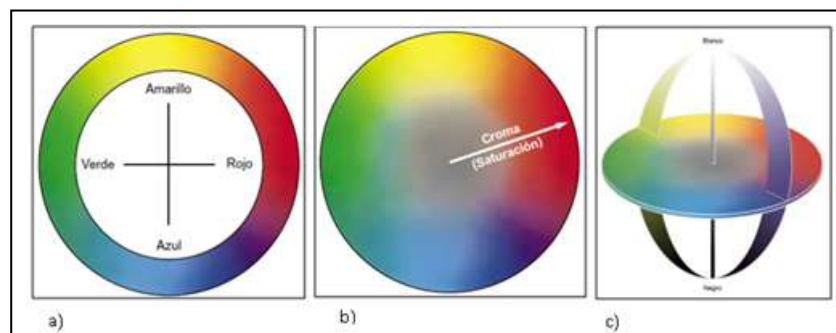


Figura 1.1. Círculo Cromático: a) Tono, b) Saturación, c) Claridad

Elaborado por: Chuchuca, Dick, Peñafiel

Fuente: X-Rite, Inc., 2002

El croma o saturación se refiere a la pureza cromática de un color respecto al gris; es decir, a medida que un color se satura, más puro es y menos gris posee (Netdisseny, 2009). En la figura 1.1.b se muestra la saturación según la tendencia de un color hacia el gris (centro) o al matiz puro (periferia).

La claridad o valor es una magnitud que obedece al nivel de intensidad de luz, primaria o secundaria, que percibe el observador. Las variaciones en la claridad de un color, a medida que se añade blanco o negro a un tono, pueden alterar la apariencia de dicho color.

Observador

El ser humano percibe la sensación del color cuando la luz (primaria o secundaria) se refleja en la retina, la cual posee 2 tipos de sensores a la radiación electromagnética: los bastones y los conos, estos funcionan junto a un sistema óptico para enviar la información captada a nuestro cerebro, que será finalmente el que nos muestre el color de los objetos.

Los bastones son células que detectan la intensidad de luz que llega a ellas, sin diferenciar las distintas longitudes de ondas de la radiación (Cortés, 2000); se activan en la oscuridad, permitiendo distinguir únicamente el negro, el blanco y distintos grises. Los conos, por el contrario, son los responsables de la percepción del color y se basan en el concepto triestímulo o

tricromático, puesto que son estimulados únicamente por las fracciones de longitudes de ondas del espectro de luz blanca correspondientes al verde, rojo y azul; se encuentran densamente empaquetados en el centro de la fóvea, donde ocupan un campo visual de 2° , siendo así, la base del observador estándar de la CIE 1931 (Commission Internationale de l'Eclairage). En el año 1964 fue reemplazado por el observador 10° que incluía una campo de visión más amplio, abarcando una mayor cantidad de bastones en el campo de detección (MacDougall, 2002), más parecido a la visión humana. La figura 1.2. muestra la cantidad de conos y bastones, según el ángulo del campo de visión.

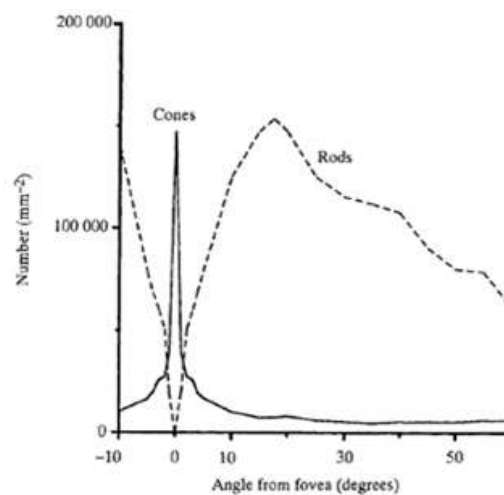


Figura 1.2. Distribución de conos y bastones en la retina

Fuente: MacDougall, 2002

La respuesta del observador se obtiene con las “curvas del observador patrón”, producto de la comparación de luces monocromáticas del espectro visible con muestra de los tres primarios (Calvo y Durán, 1997). En la figura 1.3. se muestran las curvas de sensibilidad espectral correspondientes al ojo humano, a las cuales se las conoce con el nombre de funciones de coincidencia: $\bar{x}(\lambda)$ tiene una alta sensibilidad en la región de longitud de onda del rojo, $\bar{y}(\lambda)$ en la región de longitud de onda del verde y $\bar{z}(\lambda)$ en la región de longitud de onda del azul. Los colores que vemos son el resultado de diferentes proporciones (estímulos) de $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ y $\bar{z}(\lambda)$ en la luz recibida desde un objeto (Konika Minolta Sensing, Inc., 2003).

Asimismo, la luminosidad está directamente relacionada con la sensibilidad del ojo humano mostrando una respuesta a la misma cantidad de energía a diferentes longitudes de onda (Calvo, et al., 1997). Los conos operan en condiciones de visión diurna o de alta iluminación, también llamada visión fotópica, que presenta una curva de luminosidad con un máximo de 550 nm. Mientras que en condiciones de visión nocturna o de escasa iluminación, también llamada visión escotópica, actúan los bastones con una curva de luminosidad

que alcanza un máximo alrededor de los 505 nm (Rabanal, 2010).

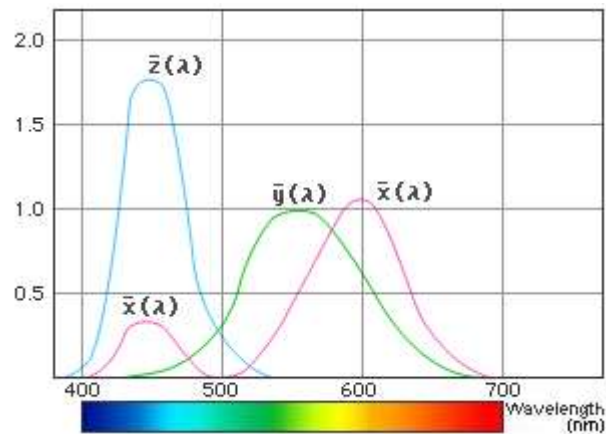


Figura 1.3. Observador estándar CIE 1931

Fuente: Konika Minolta Sensing, Inc., 2003

1.3. Sistemas de medición de color

La percepción del color por parte del ojo humano está fundamentado por el principio tricromático, siendo el punto de partida en el desarrollo de los distintos sistemas de medición y representación del color que surgieron con la necesidad de mostrar valores de color que vayan más allá de la subjetividad descrita por un observador.

La Comisión Internacional de la Iluminación, de su traducción del francés Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), se ha convertido en una organización profesional y ha sido aceptada como la representación de la mejor autoridad en la materia, y como tal, es reconocido por la ISO como un organismo internacional de normalización (Commission International de L'Éclairage, 2012).

Un modelo de color es una fórmula matemática abstracta que describe cómo se representan los colores. Para ello, se basa en tablas numéricas compuestas normalmente por tres o cuatro valores o componentes de color (LaCie, s.f.). Es motivo por el cual, la CIE ha impulsado la utilización de sistemas comunes para normalizar una escala en base a un observador patrón, aunque aún existen escalas subjetivas, como el sistema Munsell, que son utilizadas hasta la actualidad.

Sistema de color Munsell

Este sistema de ordenación de color fue creado por el pintor Albert Henry Munsell, basándose únicamente en la percepción

del color. El éxito del sistema Munsell reside en un espaciado uniforme y en las escalas abiertas de croma, que ha obtenido aceptación internacional y también ha servido como base para la construcción de otros sistemas de color, incluyendo el CIELAB (Valero, 2011).

Sus valoraciones reemplazaron el vocabulario impreciso de las denominaciones populares a los colores, como azul infernal y azul-celeste, por ejemplo. Munsell se apartó de la tradición al utilizar cinco matices primarios en vez de tres, colocando así matices opuestos como complementarios muy diferentes (Zelanski y Fisher, 2001).

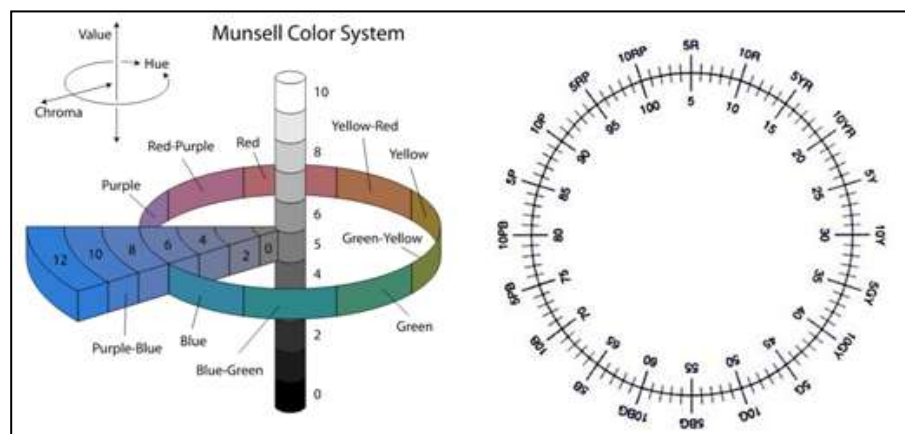


Figura 1.4. Sistema Munsell

Elaborado por: Chuchuca, Dick, Peñafiel

Fuente: Valero, 2011; Capilla, et al., 2002

Las variables utilizadas por Munsell para describir los atributos del color son el tono (hue), la claridad (value) y el croma (chroma). Un color se indica con la siguiente notación: tono, claridad/croma (H V/C). Así, por ejemplo, el color 2.5YR 4/8 corresponde a un color entre amarillo y rojo (yellow-red) de tono H = 2.5YR, de claridad V = 4 y de croma C = 8 (Capilla, et al., 2002).

Como se observa en la figura 1.4., la escala del tono está representada por 10 tonos (5 principales y 5 combinaciones) y cada uno está dividido en 10 segmentos. Por lo tanto, en el ejemplo anterior, 2,5YR indica que el tono se encuentra más cercano al tono principal rojo que al tono principal amarillo. La escala de claridad corresponde al espacio comprendido entre 0 y 10, donde 10 es blanco y 0 negro. Finalmente, la escala de croma está comprendida entre 0 y 12, siendo 12 el espacio en el sistema donde se alcanza la máxima pureza del tono.

CIE 1931

En 1931, la CIE se fundamentó en el principio tricromático, desarrollando un sistema en base a la igualación de colores mediante la mezcla de cantidades apropiadas de los tres estímulos fundamentales (rojo, verde y azul, RGB por sus siglas en ingles). Por deducción matemática, a partir de estos se idearon los colores primarios ideales X, Y y Z. Se analizaron cuatro condiciones para la caracterización de estos valores: fuentes estándar de iluminación, condiciones exactas de observación, unidades matemáticas apropiadas y curvas de un observador patrón. Pero el empleo rutinario de los valores X, Y y Z presentaron varios inconvenientes debido a que son difíciles al representar gráficamente, no son intuitivos para dar idea del color y son difíciles de interpretar en base sensorial (Calvo, et al., 1997).

Por lo tanto, la CIE quería representar de forma eficaz una figura tridimensional sobre un gráfico, para ello se transformó el espacio de color en dos dimensiones artificiales de color o cromaticidad, y una dimensión de intensidad. Seguidamente se tomó una porción del espacio bidimensional y le dieron el

máximo nivel de intensidad, a este gráfico se denominó diagrama de cromaticidad CIE xyY (LaCie, s.f.).

De los tres valores triestímulo, el parámetro Y fue elegido por la CIE de tal manera que corresponde exactamente con la curva de visibilidad del ojo humano; de esta forma, los valores de Y dan directamente la claridad. La cromaticidad se define en las coordenadas x, y, z, expresadas a partir de los valores triestímulo como fracciones de su suma total. Las fracciones se expresan por:

$$x = X / (X + Y + Z) \quad y = Y / (X + Y + Z) \quad z = Z / (X + Y + Z)$$

En el diagrama de cromaticidad solo están representadas las coordenadas x, y, donde z es el complemento; es decir, es suficiente conocer los valores x, y para deducir z por la relación matemática: $x + y + z = 1$ (Calvo, et al., 1997).

En la figura 1.5., el extremo curvado del diagrama de cromaticidad corresponde a los colores del espectro visible. El

extremo recto corresponde a los tonos de púrpura que están fuera del espectro. En la parte interior de la figura están los colores menos saturados, por lo cual, el blanco se sitúa en el centro (LaCie, s.f.).

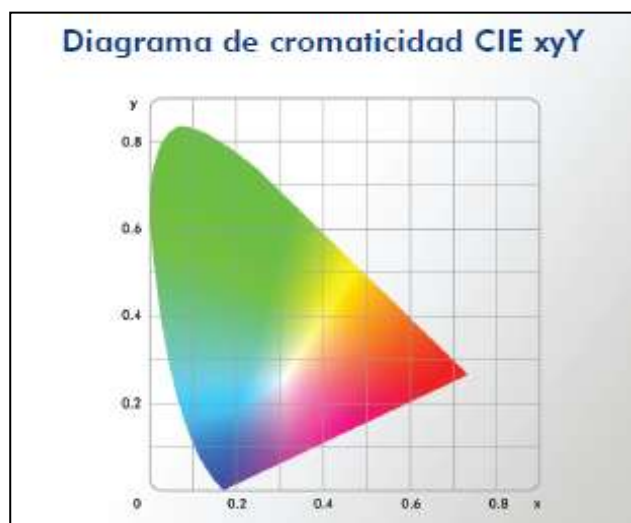


Figura 1.5. Diagrama de cromaticidad

Fuente: LaCie, s.f.

El sistema de medición de color CIE x , y , Y no es visualmente uniforme, las constantes de tono (matiz) y croma (saturación) están distorsionadas y las distancias visualmente iguales en el diagrama de cromaticidad aumentan varias veces entre la sección púrpura-rojo a verde (MacDougall, 2002). Debido a que el esquema no representaba la uniformidad, se requería una mejora a un sistema más complejo, mediante transformaciones

matemáticas para conseguir un sistema que describiese mejor el color.

Hunter Lab

La escala de colores Hunter L, a, b es visualmente más uniforme que la escala de color CIE x, y, Y, y debido a esta uniformidad, es posible trazar diferencias entre valores de colores en el espacio.

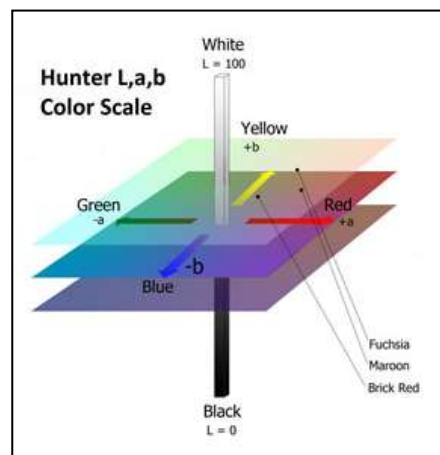


Figura 1.6. Escala de color Hunter Lab

Fuente: Cool Roof Rating Council, 2012

El espacio de color Hunter L, a, b está organizado en un cubo. En el eje L, 100 es la máxima valoración donde se produce una

perfecta difusión del reflejo de luz, es decir, donde se obtiene un color blanco total; 0 es la mínima valoración y es donde se representa el color negro. Los ejes a y b no tienen límites numéricos específicos, valores positivos de a son rojos y negativos son verdes, valores positivos de b son amarillos y negativos son azules (Hunter Associates Laboratory, Inc., 2008). En la figura 1.6. se observa un diagrama del espacio de color Hunter L, a, b.

La coordenada de claridad L es la raíz cuadrada del valor triestímulo Y, expresada por: $L = 10 Y^{1/2}$ (McDougall, 2002). La relación matemática de los valores a y b están expresadas por las siguientes ecuaciones (Hunter Associates Laboratory, Inc., 2008):

$$a = K_a \left(\frac{\frac{X}{X_n} - \frac{Y}{Y_n}}{\sqrt{\frac{Y}{Y_n}}} \right)$$

$$b = K_b \left(\frac{\frac{Y}{Y_n} - \frac{Z}{Z_n}}{\sqrt{\frac{Y}{Y_n}}} \right)$$

Donde: X, Y y Z son los valores triestímulos

Y_n es igual a 100,00

X_n y Z_n según el iluminante, para D_{65} es 95,02 y 108,82, respectivamente.

K_a y K_b son los coeficientes de cromaticidad según el iluminante, para D_{65} es 172,30 y 67,20, respectivamente.

Existen valores delta (ΔL , Δa y Δb) asociadas con esta escala de color. Estos valores indican cuánto un estándar y una muestra difieren uno del otro en los valores L, a y b. Los deltas son usados muchas veces para control de calidad, donde sus tolerancias pueden ser establecidas para conocer si cumplen el estándar. Por ejemplo, si Δa está fuera de la tolerancia establecida, un delta positivo indica que el ejemplo está más rojo que el estándar (Hunter Associates Laboratory, Inc., 2008).

Según Calvo, et al. (1997), la economía y rapidez de respuesta que supuso la aparición en el mercado de los colorímetros triestímulo frente a los espectrofotómetros convencionales, ayudó a la difusión del sistema L, a, b; también ayudó a la difusión lo intuitivo de su representación gráfica y el hecho de que se basa en la teoría de los colores opuestos, que postula que la percepción del color se produce en las coordenadas

rojo-verde, azul-amarillo y blanco-negro. Este sistema es el más empleado en los colorímetros Hunter, Gardner y similares, y muy usado en el campo de los alimentos; sin embargo tiene el inconveniente de que no es del todo uniforme en la región del azul.

CIE L*a*b*

En 1976, la CIE intentó reducir las escalas que se usaban en CIE 1931 a dos. Al igual que el sistema HunterLab, en la CIE 1976 L*a*b*, conocida también como CIELAB, la coordenada L* describe luminosidad, y las coordenadas a* y b* describen tonos entre rojo-verde y amarillo-azul respectivamente, cómo se observa en la figura 1.7. Según MacDougall (2002) las mejoras en CIELAB se deben a la transformación no lineal de la raíz cúbica de los valores triestímulo, los cuales se aproximan más al espacio visual de las muestras de color del sistema Munsell (2002). Las ecuaciones utilizadas son:

$$L^* = 116 (Y/Y_n)^{1/3} - 16 \quad \text{para valores } Y/Y_n > 0.008856$$

$$L^* = 903.3 (Y/Y_n)^{1/3} \quad \text{para valores } Y/Y_n < 0.008856$$

$$a^* = 500 [(X/X_n)^{1/3} - (Y/Y_n)^{1/3}]$$

$$b^* = 200 [(X/X_n)^{1/3} - (Z/Z_n)^{1/3}]$$

Donde: X_n, Y_n, Z_n son los valores para un blanco de referencia para el iluminante/observador usado.

Para este sistema los ejes a y b si están limitados numéricamente, en ambos casos las valoraciones van desde -120 a 120.

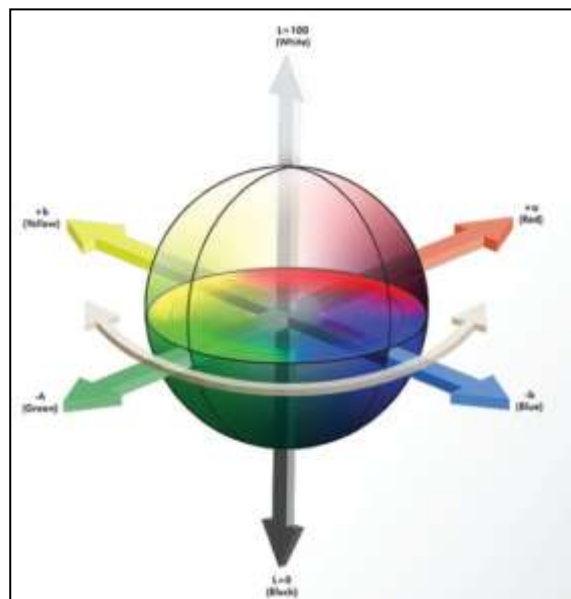


Figura 1.7. Modelo CIELAB

Fuente: LaCie, s.f.

CIELAB también puede ser expresada en coordenadas cilíndricas, donde las variables son: L^* , C^* el croma (saturación), h^* el tono; ciertas fuentes denominan a esta expresión cilíndrica CIELCH (X-Rite, Inc., 2002). Las ecuaciones para esta nueva forma son:

$$L^* = 116 (Y/Y_n)^{1/3} - 16$$

$$C^* = (a^2 + b^2)^{1/2} - 16$$

$$h^\circ = \arctan (b^*/a^*)$$

Es importante resaltar que Lab es una abreviatura informal que puede originar confusión entre el espacio de color Hunter Lab y CIELAB, y aunque tienen la misma finalidad y propósito, su construcción es diferente. Se recomienda utilizar CIELAB para nuevas aplicaciones, excepto donde los datos deban compararse con valores Hunter Lab ya existentes. La ventaja de este espacio de color es que es más objetivo, porque no depende del dispositivo, y además, una misma combinación de L, a y b, sirve para describir siempre el mismo color de forma exacta (Valero, 2011).

Las coordenadas de L^* , a^* y b^* en CIELAB sirven para definir la ubicación de cualquier color en el espacio de color uniforme que muestra este sistema; sin embargo, en la mayoría de las aplicaciones industriales es usado para determinar en un objeto hasta qué punto el color diverge del estándar, tanto en términos colorimétricos como en la aceptabilidad de coincidencia visual. Para lo cual, al igual que en el sistema Hunter Lab, es posible expresar deltas de diferencias para cada coordenada L^* , a^* y b^* , y también establecer diferencias totales de color mediante la siguiente ecuación (MacDougall, 2002):

$$\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$$

El ΔE permite medir los cambios de matiz y densidad. El observador medio sólo percibe diferencias superiores a 5 o 6 ΔE . Sólo un ojo bien preparado percibe diferencias de 3 a 4 ΔE . El ojo humano es mucho más sensible a los cambios en los niveles de gris y tonos medios. En esos casos, puede llegar a percibir hasta una diferencia de 0,5 ΔE (LaCie, s.f.).

Espacios de Color: Adobe RGB y sRGB

El espacio de color puede ser definido sin el uso de un modelo de color, como la guía de color Pantone®, que es un conjunto de nombres o números que se definen por la existencia de un acumulado de muestras de color físico (Valero, 2011). Un espacio de color puede ser también una variante de un modelo de color. Adobe RGB y sRGB son ejemplos de diferentes espacios de color basados en el mismo modelo de color, el modelo CIE 1931 x,y,Y . El rango de color incluido en un espacio de color se denomina gama. Los distintos dispositivos como el monitor de ordenadores, escáneres, impresoras de escritorio, o cámaras digitales funcionan con diferentes espacios de color y cada uno de ellos tiene gamas diferentes. Algunos colores de la gama del monitor no se encuentran en la gama de la impresora, por ejemplo. Cuando no se puede reproducir un color en un dispositivo, se considera fuera del espacio de color, es decir el color está fuera de gama (Adobe Systems Incorporate, 2012).

Adobe RGB es un espacio de color RGB diseñado por Adobe Systems Inc. en 1998. El objetivo es reproducir lo mejor posible

el espacio de color de impresión, CMYK pero limitándose en la capacidad del espacio de color RGB usado en monitores de ordenador. En cambio, el espacio de color sRGB se creó pensando netamente en la difusión del color en los monitores, limitándose en la reproducción del color durante la impresión; se desarrolló por las empresas Hewlett-Packard Development Company y Microsoft Corporation, y fue adoptado en amplia difusión por la industria de las artes gráficas (Valero, 2011).

1.4. Equipos de medición de color

Con el fin de disminuir la subjetividad que representa la apreciación humana en la evaluación el color, se han desarrollado instrumentos que proporcionen una medición objetiva. Un instrumento de medición de color, consta de dos partes: el sensor óptico y el procesador de señales. El sensor óptico puede ser un espectrofotómetro o un colorímetro triestímulo (Marqués, 2010).

Cuando un instrumento mide el color de una muestra, el ángulo con el cual un haz de luz procedente de una fuente incide

sobre la muestra y el ángulo en el cual la luz es recibida por un detector, se denominan geometría óptica. En relación a dicha geometría, se distinguen 2 sistemas: sistema de iluminación unidireccional que presenta 2 condiciones de geometría óptica, que pueden ser: 45/0 de iluminación/visión (ver figura 1.8.a) o 0/45 (ver figura 8.8.b); y el sistema de esfera integradora de iluminación difusa que utiliza un dispositivo esférico con superficies internas recubiertas de sulfato de bario para asegurar una geometría de iluminación/visión de modo uniforme desde todas las direcciones. Estos pueden presentar 2 condiciones de geometría óptica: d/0 (iluminación difusa y visión a 0°) y 0/d (iluminación a 0° y visión por reflexión difusa) (Konika Milnolta Sensing, Inc., 2003).

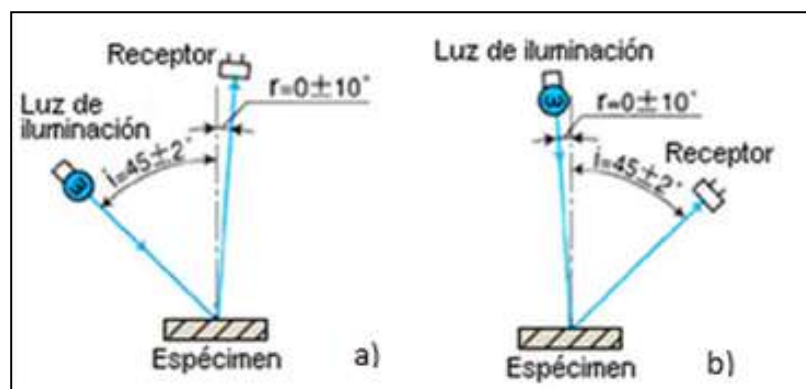


Figura 1.8. Sistema de iluminación unidireccional: a) 45/0, b) 0/45

Elaborado por: Chuchuca, Dick, Peñafiel

Fuente: X-Rite, 2002; Konika Milnolta Sensing, Inc., 2003

Los instrumentos de medición de color, tienen la opción de trabajar con componente especular incluido (brillo), el cual podría excluirse con una trampa de luz en la esfera o abriendo una compuerta en la misma, de tal manera que la reflexión especular (90° con relación al ángulo de incidencia) no se incluya en la medición (X-Rite, Inc., 2002). El modo de componente especular excluido produce una evaluación lo más parecida al modo en que el ojo humano ve un objeto.

Colorímetro

Un colorímetro está compuesto por: una fuente de luz, tres filtros (correspondientes al rojo, verde y azul) y un detector, por lo que puede ser considerado como una imitación directa del mecanismo de percepción del sistema visual humano (Marqués, 2010). Su funcionamiento se basa en que al incidir la fuente de luz sobre la muestra en un ángulo de 45° , existe una reflexión difusa que atraviesa los tres filtros X, Y, Z y luego, es medida por la fotocélula o detector (Calvo, et al., 1997).

Entre las principales ventajas del colorímetro triestímulo destacan: su precio, comparativamente bajo en relación al espectrofotómetro, tamaño compacto, facilidad de uso y movilidad. Sin embargo, la principal desventaja es que no proporcionan medidas exactas (Calvo, et al., 1997), por lo que no son apropiados para análisis complejos de color, como el metamerismo (cambio en la apariencia de una muestra generado por la luz usada para iluminar la superficie), debido a que utilizan siempre la misma fuente de luz (lámpara de incandescencia de Wolframio o lámpara de destello de Xenón) y el mismo método de iluminación, lo que mantiene fijas las condiciones de medición (Konika Minolta Sensing Inc., 2003; X-Rite, Inc., 2002; Calvo, et al., 1997). Otra dificultad se presenta al momento de conseguir filtros que muestren una respuesta proporcional a las curvas del observador estándar (Marqués, 2010).

El colorímetro Konika Minolta, serie CR-400, es un instrumento aceptado globalmente como referencia en una gran variedad de industrias. Algunas especificaciones del equipo se muestran en la tabla 1.

TABLA 1
ESPECIFICACIONES KONIKA MINOLTA CR-400

Nombre	Cabezal de medida del colorímetro
Modelo	Cabezal CR-400
Sistema de iluminación/Visión	d/0 (Iluminación difusa/ángulo de visión 0°)
Fuente de luz	Lámpara de xenón pulsante
Tiempo de medición	1 segundo
Área medida/iluminada	8 mm de diámetro/11 mm de diámetro
Observador	2°, igualación del observador estándar CIE 1931
Illuminante	C, D65
Espacios de color	XYZ, Yxy, L*a*b*, Hunter Lab, L*C*h, Munsell (sólo iluminante C), entre otros.

Elaborado por: Chuchuca, Dick, Peñafiel

Fuente: Minolta Co., Ltd., 2002

El procedimiento para medir color en los alimentos con el colorímetro Konika Minolta, serie CR-400, consiste en colocar el equipo en contacto directo sobre la muestra, como se observa en la figura 1.9. Definida el área de interés, se procede a accionar el botón de medición, el equipo emite una luz de xenón pulsante y las longitudes de onda emitidas por la muestra, son transcritas por el colorímetro a valores del espacio de color seleccionado, como L* a* b*.



Figura 1.9. Colorímetro Konika Minolta CR-400

Fuente: Minolta Co., Ltd., 2002

Espectrofotómetro

Un espectrofotómetro es un equipo que mide la cantidad de luz reflejada o transmitida para cada longitud de onda, con relación a una referencia estándar, comparando la radiación para cada longitud de onda a la salida del objeto con la radiación incidente (International Color Consortium, 2012). Es ampliamente utilizado para realizar análisis de alta precisión y gestión del color, en el área de laboratorios e investigación (Konika Minolta Sensing, Inc., 2003). Estos equipos constan de una red de difracción que permite aislar diferentes porciones del espectro de luz blanca, obteniendo una luz monocromática que atraviesa la muestra dando lecturas de transmisión o reflexión para cada longitud de onda. Además, proporcionan

gráficas espectrales que llevan en el eje de las ordenadas el porcentaje de luz reflejada por la muestra, y en el eje de las abscisas la longitud de onda (Benzzo, 2005).

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA DE MEDICIÓN DE COLOR

2.1. Componentes del sistema

La metodología empleada para la medición de color fue un Sistema de Visión Computarizada (SVC) que consistió en un escenario con condiciones de iluminación establecidas, una cámara digital CCD para captar imágenes a las muestras, y un computador con el software Adobe® Photoshop® CS5 para el procesamiento digital de dichas imágenes, transformando los valores RGB del color proporcionados por la cámara digital a coordenadas L^* , a^* y b^* comparables con los valores generados por el colorímetro Konika Minolta CR-400 (8mm de apertura; observador 2°) usado como método de referencia.

Escenario

Se construyó una cabina metálica con las siguientes medidas: ancho 35 cm; alto 35 cm y largo 55 cm, para lo cual se utilizó una plancha de hierro de 2 mm de espesor. En su interior se ubicaron dos lámparas tipo fluorescente lineal, con una temperatura de color de 6500 K (luz blanco frío) situadas en la parte superior de la cabina y dispuestas en un ángulo de 45° respecto del plano horizontal, como se muestra en la figura 2.1. El interior de la cabina se pintó de color blanco mate, para evitar reflejos que pudieran afectar el color de la superficie de la muestra.

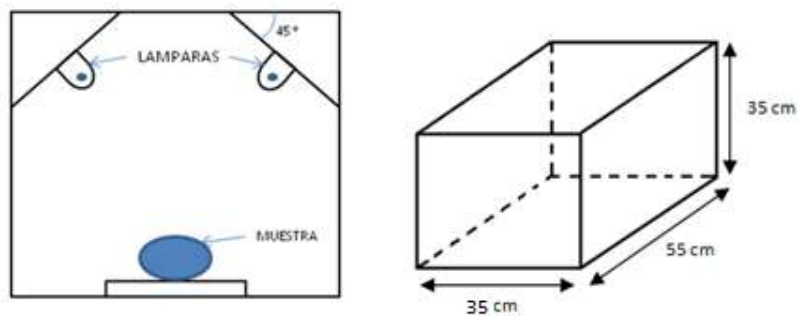


Figura 2.1. Dimensionamiento de la estructura

Elaborado por: Chuchuca, Dick y Peñafiel

Para establecer el color interno del escenario, se tomaron fotos por triplicado con fondo negro y fondo blanco a una muestra de arroz entero. Se promediaron los valores y se evaluó en qué condición el SVC daba valores más cercanos al colorímetro de referencia, obteniendo que la mejor condición era el fondo de color blanco. Como se observa en la tabla 2, las coordenadas L^* , a^* y b^* obtenidas con el fondo blanco presentaron valores más cercanos al colorímetro que las obtenidos con el fondo negro.

TABLA 2
COORDENADAS L^* , a^* Y b^* PARA ARROZ ENTERO SEGÚN
COLOR DEL FONDO DEL ESCENARIO

a)	Fondo negro	$L^* = 84 \pm 0,96$ $a^* = -1 \pm 0,50$ $b^* = 24 \pm 0,00$
	Fondo blanco	$L^* = 60 \pm 2,25$ $a^* = -1 \pm 0,75$ $b^* = 25 \pm 1,05$
b)	Colorímetro	$L^* = 62,56 \pm 0,90$ $a^* = -0,31 \pm 0,11$ $b^* = 10,22 \pm 0,43$

a) Medido con SVC

b) Medido con Konika Minolta CR-400

Elaborado por: Chuchuca, Dick y Peñafiel

Cámara fotográfica digital

La cámara digital es un factor clave en el SVC, se utiliza para capturar la imagen del objeto de interés, siendo su función similar a la del ojo humano. Al momento de seleccionar una cámara se debe considerar: la resolución, precisión geométrica, estabilidad, respuesta espectral, tiempo de respuesta, entre otros factores. Las cámaras pueden ser del tipo de dispositivo de cargas acopladas (CCD) o semiconductor de óxido de metal complementario (CMOS).

Las cámaras CCD son las más utilizadas en los sistemas de visión computarizada ya que ofrecen una calidad de imagen superior, además de flexibilidad a expensas del tamaño del sistema (Misimi, 2007; Litwiller, 2001).

Para la captación de imágenes se empleó una cámara digital marca Nikon, serie COOLPIX L110, provista de un sensor de imagen CCD de tamaño 1/2,3 pulgadas, 12,1 megapíxeles (efectivos) para imágenes con mayor resolución y distancia de

50 cm a infinito en enfoque desde el objetivo en modo normal y de 1 cm a infinito en modo macro.

La cámara se ubicó en forma vertical, a una distancia de 20 cm de la muestra sobre un trípode compacto retráctil con una altura de 26,5 cm y ángulo de inclinación de 90°.

La configuración de la cámara se estableció en modo automático, con modo macro activado, flash desactivado, sensibilidad ISO automático, compensación de exposición EV=0,0 y modo de imagen 12M (4000 x 3000 pixeles). El formato de almacenamiento de imagen ya predeterminado en la cámara fue JPEG. El balance de blancos se realizó con un ajuste manual sobre un papel bond Xerox 150 gm⁻², con las condiciones de luz adecuadas (Padrón, 2009; Girolami, Napolitano, Farone & Braghieri, 2012; Misimi, Mathiassen, & Erikson, 2007; Mendoza, Dejmek & Aguilera, 2006).

Se realizaron pruebas por triplicado en los modos de balance de blancos: preajuste manual, luz del día, incandescente, fluorescente, y modo nublado. En la tabla 3 se muestran las

coordenadas de color L^* , a^* , b^* obtenidas de una misma muestra.

TABLA 3
COORDENADAS L^* , a^* , b^* SEGÚN EL BALANCE DE
BLANCOS

Balance de Blancos	Muestra: Arroz Entero		
	L^*	a^*	b^*
Preajuste manual	$62 \pm 1,18$	$0 \pm 0,73$	$26 \pm 0,77$
Luz del día	$58 \pm 1,14$	$-16 \pm 0,45$	$5 \pm 0,89$
Incandescente	$63 \pm 1,05$	$-16 \pm 0,40$	$-30 \pm 0,70$
Fluorescente	$61 \pm 1,23$	$-5 \pm 0,52$	$-11 \pm 0,79$
Nublado	$59 \pm 0,95$	$-13 \pm 0,45$	$17 \pm 0,81$

Elaborado por: Chuchuca, Dick, Peñafiel

El modo preajuste manual de balance de blancos se acercaba más a los valores obtenidos por el colorímetro Konika Minolta CR-400 tomados a la misma muestra ($L^* = 62,56 \pm 0,90$, $a^* = -0,31 \pm 0,11$, $b^* = 10,22 \pm 0,43$), el cuál será el método de referencia en el objetivo de realizar la validación del Sistema de Visión Computarizada (SVC).

Software para el procesamiento de la imagen

Se empleó el software Adobe® Photoshop® CS5, una aplicación profesional para la edición y retoque de imágenes en diversos formatos que cuenta con diversas bibliotecas de colores, como las guías de color Pantone®; también presenta reguladores en el espacio de color CIELAB (Padrón, C., Padrón, G., Montes y Oropeza, 2012), por lo que permite la comparación con los datos obtenidos entre el SVC y el colorímetro de referencia.

Además, los valores de las coordenadas CIELAB proporcionados por los instrumentos de medición del color, como el Konika Minolta CR-400, se pueden comprobar mediante la introducción de los mismos en el software Adobe® Photoshop® y creación del color que se está midiendo. (Padrón, et al., 2012).

Costo del sistema

El Sistema de Visión Computarizada, sin incluir la computadora y el software utilizado, tiene un costo de \$695,55. El detalle de los costos se muestra en la tabla 4.

TABLA 4
COSTO DEL SVC

Cabina	\$
Plancha de Hierro 1.5 mm	38,85
Doblada	16,50
Soldadura	2,50
Pintura	12,00
Mano de obra	40,00
Subtotal cabina	109,85
Lámparas de 6500 K (2 unidades)	17,85
Subtotal iluminación	35,70
Nikon COOLPIX L110	550,00
Subtotal cámara digital	550,00
Total del Sistema	695,55

Elaborado por: Chuchuca, Dick, Peñafiel

2.2. Procedimiento para toma, acondicionamiento y análisis de la muestra

Los pasos para el procesamiento de toma, acondicionamiento y análisis de la muestra, son los siguientes:

1. Acondicionamiento de muestra: Las muestras de arroz se colocaron sobre una caja petri de 9,5 cm de diámetro y 1,5 cm de altura, de vidrio translúcido; se dispersó la muestra uniformemente en la caja, evitando una superficie irregular (Figura 2.2.a). Las muestras de pan se colocaron directamente sobre el papel bond Xerox de 150 gm^{-2} , que recubre la superficie de la estructura; no se requirió de mayor cuidado.

2. Pre-ajuste: Se debe realizar el pre-ajuste de balance de blancos de la cámara fotográfica ingresando al menú de la cámara, antes de la realizar la captura. Es importante señalar que el ajuste se realiza sobre papel bond y no sobre la muestra que se requiere analizar (Figura 2.2.b).

3. Colocar muestra: Una vez calibrada la cámara, se coloca la muestra ya preparada previamente sobre la caja petri, en caso de que se requiera, o directamente se coloca la muestra sobre el papel (Figura 2.2.c).

4. Captura: Es necesario activar en la cámara la opción de disparador automático para evitar que las manos, al presionar

el disparador, produzcan sombras dentro de la estructura, siendo una limitante del sistema que se desarrolló (Figura 2.2.d).

5. Retirar la cámara: Se procede a retirar la cámara fotográfica con el trípode, debido a que el sistema no cuenta con un cable de transferencia directa de la cámara al computador (Figura 2.2.e).



Figura 2.2. Procesamiento para toma, acondicionamiento y análisis de la muestra: a) Acondicionamiento de muestra, b) Pre-ajuste, c) Colocar muestra, d) Captura, e) Retirar cámara, f) Transferir imagen

Elaborado por: Chuchuca, Dick, Peñafiel

6. Transferir imagen: Las muestras son almacenadas en la memoria de la cámara y es necesario transferirlas al ordenador para el procesamiento digital que se requiere, y obtener finalmente las coordenadas L^* , a^* , b^* (Figura 2.2.f).

2.3. Procesamiento y análisis de datos

Las imágenes captadas fueron descargadas en un computador. La pantalla se calibró utilizando la función Administración del color incluida en el computador. La calibración de la pantalla garantiza que los colores se visualicen correctamente en el monitor. La configuración del color puede cambiar según la pantalla y las opciones de color del monitor, por lo que una o más opciones de configuración del color pueden no estar disponibles.

En la calibración de color de la pantalla se realizaron los siguientes ajustes: gamma, brillo, contraste y balance de color, en el orden que muestra la figura 2.3.

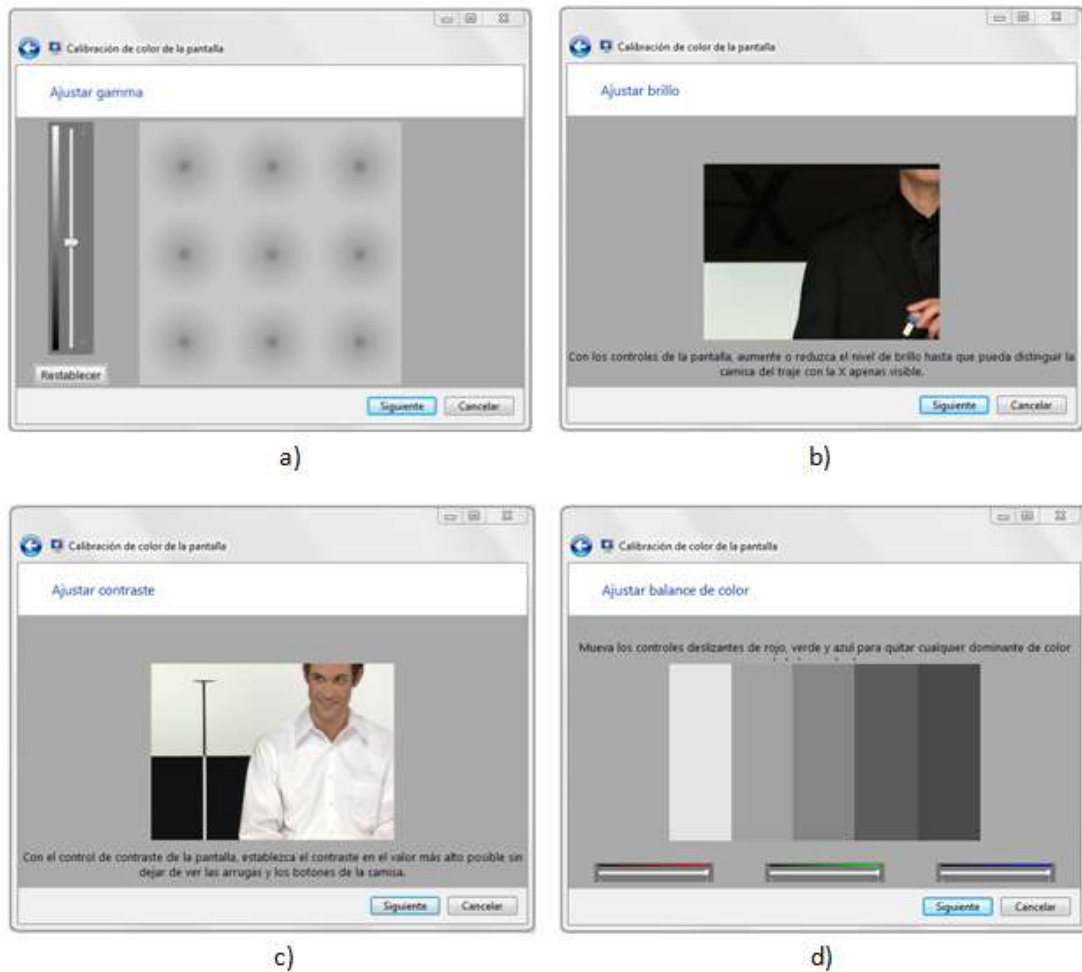


Figura 2.3. Calibración de color de la pantalla: a) Ajuste de gamma, b) Ajuste de brillo, c) Ajuste de contraste, d) Ajuste de balance de color.

Elaborado por: Chuchuca, Dick Peñafiel

Las imágenes fueron procesadas en Photoshop® CS5. El procesamiento de imágenes involucra el preprocesamiento, la segmentación y el promediado. El preprocesamiento consiste en mejorar la calidad de las imágenes obtenidas (Misimi, 2007), la segmentación es el proceso de separar regiones de

interés del resto de la muestra o fondo (Zeuch, 2000), y el promediado de imágenes proporciona un solo valor para cada coordenada L^* , a^* y b^* , representativo del color de la muestra.

Preprocesamiento

Los pasos para el preprocesamiento son:

1. Introducción de la imagen al software: Las imágenes se introdujeron en el software mediante el menú archivo, opción abrir, selección de la imagen. Ver figura 2.4.

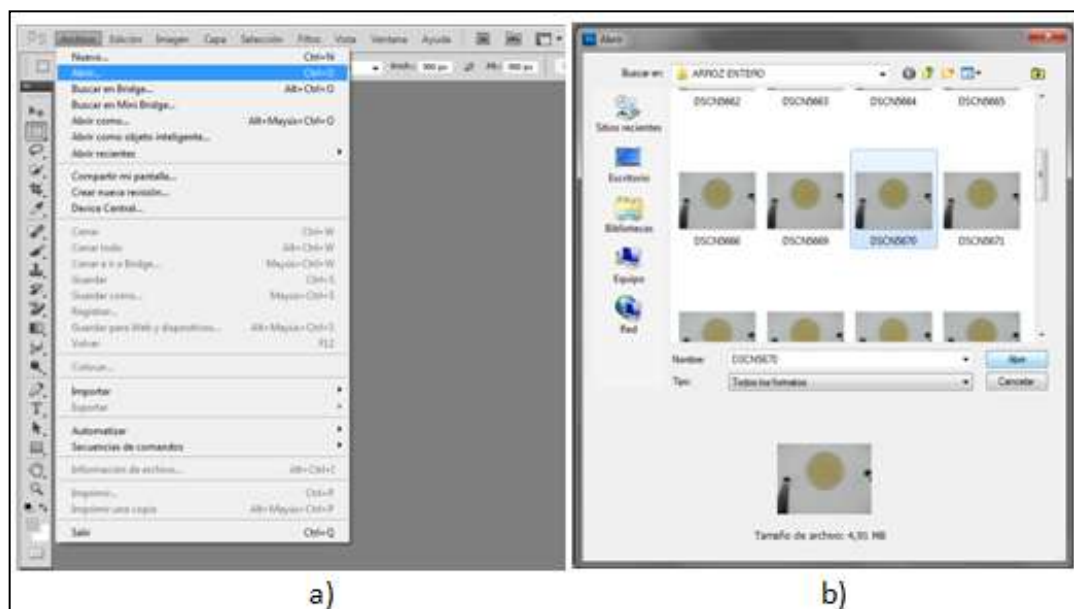


Figura 2.4. Introducción de la imagen al software:

a) Menú archivo, opción abrir; b) Selección de la imagen

Elaborado por: Chuchuca, Dick, Peñañiel

2. Cambio del perfil de color incrustado de la imagen (sRGB) a los colores del espacio de trabajo (Adobe RGB): La imagen que proviene de la cámara digital con un perfil de color incrustado de sRGB, no coincide con el espacio de trabajo del software utilizado, por lo que se debe convertir los colores al espacio de trabajo Adobe RGB (1998). Ver figura 2.5.

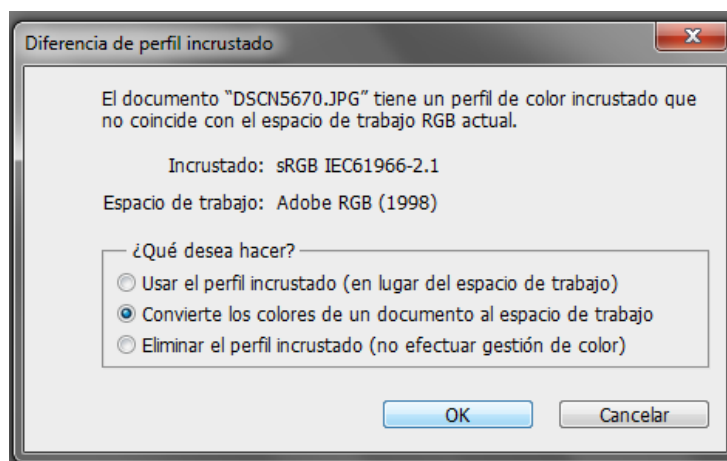


Figura 2.5. Cambio del perfil de color

Elaborado por: Chuchuca, Dick, Peñafiel

3. Ajuste del canal RGB: En menú imagen, submenú ajustes, opción niveles, se ajustó el canal RGB, con los niveles de entrada (0, 1, 255) y de salida (0, 255). Ver figura 2.6.

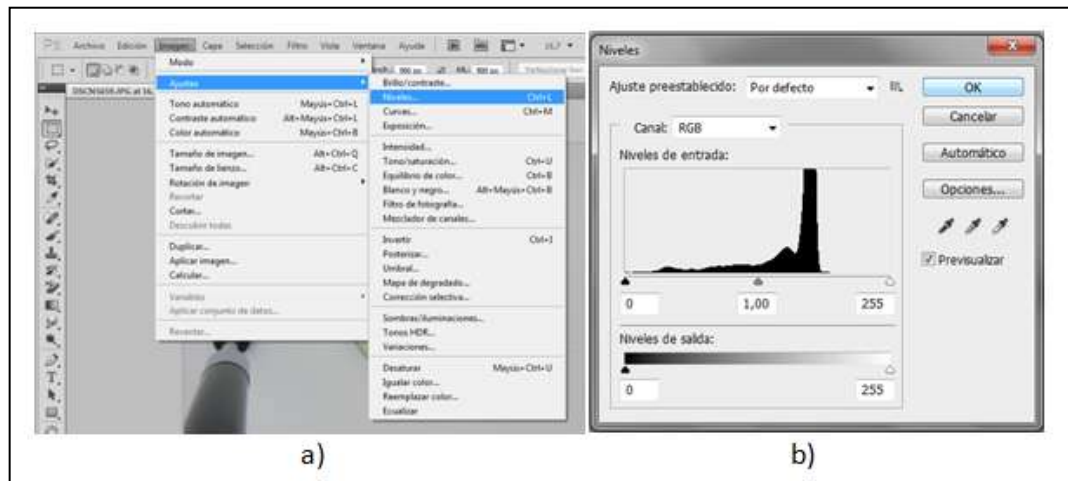


Figura 2.6. Ajuste del canal RGB: a) Menú imagen, submenú ajustes, opción niveles; b) Ajustes de los niveles de entrada y salida

Elaborado por: Chuchuca, Dick, Peñafiel

Segmentación y promediado

Los pasos para la segmentación y el promediado son:

1. Segmentación de la imagen: La segmentación de imágenes se realizó individualmente con la herramienta Marco rectangular (tamaño fijo de 900x900 píxeles), menú imagen, opción recortar. Ver figura 2.7.

2. Promediado de la imagen: Se promediaron los píxeles del área seleccionada en menú filtro, submenú desenfocar, opción promediar. Ver figura 2.8.

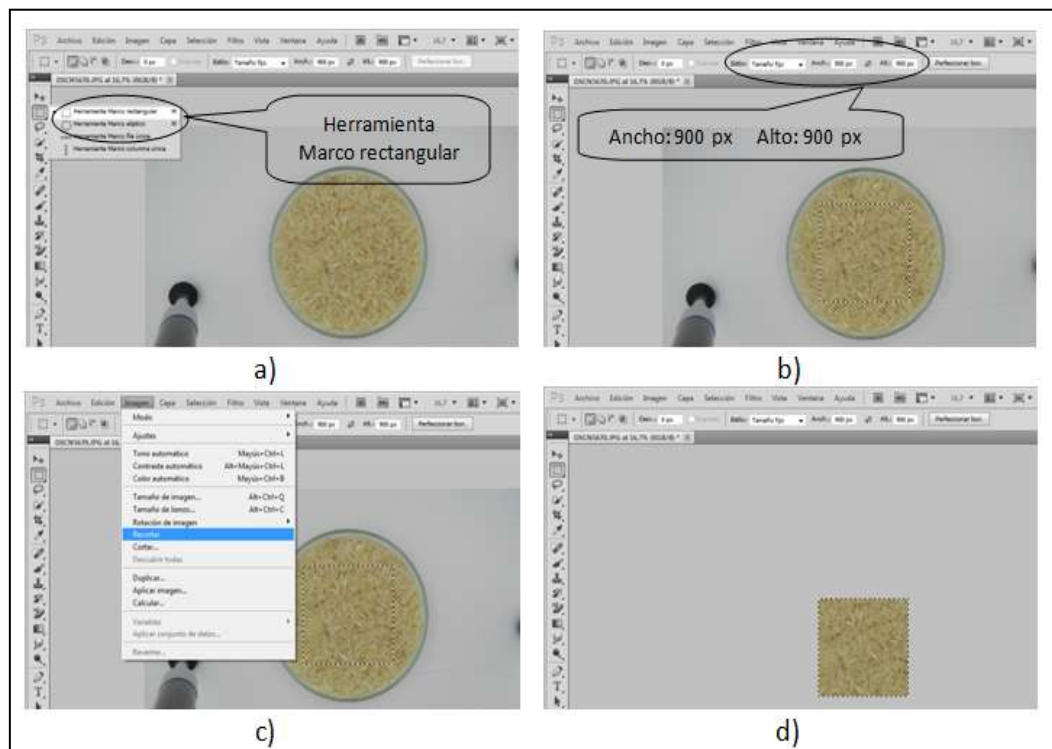


Figura 2.7. Segmentación de la imagen: a) Herramienta Marco rectangular; b) Selección de la imagen; c) Ir a menú imagen, opción recortar; d) Área recortada

Elaborado por: Chuchuca, Dick, Peñafiel

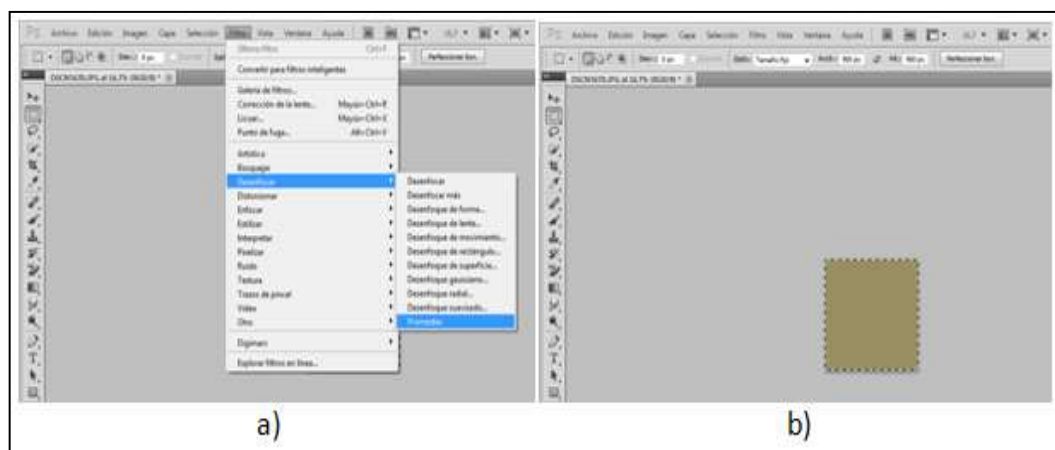


Figura 2.8. Promediado de la imagen: a) Menú filtro, submenú desenfocar, opción promediar; b) Área de interés promediada

Elaborado por: Chuchuca, Dick, Peñafiel

3. Obtención de coordenadas L^* , a^* , y b^* : Para obtener los valores del color promediado en coordenadas L^* , a^* , y b^* , se utilizó la herramienta cuentagotas, colocando el cursor sobre el área a ser evaluada. Se observaron los valores seleccionando el espacio de trabajo Diseño, en la ventana de información. Ver figura 2.9.

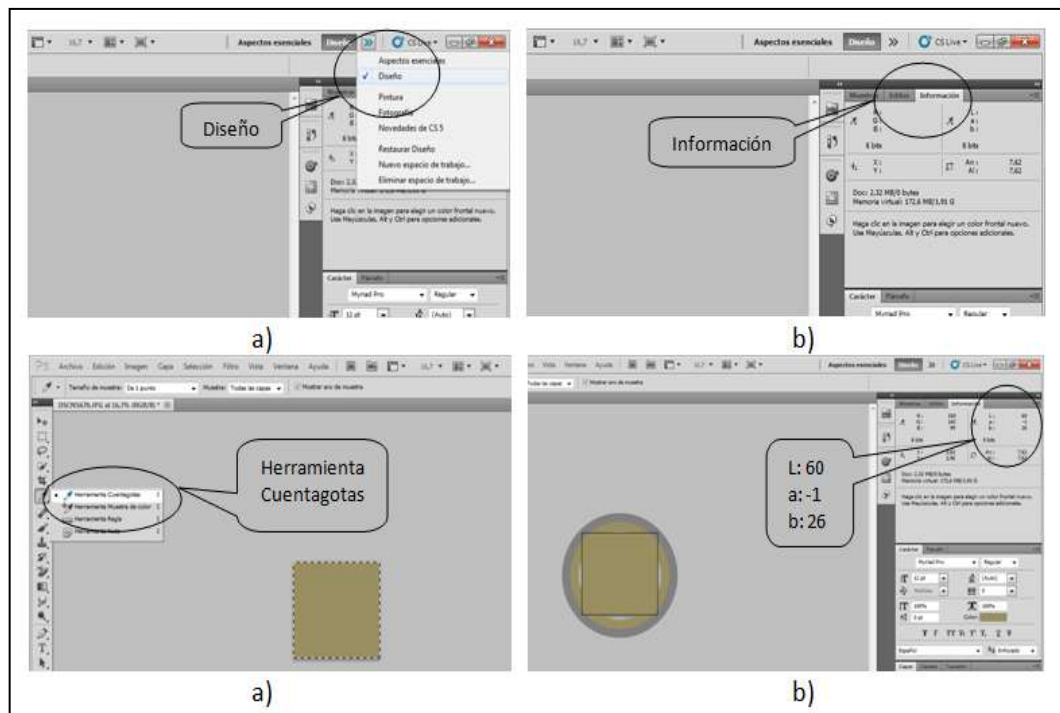


Figura 2.9. Obtención de coordenadas L^* , a^* , y b^* : a) Selección de área de trabajo; b) Ventana información; c) Herramienta cuentagotas; d) Coordenadas L^* , a^* y b^*

Elaborado por: Chuchuca, Dick, Peñafiel

CAPÍTULO 3

3. VALIDACIÓN DEL MÉTODO EN ALIMENTOS CON DIFERENTE TAMAÑO DE PARTÍCULA

3.1. Materiales

Para la validación del método de medición de color utilizando el Sistema de Visión Computarizada (SVC) en alimentos con diferente tamaño de partícula, se utilizó un colorímetro Konika Minolta CR-400 como método de referencia, y arroz en tres tamaños de partículas para el análisis, como se observa en la figura 3.1.

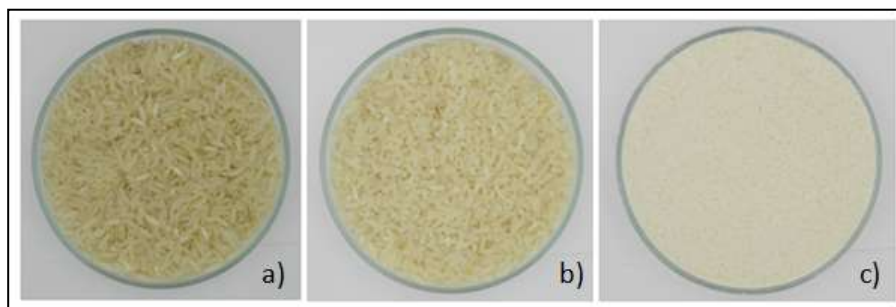


Figura 3.1. Muestras de arroz: a) Arroz entero, b) Arroz quebrado, c) Harina de arroz

Elaborado por: Chuchuca, Dick, Peñafiel

Se utilizó arroz blanco, marca Gustadina, adquirido en el mercado local. Se dividieron tres porciones iguales, de las cuales: una porción fue molida hasta obtener harina de arroz (AH), otra porción fue molida hasta obtener arroz quebrado (AQ) y finalmente, a la última porción no se le realizó ningún tratamiento y se la dejó como arroz entero (AE). En la tabla 5 se señala el tamaño de partícula para las tres muestras.

TABLA 5
TAMAÑO DE PARTÍCULA DE LAS MUESTRAS DE ARROZ

Muestra	Tamaño de Partícula
Arroz Entero (AE)	1,992 mm
Arroz Quebrado (AQ)	1,793 mm
Harina de Arroz (AH)	0,462 mm

Elaborado por: Chuchuca, Dick, Peñafiel

3.2. Comparación de medidas con método de referencia

La experimentación se desarrolló con el objetivo de validar el método de medición de color, Sistema de Visión Computarizada (SVC), con el método de referencia de medición, colorímetro Konika Minolta CR-400. Para lo cual, se definió primero el número de observaciones (n) igual a 30, considerando que para las mediciones no se necesitaba algún recurso más allá del uso del equipo y las muestras a utilizar; se decidió realizar la medición para cada condición de tamaño de partícula usando la misma muestra para evitar variaciones de color que pudiesen existir.

En la tabla 6 se muestran las medias aritméticas y desviaciones estándar obtenidas de las mediciones de color proporcionados por el colorímetro Konika Minolta CR-400 y el SVC.

La hipótesis nula planteada es que no existe diferencia significativa en las mediciones de color obtenidas por el Sistema de Visión Computarizada (SVC) y el colorímetro

Konika Minolta CR-400. La hipótesis alterna propone que sí existe diferencia en las mediciones de color entre los métodos.

TABLA 6
PROMEDIO DE LAS MEDICIONES DE COLOR EN
MUESTRAS DE ARROZ

Muestra	Coordenada Color	CR-400	SVC
Arroz Entero (AE)	L*	62,65 ± 0,54	61,27 ± 1,11
	a*	-0,19 ± 0,11	-0,90 ± 0,71
	b*	10,09 ± 0,35	27,00 ± 0,69
Arroz Quebrado (AQ)	L*	68,26 ± 0,61	68,63 ± 1,59
	a*	-0,37 ± 0,04	-1,33 ± 0,55
	b*	9,97 ± 0,22	23,97 ± 0,61
Harina de Arroz (AH)	L*	88,34 ± 0,75	79,00 ± 1,08
	a*	-0,11 ± 0,04	-2,23 ± 0,50
	b*	9,36 ± 0,36	11,30 ± 0,79

Elaborado por: Chuchuca, Dick, Peñafiel

Antes de realizar la comparación es necesario conocer la normalidad presente de los datos obtenidos, para así escoger entre una prueba t-Student para normalidad de datos o una prueba no paramétrica de Mann-Whitney en caso contrario, herramientas estadísticas que se utilizan con el objetivo de encontrar diferencia significativa entre dos grupos.

La prueba de normalidad es necesaria para cada una de las coordenadas de color L^* , a^* y b^* en los tres niveles de partícula de arroz, medidas tanto por el colorímetro Konika Minolta CR-400 y el Sistema de Visión Computarizada (SVC). El software utilizado para el análisis estadístico fue Minitab 16.

Prueba de Normalidad

El contraste de hipótesis para la prueba de normalidad se detalla a continuación:

H_0 : Los valores de la coordenada de color L^* de Arroz Entero (AE) proporcionados por el colorímetro Konika Minolta CR-400 presentan una distribución normal.

vs.

H_1 : Los valores de la coordenada de color L^* de Arroz Entero (AE) proporcionados por el colorímetro Konika Minolta CR-400 no presentan una distribución normal.

En la figura 3.2. se observa el Resumen Gráfico para la coordenada de color L^* de la muestra Arroz Entero (AE) medida por el colorímetro Konika Minolta CR-400, los

resultados muestran un valor $p > 0,1$. Por lo tanto, existe suficiente evidencia estadística para no rechazar la hipótesis nula y sustentar el planteamiento de que los valores de la coordenada de color L^* proporcionados por el colorímetro Konika Minolta CR-400 presentan una distribución normal.

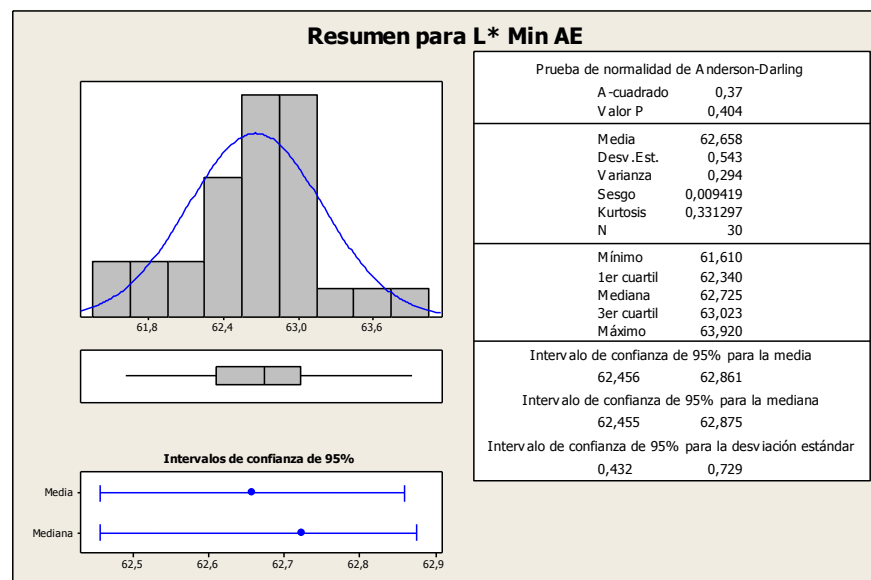


Figura 3.2. Resumen Gráfico de la coordenada L^* medida por colorímetro Konika Minolta CR-400 para la muestra Arroz Entero (AE)

Elaborado por: Chuchuca, Dick, Peñafiel

En el anexo A se muestra el Resumen Gráfico para cada una de las coordenadas de color L^* , a^* y b^* de las muestras Arroz Entero (AE), Arroz Quebrado (AQ), y Harina de Arroz (AH),

medidas en el colorímetro Konika Minolta CR-400 y en el Sistema de Visión Computarizada (SVC).

TABLA 7
VALOR P DE LA PRUEBA DE NORMALIDAD PARA LAS
COORDENADAS DE COLOR DE LAS MUESTRAS DE
ARROZ

Muestra	Coordenada Color	Valor p	
		CR-400	SVC
Arroz Entero (AE)	L*	0,404	0,005
	a*	0,106	< 0,005
	b*	0,010	< 0,005
Arroz Quebrado (AQ)	L*	0,023	0,013
	a*	0,237	< 0,005
	b*	0,010	< 0,005
Harina de Arroz (AH)	L*	< 0,005	0,006
	a*	0,234	< 0,005
	b*	0,234	< 0,005

Elaborado por: Chuchuca, Dick, Peñafiel

Los resultados del valor p para cada condición se resumen en la tabla 7. Se puede observar que únicamente las coordenadas L* y a* para la muestra AE, a* para la muestra AQ y a* y b* para la muestra AH obtenidas en el colorímetro Konika Minolta CR-400, presentan valores $p > 0,1$, por lo cual es posible concluir que existe suficiente evidencia estadística para no

rechazar la hipótesis nula, los datos obtenidos presentan una distribución normal.

Mientras que los datos medidos para las demás coordenadas con el equipo Konika Minolta CR-400 y la totalidad de las mediciones de las coordenadas en el Sistema de Visión Computarizada (SVC), señalan un valor $p < 0,1$, habiendo suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula y concluir que los datos obtenidos para esas condiciones no presentan normalidad.

Por lo tanto, al presentar datos con la condición de normalidad y no normalidad, para poder realizar una comparación y conocer si existe diferencia significativa entre el colorímetro Konika Minolta CR-400 y el SVC, es necesario recurrir a la prueba no paramétrica de Mann-Whitney. La medida de tendencia central que se analiza en este tipo de prueba es la mediana. En la tabla 8 se muestran las medianas obtenidas por los dos métodos de medición.

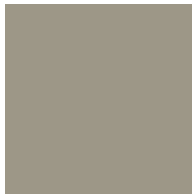
TABLA 8
MEDIANAS DE LAS COORDENADAS DE COLOR PARA
LAS MUESTRAS DE ARROZ

Muestra	Coordenada Color	CR-400	SVC
Arroz Entero (AE)	L*	62,725	61,000
	a*	-0,230	-1,000
	b*	10,115	27,000
Arroz Quebrado (AQ)	L*	68,430	69,000
	a*	-0,375	-1,000
	b*	10,030	24,000
Harina de Arroz (AH)	L*	88,035	79,000
	a*	-0,120	-2,000
	b*	9,395	11,000

Elaborado por: Chuchuca, Dick, Peñafiel

En la tabla 9 se muestran los colores contruidos en el software Adobe® Photoshop® CS5 a partir de las medianas de cada coordenada de color obtenidos con el colorímetro Konika Minolta CR-400 y el SVC, para las muestras de arroz. Como se observa, los colores obtenidos por el SVC tienen más similitud a las muestras reales, pero es necesario realizar otro estudio para poder concluir si realmente la utilización del SVC muestras colores más acertados a la muestra original que un colorímetro Konika Minolta CR-400.

TABLA 9
COLORES CONSTRUIDOS A PARTIR DE LAS MEDIANAS PARA LAS
MUESTRAS DE ARROZ

Muestra			CR-400		SVC	
AE		L*	62,725		61,000	
		a*	-0,230		-1,000	
		b*	10,115		27,000	
AQ		L*	68,430		69,000	
		a*	-0,375		-1,000	
		b*	10,030		24,000	
AH		L*	88,035		79,000	
		a*	-0,120		-2,000	
		b*	9,395		11,000	

Elaborado por: Chuchuca, Dick, Peñafiel

Prueba de Mann-Whitney

El contraste de hipótesis para la prueba de Mann-Whitney se detalla a continuación:

H_0 : Las medianas de la coordenada de color L^* de Arroz Entero (AE) proporcionadas por el colorímetro Konika Minolta CR-400 y el Sistema de Visión Computarizada (SVC) son iguales.

vs.

H_1 : Las medianas de la coordenada de color L^* de Arroz Entero (AE) proporcionadas por el colorímetro Konika Minolta CR-400 y el Sistema de Visión Computarizada (SVC) no son iguales.

TABLA 10
RESULTADO DE LA PRUEBA DE MANN-WHITNEY DE LA
COORDENADA L^* DE LA MUESTRA ARROZ ENTERO (AE)

	N	Mediana
L^* Konika Minolta CR-400 AE	30	62,725
L^* SVC AE	30	61,000
Estimación de diferencia		1,540
Intervalo de confianza (IC) para la diferencia		(0,880; 1,880)
Nivel de confianza para el intervalo		95,2%
Estadístico de prueba W		1224,5
Valor p		0,0000
Valor p (ajustado por empates)		0,0000

Elaborado por: Chuchuca, Dick, Peñafiel

Como muestra la tabla 10, la prueba de Mann-Whitney señala un valor $p < 0,1$, por lo tanto existe suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula y concluir que las medianas de la coordenada de color L^* proporcionadas por el colorímetro Konika Minolta CR-400 y el SVC no son iguales. La estimación para la diferencia de la mediana entre el colorímetro Konika Minolta CR-400 y el SVC es de 1,540 unidades y con

un 95,2% de confianza el intervalo está comprendidos entre 0,88 y 1,880 unidades de L*.

TABLA 11
VALOR P DE LA PRUEBA DE MANN-WHITNEY DE LAS
COORDENADAS DE COLOR PARA LAS MUESTRAS DE
ARROZ

Muestra	Coordenada Color	Diferencia de mediana	Intervalo de Confianza al 95,2%		Valor p
Arroz Entero (AE)	L*	1,540	0,880	1,880	0,0000
	a*	0,750	0,6900	0,8698	0,0049
	b*	-16,885	-17,090	-16,790	0,0000
Arroz Quebrado (AQ)	L*	-0,330	-0,830	0,450	0,3856
	a*	0,670	0,6299	1,5500	0,0000
	b*	-13,950	-14,060	-13,860	0,0000
Harina de Arroz (AH)	L*	9,350	8,870	9,890	0,0000
	a*	1,910	1,8701	1,9301	0,0000
	b*	-1,930	-2,190	-1,530	0,0000

Elaborado por: Chuchuca, Dick, Peñafiel

En el anexo B se muestran los resultados de la prueba de Mann-Whitney para las coordenadas L*, a* y b* en las tres muestras de arroz: Arroz Entero (AE), Arroz Quebrado (AQ) y Harina de Arroz (AH). En la tabla 11 se muestra un resumen de los valores p obtenidos de la prueba de Mann-Whitney para diferencias de medianas de cada condición.

3.3. Comparación de medidas entre muestras

Se compararon entre muestras las mediciones obtenidas por el Sistema de Visión Computarizada (SVC) para conocer si existe diferencia significativa en el color cuando difiere el tamaño de partícula. Las muestras, como se explicó anteriormente, se obtuvieron a partir de una misma muestra de arroz blanco, siendo la única variable el tamaño de partícula.

Se definió como factor el tamaño de partícula con tres niveles: Arroz Entero (AE) con 1,992 mm, Arroz Quebrado (AQ) con 1,793 mm, y Harina de Arroz (AH) con 0,462 mm; tratamientos 1, 2 y 3, respectivamente.

Se recurrió a la prueba estadística no paramétrica de Kruskal-Wallis para la comparación entre muestras, debido a que los datos no presentan normalidad y se requiere de comparar más de dos grupos.

Prueba de Kruskal-Wallis

El contraste de hipótesis planteado para la prueba de comparación entre muestras se señala a continuación:

H_0 : Las medianas de las coordenadas de color L^* proporcionadas por el SVC para las muestras AE, AQ y AH son iguales.

vs.

H_1 : Las medianas de las coordenadas de color L^* proporcionadas por el SVC para las muestras AE, AQ y AH no son todas iguales.

En la tabla 12 se muestra el resultado de la prueba de Kruskal-Wallis para la comparación de la coordenada de color L^* entre las muestras AE, AQ y AH. Con un valor $p < 0,1$ como resultado de la prueba, existe suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula y concluir que al menos una muestra difiere en la valoración de la coordenada de color L^* .

En el anexo E se muestran los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis para las comparaciones entre muestras de cada

una de las coordenadas de color. El resumen de los resultados de la prueba se detalla en la tabla 13.

TABLA 12
RESULTADO DE LA PRUEBA DE KRUSKAL-WALLIS
ENTRE LAS MUESTRAS DE ARROZ PARA LA
COORDENADA L*

Tratamiento	N	Mediana	Clasificación del promedio	Z
1	30	61	15,5	-7,7
2	30	69	45,5	0
3	30	79	75,5	7,7
General	90		45,5	
Estadístico de prueba H				79,12
Grados de Libertad (GL)				2
Valor p				0,000
Valor p (ajustado)				0,000

Elaborado por: Chuchuca, Dick, Peñafiel

Para cada una de las coordenadas de color L*, a* y b*, la prueba de Kruskal-Wallis señala valor $p < 0,1$. Concluyendo que existe diferencia significativa en al menos una de las muestras que se analizaron para cada coordenada, pero no es posible conocer cuál es la muestra que difiere o si realmente la diferencia está marcada entre todas. Para poder llegar a ese

análisis es necesaria la prueba de Mann-Whitney, comparando por pares cada uno de los tratamientos posibles.

TABLA 13.
VALOR P DE LA PRUEBA DE KRUSKAL-WALLIS PARA LAS
COORDENADAS DE COLOR L*, a* Y b*

Coordenada de Color	Tratamiento	N	Mediana	Valor p
L*	1	30	61,00	0,000
	2	30	69,00	
	3	30	79,00	
a*	1	30	-1,000	0,000
	2	30	-1,000	
	3	30	-2,000	
b*	1	30	27,00	0,000
	2	30	24,00	
	3	30	11,00	

Elaborado por: Chuchuca, Dick, Peñafiel

Prueba de Mann-Whitney

El contraste de hipótesis para la prueba de Mann-Whitney se detalla a continuación:

H_0 : Las medianas de la coordenada de color L* del tratamiento 1, Arroz Entero (AE), y del tratamiento 2, Arroz Quebrado (AQ), son iguales.

vs.

H_1 : Las medianas de la coordenada de color L^* del tratamiento 1, Arroz Entero (AE), y del tratamiento 2, Arroz Quebrado (AQ), no son iguales.

En la tabla 14 se muestra el resultado de la prueba de Mann-Whitney, señalando un valor $p < 0,1$, por lo cual existe suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula y concluir que las medianas de la coordenada de color L^* del tratamiento 1, Arroz Entero (AE), y del tratamiento 2, Arroz Quebrado (AQ), no son iguales.

TABLA 14
RESULTADO DE LA PRUEBA DE MANN-WHITNEY PARA
LA COORDENADA L^* ENTRE EL TRATAMIENTO 1 Y EL
TRATAMIENTO 2

	N	Mediana
L^* Tratamiento 1	30	61,000
L^* Tratamiento 2	30	69,000
Estadístico de prueba W		465,0
Valor p		0,0000
Valor p (ajustado por empates)		0,0000

Elaborado por: Chuchuca, Dick, Peñafiel

En el anexo F se muestran los resultados de la prueba de Mann-Whitney para las demás comparaciones entre tratamientos y para cada coordenada de color. En la tabla 15 se resumen los valores p de las pruebas.

TABLA 15
VALOR P DE LA PRUEBA DE MANN-WHITNEY ENTRE
TRATAMIENTOS PARA LAS COORDENADAS DE COLOR

Coordenada de Color	Comparación	Valor p
L*	Tratamiento 1 vs Tratamiento 2	0,0000
	Tratamiento 1 vs Tratamiento 3	0,0000
	Tratamiento 2 vs Tratamiento 3	0,0000
a*	Tratamiento 1 vs Tratamiento 2	0,0287
	Tratamiento 1 vs Tratamiento 3	0,0000
	Tratamiento 2 vs Tratamiento 3	0,0000
b*	Tratamiento 1 vs Tratamiento 2	0,0000
	Tratamiento 1 vs Tratamiento 3	0,0000
	Tratamiento 2 vs Tratamiento 3	0,0000

Elaborado por: Chuchuca, Dick, Peñafiel

3.4. Análisis de Resultados

Análisis de la comparación de medidas con método de referencia

De los resultados obtenidos, detallados en la tabla 11, para la muestra Arroz Entero (AE), la prueba de Mann-Whitney para la

diferencia de medianas, muestra valores $p < 0,1$ para las coordenadas de color L^* , a^* y b^* , por lo que existe suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula y concluir que las medianas de las coordenadas de color L^* , a^* y b^* proporcionadas por el colorímetro Konika Minolta CR-400 y el Sistema de Visión Computarizada (SVC) no son iguales. Por lo tanto, no es posible la validación del SVC para la medición de color en muestras de arroz con tamaño de partícula de 1,992 mm.

Las diferencias de medianas estimadas en la medición de color entre el colorímetro Konika Minolta CR-400 y el SVC para las coordenadas de color L^* , a^* y b^* son de 1,540, 0,750 y de -16,885 unidades, respectivamente. Los intervalos de confianza contruidos con un nivel de 95,2% para las diferencias estimadas son entre 0,88 y 1,88 unidades para la coordenada L^* , entre 0,69 y 0,8698 unidades para la coordenada a^* , y entre -17,09 y -16,79 unidades para la coordenada b^* . Las mediciones de las coordenadas de color L^* y a^* proporcionadas por el colorímetro Konika Minolta CR-400 tienden a ser mayores que las proporcionadas por el SVC y menores para la coordenada b^* .

En la muestra Arroz Quebrado (AQ), de los resultados obtenidos se observa que únicamente la coordenada de color L^* presenta un valor $p > 0,1$, por lo que existe suficiente evidencia estadística para no rechazar la hipótesis nula. Es decir, que no existe diferencia significativa entre las mediciones de la coordenada de color L^* proporcionadas por el colorímetro Konika Minolta y el SVC.

En cambio, para las coordenadas de color a^* y b^* de la muestra AQ no es posible llegar a la misma conclusión, debido a que muestran un valor $p < 0,1$ para ambos casos, por lo que la hipótesis nula se rechaza. Las mediciones para las coordenadas de color a^* y b^* proporcionadas por los dos equipos difieren.

Por lo tanto, no es posible afirmar que para la medición de color de arroz quebrado con un tamaño de partícula de 1,793 mm, es posible la utilización de SVC como método validado frente a un colorímetro Konika Minolta CR-400, porque para describir a un color es necesario de las tres coordenadas de color, L^* , a^* y b^* .

Las diferencias estimadas de medianas entre colorímetro Konika Minolta CR-400 y SVC para las coordenadas a^* y b^* de la muestra AQ son de 0,670 y -13,950, respectivamente. Los valores de a^* proporcionados por el colorímetro Konika Minolta CR-400 tienden a ser mayores a los proporcionados por el SVC, la variación de la diferencia entre los métodos para ésta coordenada de color está comprendida entre 0,6299 y 1,55 unidades con un nivel de confianza de 95,2%. Para el espacio de color b^* , las mediciones por el colorímetro Konika Minolta CR-400 tienden a ser menores a las medidas por el SVC, con un intervalo de variación entre -14,06 a -13,86 unidades y un nivel de confianza de 95,2%.

Para la muestra Harina de Arroz (AH), las coordenadas del espacio de color L^* , a^* y b^* medidas con el SVC no fueron posible validarlas frente al colorímetro Konika Minolta CR-400. El resultado de la prueba de Mann-Whitney para la diferencia de medianas mostró valores $p < 0,1$, por lo que se rechaza la hipótesis nula. En conclusión, las mediciones de las coordenadas de color L^* , a^* y b^* obtenidas por el colorímetro Konika Minolta CR-400 y el SVC tienen diferencia significativa, no son iguales.

Las coordenadas de color L^* y a^* medidas por el colorímetro Konika Minolta CR-400 muestran tendencia a exceder a las medidas por el SVC, en 9,35 y 1,91 unidades respectivamente para la muestra AH. Por otro lado, las mediciones para la coordenada de color b^* tienden a ser menores en comparación a las obtenidas en el SVC en 1,93 unidades. El intervalo de confianza para las diferencias está comprendido entre 8,87 y 9,89 unidades para la coordenada L^* , entre 1,8761 y 1,9301 unidades para la coordenada a^* , y entre 2,19 y 1,52 unidades para b^* ; los intervalos son contruidos con un nivel de confianza de 95,2%.

Finalmente, luego de analizados los datos en los tres tratamientos de arroz, es posible concluir que la medición de color por parte del Sistema de Visión Computarizada (SVC) difiere significativamente frente a la medición que se realiza con el colorímetro Konika Minolta CR-400; no es posible la validación. Se pueden conocer estimaciones de cuantas unidades varían en las mediciones entre métodos para cada coordenada de color en las tres condiciones de tamaño de partículas para arroz.

Por otro lado, como se observa en la tabla 9, el SVC proporciona un color más acertado que el colorímetro Konika Minolta CR-400 si se las compara con la muestra original. Sin embargo, el colorímetro presenta una menor desviación en sus mediciones.

Análisis de la comparación de medidas entre muestras

Para la prueba de comparación de medidas entre muestras, utilizando el método de medición de color SVC, los resultados se resumen en la tabla 13. Las coordenadas de color L^* , a^* y b^* señalan un valor $p < 0,1$ para la prueba de Kruskal-Wallis, por lo que existe suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis de que las muestras a diferentes tamaños de partícula no tienen diferencia significativa en cada coordenada del espacio de color. En conclusión, al menos una muestra difiere en las mediciones de L^* , a^* y b^* .

Sin embargo, la prueba de Mann-Whitney se desarrolló con el objetivo de encontrar si la diferencia que existía era de al menos una muestra o si la diferencia era marcada en el grupo.

Analizando los resultados que se muestran en la tabla 15, la comparación entre tratamientos, en cada coordenada de color L^* , a^* y b^* , señala un valor $p < 0,1$, por lo cual existe la suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula y concluir que las mediciones difieren en todos los casos.

Por lo tanto, las muestras Arroz Entero (AE) con tamaño de partícula 1,992 mm, Arroz Quebrado (AQ) con tamaño de partícula de 1,793 mm y Harina de Arroz (AH) con tamaño de partícula de 0,462 mm difieren significativamente en el color medido por el Sistema de Visión Computarizada (SVC) pese a provenir de la misma muestra. En conclusión, la variación del tamaño de partícula incide en el color del arroz blanco.

CAPÍTULO 4

4. APLICACIÓN DEL MÉTODO EN ALIMENTOS SEGÚN LA ESTRUCTURA DE LA MATRIZ ALIMENTARIA

4.1. Materiales

Para la validación del método de medición de color utilizando el Sistema de Visión Computarizada (SVC) en alimentos según la estructura de la matriz alimentaria, se utilizó un colorímetro Konika Minolta CR-400, como método de referencia, y panes con tres estructuras diferentes para el análisis, como se observa en la figura 4.1.

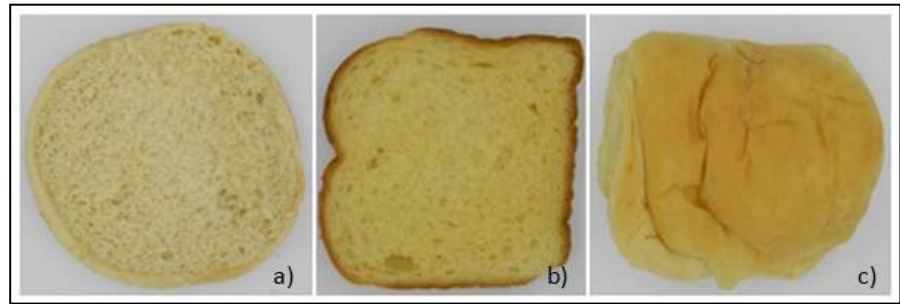


Figura 4.1. Muestras de pan: a) Miga gruesa, b) Miga fina, c) Estructura cerrada

Elaborado por: Chuchuca, Dick, Peñafiel

Las muestras se adquirieron en el mercado local. Se utilizó pan de hamburguesa para representar a panes con miga gruesa (MG), pan de molde para representar panes con miga fina (MF), y la superficie de un pan precocido para una estructura cerrada completa (C). En la tabla 16 se detalla el tamaño de poro.

TABLA 16

TAMAÑO DE PORO DE LAS MUESTRAS DE PAN

Muestra	Tamaño de poro
Pan Hamburguesa (MG)	2,5 mm
Pan Molde (MF)	1 mm

Elaborado por: Chuchuca, Dick, Peñafiel

Debido a que las muestras no provenían del mismo origen, no fue posible la comparación de las mediciones de color entre

muestras, con el objetivo de encontrar diferencia significativa en el color cuando un alimento posee distinta estructura en su matriz. La limitación fue no poder elaborar muestras con distintas estructuras a partir de un mismo origen, condición necesaria si se desea comparar muestras donde la única variable sea la estructura de su matriz.

4.2. Comparación de medidas con método de referencia

La experimentación, al igual que el capítulo anterior, se desarrolló con el objetivo de validar el método de medición de color Sistema de Visión Computarizada (SVC) con el método de referencia de medición, colorímetro Konika Minolta CR-400. Para lo cual, se definió primero el número de observaciones (n) igual a 30, considerando que para las mediciones no se necesitaba algún recurso más allá del uso del equipo y las muestras a utilizar; se decidió realizar la medición para cada condición de la estructura de la matriz alimentaria, usando la misma muestra para evitar variaciones de color que pudiesen existir.

En la tabla 17 se muestran las medias aritméticas y desviaciones estándar obtenidas de las mediciones de color proporcionados por el colorímetro Konika Minolta CR-400 y el SVC.

TABLA 17
PROMEDIO DE LAS MEDICIONES DE COLOR EN
MUESTRAS DE PAN

Muestra	Coordenada Color	CR-400	SVC
Pan Hamburguesa (MG)	L*	70,11 ± 2,77	68,43 ± 1,28
	a*	-1,22 ± 0,11	-2,03 ± 0,49
	b*	15,04 ± 0,73	29,60 ± 0,67
Pan de Molde (MF)	L*	72,95 ± 1,06	67,10 ± 0,88
	a*	-2,92 ± 0,13	-2,43 ± 0,82
	b*	22,41 ± 0,89	42,4 ± 0,49
Pan Precocido (C)	L*	63,76 ± 1,49	57,93 ± 1,55
	a*	6,63 ± 0,74	9,30 ± 0,92
	b*	29,24 ± 0,80	49,63 ± 0,96

Elaborado por: Chuchuca, Dick, Peñafiel

La hipótesis nula planteada es que no existe diferencia significativa entre las mediciones de color proporcionadas por el Sistema de Visión Computarizada (SVC) y el colorímetro Konika Minolta CR-400. La hipótesis alterna propone que sí existe diferencia en las mediciones de color entre los métodos.

Antes de realizar la comparación, primero se realiza una prueba de normalidad de los datos obtenidos para poder escoger entre una prueba t-Student para normalidad de datos o una prueba no paramétrica de Mann-Whitney en caso contrario, herramientas estadísticas que se utilizan con el objetivo de encontrar diferencia significativa entre dos grupos.

La prueba de normalidad es necesaria para cada una de las coordenadas de color L^* , a^* y b^* en las tres estructuras de panes, obtenidas tanto por el colorímetro Konika Minolta CR-400 y el Sistema de Visión Computarizada (SVC).

Prueba de Normalidad

El contraste de hipótesis para la prueba de normalidad se detalla a continuación:

H_0 : Los valores de la coordenada de color L^* de Pan de Hamburguesa (MG) proporcionados por el colorímetro Konika Minolta CR-400 presentan una distribución normal.

vs.

H_1 : Los valores de la coordenada de color L^* de Pan de Hamburguesa (MG) proporcionados por el colorímetro Konika Minolta CR-400 no presentan una distribución normal.

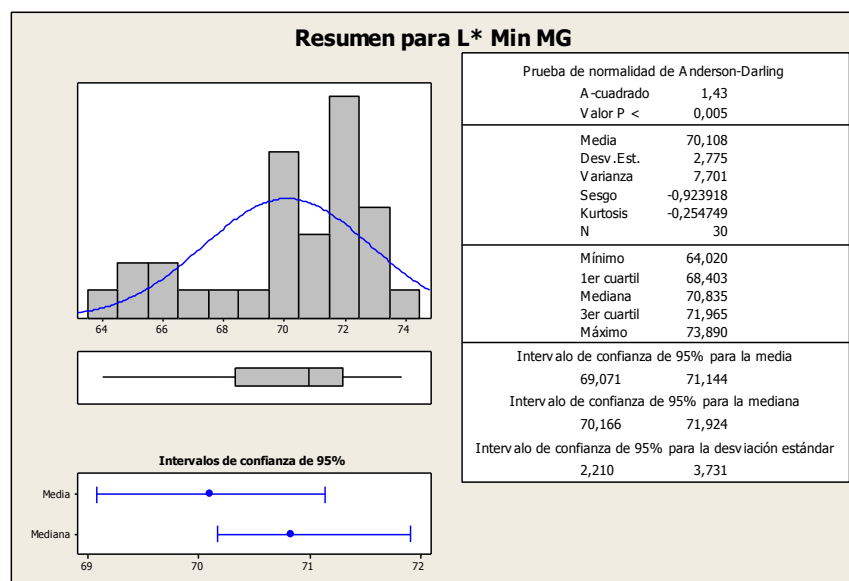


Figura 4.2. Resumen Gráfico para la coordenada L^* medida por el colorímetro Konika Minolta CR-400 para la muestra Pan de Hamburguesa (MG)

Elaborado por: Chuchuca, Dick, Peñafiel

En la figura 4.2. se observa el Resumen Gráfico para la coordenada de color L^* de la muestra Pan de Hamburguesa (MG), que señala un valor $p < 0,1$. Por lo tanto, existe suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula y sustentar el planteamiento de que los valores de la coordenada

de color L^* proporcionados por el colorímetro Konika Minolta CR-400 no presentan una distribución normal.

En el anexo C se muestra el Resumen Gráfico para cada una de las coordenadas de color L^* , a^* y b^* de las muestras Pan de Hamburguesa (MG), Pan de Molde (MF), y Pan Precocido (C), medidas con el colorímetro Konika Minolta CR-400 y el SVC.

TABLA 18
VALOR P DE LA PRUEBA DE NORMALIDAD PARA LAS
COORDENADAS DE COLOR DE LAS MUESTRAS DE PAN

Muestra	Coordenada Color	Valor p	
		CR-400	SVC
Pan Hamburguesa (MG)	L^*	< 0,005	0,005
	a^*	0,285	< 0,005
	b^*	0,259	< 0,005
Pan de Molde (MF)	L^*	0,853	< 0,005
	a^*	0,142	< 0,005
	b^*	0,127	< 0,005
Pan Precocido (C)	L^*	0,305	0,055
	a^*	0,33	< 0,005
	b^*	0,873	< 0,005

Elaborado por: Chuchuca, Dick, Peñafiel

Los resultados del valor p para cada condición se resumen en la tabla 18. Las mediciones de las coordenadas de espacio de color L^* , a^* y b^* proporcionadas por el colorímetro Konika

Minolta CR-400, a excepción de las mediciones de L^* para la muestra Pan de Hamburguesa (MG), presentan en el Resumen Gráfico un valor $p > 0,1$. Por lo tanto, existe suficiente evidencia estadística para no rechazar la hipótesis nula y respaldar el planteamiento de que las mediciones por parte del colorímetro Konika Minolta CR-400 presentan la condición de normalidad en sus datos.

Para la medición de la coordenada L^* en la muestra MG con el colorímetro Konika Minolta CR-400 y las mediciones por el SVC de las coordenadas L^* , a^* y b^* en las tres muestras, MG, MF y C, el Resumen Gráfico muestra un valor $p < 0,1$ para cada una de las condiciones mencionadas. Por lo tanto, existe suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula y concluir que las mediciones de L^* por el colorímetro Konika Minolta CR-400 para MG y las mediciones por el SVC para las tres muestras presentan una distribución no normal.

Por lo tanto, al presentar datos con la condición de normalidad y no normalidad, para poder realizar una comparación y conocer si existe diferencia significativa entre las mediciones

de color por el colorímetro Konika Minolta CR-400 y el SVC, es necesario recurrir a la prueba no paramétrica de Mann-Whitney. La medida de tendencia central que se analiza en este tipo de prueba es la mediana. En la tabla 19 se muestran las medianas obtenidas por los dos métodos de medición.

TABLA 19
MEDIANAS DE LAS COORDENADAS DE COLOR PARA
LAS MUESTRAS DE PAN

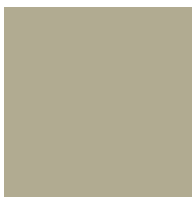
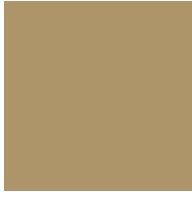
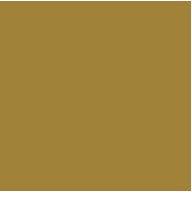
Muestra	Coordenada Color	CR-400	SVC
Pan Hamburguesa (MG)	L*	70,83	68,50
	a*	-1,24	-2,00
	b*	14,96	29,50
Pan de Molde (MF)	L*	72,98	67,00
	a*	-2,89	-3,00
	b*	22,24	42,00
Pan Precocido (C)	L*	64,11	58,00
	a*	6,63	9,00
	b*	29,22	50,00

Elaborado por: Chuchuca, Dick, Peñafiel

En la tabla 20 se muestran los colores contruidos en el software Adobe® Photoshop® CS5 a partir de las medianas de cada coordenada de color obtenidos con el colorímetro Konika Minolta CR-400 y el SVC, para las muestras de pan. Como se observa, los colores obtenidos por el SVC tienen más similitud

a las muestras reales, pero es necesario realizar otro estudio para poder concluir si realmente la utilización del SVC muestras colores más acertados a la muestra original que un colorímetro Konika Minolta CR-400.

TABLA 20
COLORES CONSTRUIDOS A PARTIR DE LAS MEDIANAS PARA LAS
MUESTRAS DE PAN

Muestra			CR-400		SVC	
MG		L*	70,83		68,50	
		a*	-1,24		-2,00	
		b*	14,96		29,50	
MF		L*	72,98		67,00	
		a*	-2,89		-3,00	
		b*	22,24		42,00	
C		L*	64,11		58,00	
		a*	6,63		9,00	
		b*	29,22		50,00	

Elaborado por: Chuchuca, Dick, Peñafiel

Prueba de Mann-Whitney

El contraste de hipótesis para la prueba de Mann-Whitney se detalla a continuación:

H_0 : Las medianas de la coordenada de color L^* de Pan de Hamburguesa (MG) proporcionadas por el colorímetro Konika Minolta CR-400 y el Sistema de Visión Computarizada (SVC) son iguales.

vs.

H_1 : Las medianas de la coordenada de color L^* de Pan de Hamburguesa (MG) proporcionadas por el colorímetro Konika Minolta CR-400 y el Sistema de Visión Computarizada (SVC) no son iguales.

Los resultados se muestran en la tabla 21. La prueba de Mann-Whitney para la diferencia de medianas señala un valor $p < 0,1$. Por lo tanto, existe suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula y concluir que las medianas de las coordenadas de color L^* de Pan de Hamburguesa (MG) proporcionadas por el colorímetro Konika Minolta CR-400 y el SVC no son iguales. La estimación para la diferencia de la mediana entre el colorímetro Konika Minolta CR-400 y el SVC es de 2,220 unidades y con un 95,2% de confianza, el intervalo está comprendido entre 1,371 y 3,150 unidades de la coordenada de color L^* .

TABLA 21
RESULTADO DE LA PRUEBA DE MANN-WHITNEY PARA
LA COORDENADA L* DE LA MUESTRA PAN DE
HAMBURGUESA (MG)

	N	Mediana
L* Konika Minolta CR-400 MG	30	70,835
L* SVC MG	30	68,500
Estimación de diferencia		2,220
Intervalo de confianza (IC) para la diferencia		(1,371; 3,150)
Nivel de confianza para el intervalo		95,2%
Estadístico de prueba W		1148,0
Valor p		0,0006
Valor p (ajustado por empates)		0,0006

Elaborado por: Chuchuca, Dick, Peñafiel

TABLA 22
VALOR P DE LA PRUEBA DE MANN-WHITNEY PARA LAS
COORDENADAS DE COLOR DE LAS MUESTRAS DE PAN

Muestra	Coordenada Color	Diferencia de mediana	Intervalo de Confianza al 95,2%		Valor p
Pan de Hamburguesa (MG)	L*	2,220	1,371	3,15	0,0006
	a*	0,770	0,7202	0,85	0,0000
	b*	-14,550	-15,01	-14,14	0,0000
Pan de Molde (MF)	L*	5,890	5,24	6,31	0,0000
	a*	-0,080	-0,8499	0,08	0,4464
	b*	-19,970	-20,39	-19,72	0,0000
Pan Precocido (C)	L*	5,910	5,05	6,64	0,0000
	a*	-2,590	-3,0303	-2,2499	0,0000
	b*	-20,350	-20,92	-19,92	0,0000

Elaborado por: Chuchuca, Dick, Peñafiel

En el anexo D se muestran las pruebas de Mann-Whitney para las coordenadas L^* , a^* y b^* en las muestras de pan: Pan de Hamburguesa (MG), Pan de Molde (MF), y Pan Precocido (C). En la tabla 20 se muestra un resumen de los valores p de la prueba de Mann-Whitney para diferencias de medianas.

4.3. Análisis de Resultados

Los resultados de la prueba de Mann-Whitney, que se detallan en la tabla 22 para la diferencia de medianas de las coordenadas de color L^* , a^* y b^* , medidas con el colorímetro Konika Minolta CR-400 y el SVC, señalan que únicamente para la medición de a^* en Pan de Molde (MF) la prueba ofrece un valor $p > 0,1$. Por lo tanto, existe suficiente evidencia estadística para no rechazar la hipótesis nula y sustentar que no existe diferencia significativa entre las medianas del colorímetro Konika Minolta CR-400 y el SVC. Pero para la medición de las coordenadas de color L^* y b^* en la muestra MF la prueba de diferencia de medianas señala un valor $p < 0,1$ en ambos casos, por lo que existe la evidencia estadística suficiente para rechazar la hipótesis nula y concluir que, las

mediciones para las coordenadas L^* y b^* en MF por el SVC no son iguales a las mediciones del colorímetro Konika Minolta CR-400.

Por lo tanto, no es posible afirmar que para la medición de color de un pan de miga fina con tamaño de abertura 1mm, el SVC sea validado frente a un colorímetro Konika Minolta CR-400, debido a que el color está descrito por las coordenadas de color L^* , a^* y b^* .

Además, la prueba de Mann-Whitney ofrece establecer cuantas unidades difieren los métodos. Para la muestra MF, la diferencia estimada de las coordenadas de color L^* y b^* es de 5,890 y -19,970 unidades respectivamente. Los intervalos de sus diferencias, con un 95,2% de confianza, están comprendidos entre 5,24 y 6,31 unidades para la coordenada L^* y entre -20,39 y -19,72 unidades para b^* ; siendo posible indicar que las mediciones del colorímetro Konika Minolta CR-400 tienden a ser mayores en relación al SVC para L^* y menores para b^* .

En las muestras Pan de Hamburguesa (MG) y Pan Precocido (C), para cada una de las coordenadas de color L^* , a^* y b^* , la prueba de diferencia de medianas muestra un valor $p < 0,1$. Por lo cual, existe suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula y conocer que existe diferencia significativa entre las mediciones del colorímetro Konika Minolta CR-400 y el SVC.

En conclusión no es posible validar el SVC como método de medición de color para pan de miga gruesa con tamaño de poro 2,5 mm, así como para superficies de pan precocido, teniendo como referencia un colorímetro Konika Minolta CR-400.

Es posible establecer, con cuantas unidades difieren entre sí los métodos. Para la muestra Pan de Hamburguesa (MG), la diferencia estimada para L^* , a^* y b^* es de 2,220, 0,770 y -14,550, respectivamente; es decir que las coordenadas L^* y a^* obtenidas con el colorímetro Konika Minolta CR-400 tienden a ser mayores en comparación al SVC; y mientras que para b^* , las mediciones tienden a ser menores. El intervalo de variación

de L^* está comprendido entre 1,371 y 3,15 unidades, para a^* entre 0,7202 y 0,85 unidades y entre -15,01 y -14,14 unidades para b^* . Estos intervalos están contruidos con un 95,2% de confianza.

Para la muestra Pan Precocido (C), las mediciones de color proporcionadas por los métodos Konika Minolta CR-400 y SVC marcan una diferencia en la mediana para L^* , a^* y b^* de 5,910, -2,590 y -20,350 unidades, respectivamente; es decir, que las mediciones de L^* por el colorímetro Konika Minolta CR-400 tienden a ser mayores, mientras que para a^* y b^* , las mediciones tienden a ser menores en comparación con el SVC. El intervalo de variación de L^* está comprendido entre 5,05 y 6,64 unidades, para a^* entre -3,0303 y -2,2499 unidades y entre -20,92 y -19,92 unidades para b^* . Estos intervalos están contruidos con un 95,2% de confianza.

Finalmente, luego de analizados los datos en los tres tratamientos de pan, es posible concluir que la medición de color por parte del Sistema de Visión Computarizada (SVC) difiere significativamente frente a la medición que se realiza

con el colorímetro Konika Minolta CR-400; no es posible la validación. Se pueden conocer estimaciones de cuantas unidades varían en las mediciones entre métodos para cada coordenada de color en las tres condiciones de estructura de la matriz alimentaria.

Por otro lado, como se observa en la tabla 20, el SVC proporciona un color, en muestras de pan, más acertado que el colorímetro Konika Minolta CR-400 si se las compara con la muestra original. Sin embargo, el colorímetro presenta una menor desviación en sus mediciones.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El Sistema de Visión Computarizada utilizado para medir el color en alimentos con diferente tamaño de partícula y diferente estructura de la matriz alimentaria, no se validó con referencia a un colorímetro Konika Minolta CR-400, debido a que existen diferencias significativas entre las mediciones obtenidas por ambos métodos.

La aplicación de un colorímetro en la industria tiene como objetivo encontrar diferencias de color entre una muestra y un patrón, disminuyendo así la subjetividad que conlleva la evaluación realizada por una persona. El Sistema de Visión Computarizada empleado, pese a no estar validado, puede cumplir la misma función, puesto que presenta repetitividad en las mediciones de color.

El Sistema de Visión Computarizada muestra colores más acertados a la muestra real en comparación al color que se obtiene por el colorímetro Konika Minolta CR-400, sin embargo este último presenta mediciones con una desviación menor.

El Sistema de Visión Computarizada encontró diferencias significativas en las mediciones de color en arroz con diferente tamaño de partícula, pese a provenir de la misma muestra; concluyendo que, el tamaño de partícula es un factor que incide en el color.

El método utilizado representa un bajo costo en su implementación, en comparación a la adquisición de un equipo profesional, como un colorímetro.

Se recomiendan mejoras para facilitar la operación del Sistema de Visión Computarizada empleado, como contar con un disparador automático para la toma de imágenes, transferir directamente las imágenes capturadas desde la cámara hacia el ordenador y fijar la cámara fotográfica en la parte superior de la estructura para facilitar la configuración de la misma.

Se recomienda realizar una experimentación utilizando el Sistema de Visión Computarizada, capturando imágenes de atlas de color, como un patrón, que permita conocer si el sistema proporciona valores congruentes de color.

Se recomienda realizar una evaluación sensorial para comprobar, mediante un análisis estadístico, si el Sistema de Visión Computarizada muestra colores más acertados a la muestra real en comparación a los colores que se obtiene por un colorímetro.

BIBLIOGRAFÍA

González, M. (2005). Análisis comparativo del color de diferentes vinos tintos mexicanos. Tesis de Pregrado, Departamento de Administración de Hoteles y Restaurantes, Escuela de Negocios, Universidad de las Américas Puebla, Puebla, México.

Konica Minolta Sensing Americas. (2011). Control de color en la industria alimenticia. Disponible en <http://sensing.konicaminolta.com.mx/wp-content/uploads/2011/05/FoodIndustryApps.pdf>

Badui, S. (2006). Química de los Alimentos. Cuarta edición, Pearson Educación, México, pp. 401-438.

Jácome, E. y Molina, S. (2008). Efecto de la leche concentrada por microfiltración tangencial en la calidad de queso semimaduro para sanduche, utilizando dos líquidos de lavado y diferentes tipos de grasa. Tesis de Pregrado, Universidad Técnica del Norte, Facultad de Ingeniería en

Ciencias Agropecuarias y Ambientales, Escuela De Ingeniería Agroindustrial, Ibarra, Ecuador.

Contreras, R. (2007). El origen del color en la naturaleza. Una introducción a la química del color. Primera edición, Universidad de Los Andes, Vicerrectorado Académico, CODEPRE, Venezuela, pp. 71-86

MetAs & Metrólogos Asociados. (2009). Medición de color. *La Guía MetAs*, 7; 3, 11. Extraído el 8 de Septiembre de 2012 desde <http://www.metas.com.mx/guiametas/La-Guia-MetAs-09-07-Medicion-de-color.pdf>

Konika Minolta Sensing, Inc. (2003). Precise color communication. Booklet of Konica Minolta, I, 12; 1, 10; II, 7; III, 1. Extraído el 22 de Octubre de 2012 desde <http://www.konicaminolta.com/instruments/knowledge/color/index.html>

Papadakis, E., Malek, S., Kamdem R., & Yam, K. (2000). A versatile and inexpensive technique for measuring color of foods. *Food Technology*, 54 (12), 48-51.

Misimi, E. (2007). Computer vision for quality grading in fish processing. Tesis de Ph.D., Faculty of Information Technology, Mathematics and

Electrical Engineering, Department of Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology, Noruega.

Girolami, A., Napolitano, F., Faraone, D. & Braghieri, A. (2012). Measurement of meat colour using a computer vision system. *Meat Science*, 93 (2), 111-118. doi: 10.1016/j.meatsci.2012.08.010

García, J. (2012). Luminotecnia. Iluminación de interiores y exteriores. Oriol Boix Aragonès, Departament d'Enginyeria Elèctrica, Barcelona, España, pp. 4. Abril del 2012. Disponible en <http://edison.upc.edu/curs/llum/tabla-contenidos.html>

Monje, L. (2008). Introducción a la fotografía científica. Centro de apoyo a la Investigación de la Universidad de Alcalá, Madrid, España. Disponible en http://foto.difo.uah.es/curso/la_iluminacion.html

MacDougall, D. (2002). Colour in food: Improving quality. CRC Press, EE.UU; Woodhead Publishing Limited, Inglaterra, pp. 35-46.

Debuire, B. (2008). Análisis y estudio de la iluminación y color en OPENGL. Tesis de Pregrado, Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, Escuela

de Ingeniería en Sistemas Computacionales, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador.

Capilla, P., Artigas, J. y Pujol, J. (2002). Fundamentos de Colorimetría. Servei de Publicacions de la Universitat de València, España, pp. 94-96.

Camporeale, P. y Dutt, G. (2006). Manual de Iluminación Eficiente. Universidad Tecnológica Nacional y Efficient Lighting Initiative, Buenos Aires, Argentina, Cap. 2. ISBN: 978-950-42-0077-2

X-Rite, Inc. (2002). Guía para entender la comunicación del color. Extraído el 22 de Mayo desde <http://ebookbrowse.com/comunicacion-del-color-artes-graficas-pdf-d70272124>

Netdisseny. (2009). Nociones Básicas de Teoría del Color, Cuaderno 2, Netdisseny, Castellón, España. Disponible en <http://www.weblogicnet.com/descargas/teoria-del-color.pdf>

Cortés, J. (2000). La percepción del color. Disponible en http://personal.us.es/jcortes/Material/Material_archivos/Articulos%20PDF/Color.pdf

CYTED. (2002). Temas en tecnologías de alimentos. Volumen I. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, Editorial Alfaomega / Instituto Politécnico Nacional, México, pp. 261-268.

Rabanal, J. (2010). Adaptación de un espectrofotómetro de esfera integradora a flujos luminosos intensos. Universidad Nacional de Ingeniería, Laboratorio de Fotometría FC-UNI. IV Conferencia Latino Americana de Energía Solar y XVII Simposio Peruano de Energía Solar, Cusco, Perú. Disponible en http://perusolar.org/17-spes-ponencias/04-%20Instrumentacion/RabanalReinaJulioArturo/Rabanal_Reina_Julio_Arturo.pdf

Commission International de L'Eclairage. (2012). Disponible en <http://www.cie.co.at>

LaCie. (s.f.). Libro blanco de la gestión del color 3: Espacios de color y conversión de colores. Disponible en http://www.lacie.com/download/whitepaper/wp_colormangement_3_es.pdf

Valero, A. (2011). Principios de color y holopintura. Editorial Club Universitario, España, pp. 139-166.

Zelanski, P. y Fisher, M. (2001). Color. Tercera Edición, Tursen S.A. / H. Blume, Madrid, España, pp. 64.

Hunter Associates Laboratory, Inc. (2008). Hunter L, a, b color scale. *Insight on Color*, 8 (9), 1-4. Extraído el 23 de Octubre desde <http://www.hunterlab.com/ApplicationNotes>

Cool Roof Rating Council. (2012). Roofing reflections. Disponible en www.coolroofs.com

Adobe Systems Incorporate. (2012). Acerca del color, Illustrator. Disponible en http://help.adobe.com/es_ES/illustrator/cs/using/WS714a382cdf7d304e7e07d0100196cbc5f-6295a.html#WS714a382cdf7d304e7e07d0100196cbc5f-628fa

Marqués, A. (2010). Estudio de la reproducción del color en rotuladores profesionales usados en diseño gráfico. Tesis de Pregrado, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, Universidad Pública de Navarra, España.

Minolta Co., Ltd. (2002). Konika Minolta: CR-400/410. Japón.

International Color Consortium. (2012). Frequently asked questions. Reston, Virginia. Disponible en <http://www.color.org/faqs.xalter>

Benzzo, M. (2005). Determinación objetiva del color en la elaboración de pastas modelo de embutidos crudo-curados. Tesis de Magister, Departamento de Salud Pública de la Facultad de Ciencias Veterinarias, Instituto de Tecnología en Alimentos, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fé, Argentina.

Litwiller, D. (2001). CCD vs. CMOS: Facts and Fiction. Teledyne DALSA, Waterloo, Ontario, Canadá. Disponible en http://www.teledynedalsa.com/corp/markets/CCD_vs_CMOS.aspx

Padrón, C. (2009). Sistema de visión computarizada y herramientas de diseño gráfico para la obtención de imágenes de muestras de alimentos segmentadas y promediadas en coordenadas CIE-L*a*b*. *Agronomía Costarricense*, 33 (2), 283-301. Extraído el 22 de Mayo de 2012 desde http://www.mag.go.cr/rev_agr/v33n02_283.pdf

Misimi, E., Mathiassen, J. & Erikson, U. (2007). Computer vision-based sorting of atlantic salmon (salmon salar) fillets according to their color level.

Journal of Food Science. Institute of Food Technologists, 72 (1), S30-S35.
doi: 10.1111/j.1750-3841.2006.00241.x

Mendoza, F., Dejmek, P. & Aguilera, J. (2006). Calibrated color measurements of agricultural foods using image analysis. *Postharvest Biology and Technology*, 41 (3), 285-295.

Padrón, C., Padrón, G., Montes, A. y Oropeza, R. (2012). Determinación del color en epicarpio de tomates (*Lycopersicum esculentum* mill.) con sistema de visión computarizada durante la maduración. *Agronomía Costarricense*, 36 (1), 97-111.

Zeuch, N. (2000). Understanding and applying machine vision. Segunda Edición, Marcel Dekker, Inc., Nueva York, EE.UU., pp. 166.

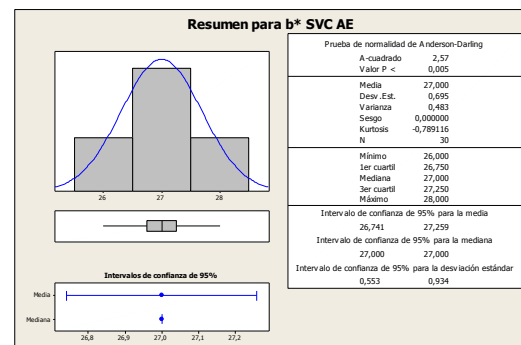
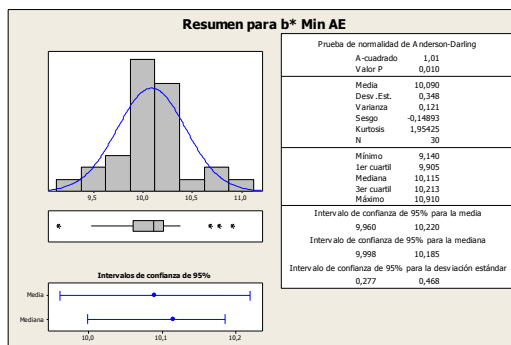
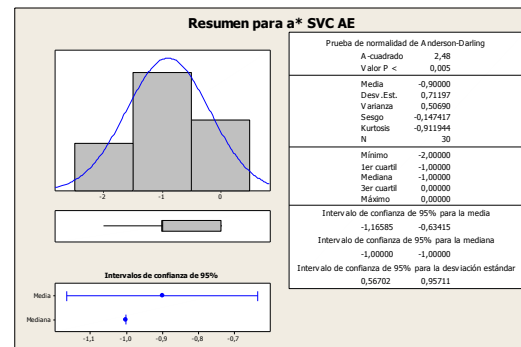
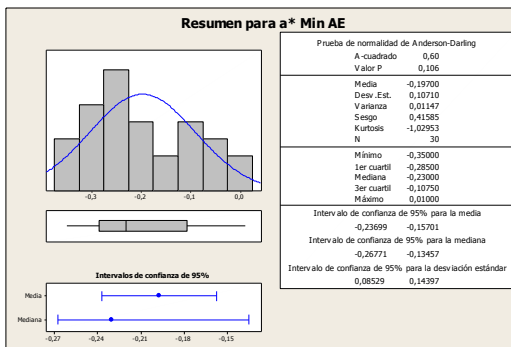
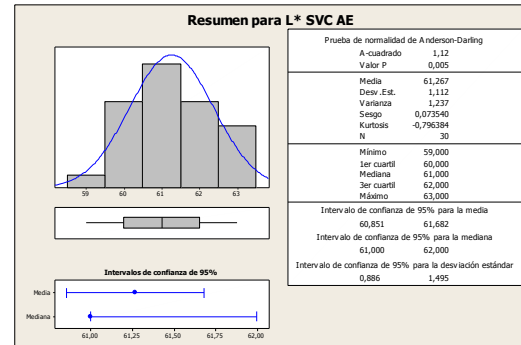
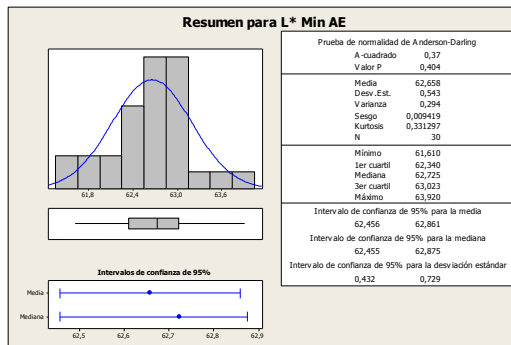
ANEXOS

ANEXO A

Resumen Gráfico para las coordenadas de color L*, a* y b* de Arroz Entero (AE) medidas en el colorímetro Minolta CR-400 y en el SVC

Minolta CR-400

SVC

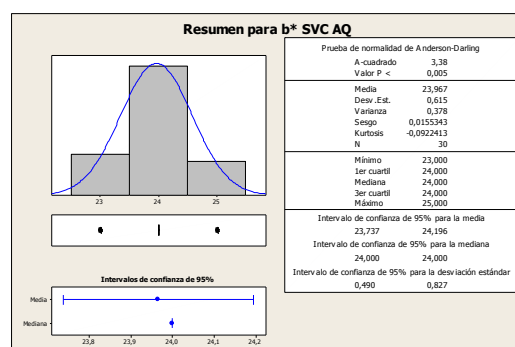
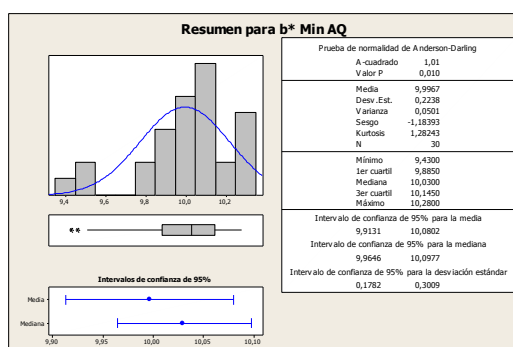
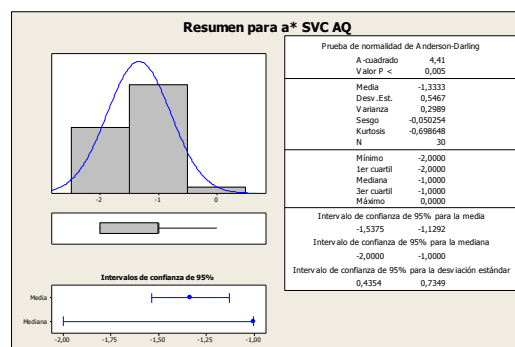
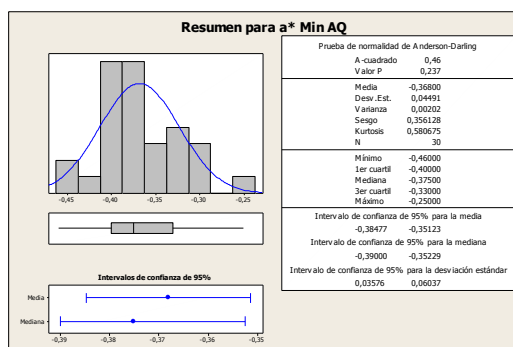
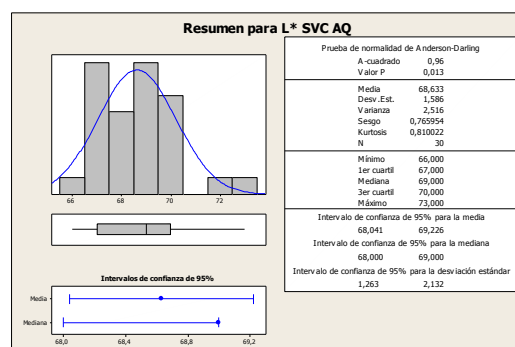
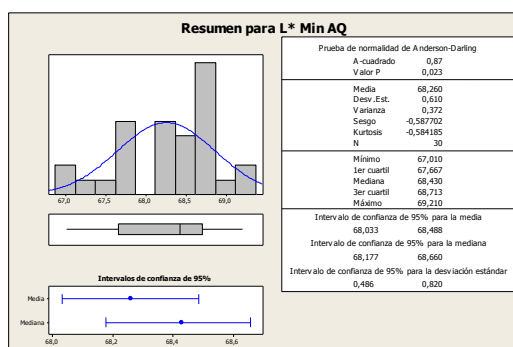


(Continúa...)

Resumen Gráfico para las coordenadas de color L*, a* y b* de Arroz Quebrado (AQ) medidas en el colorímetro Minolta CR-400 y en el SVC

Minolta CR-400

SVC

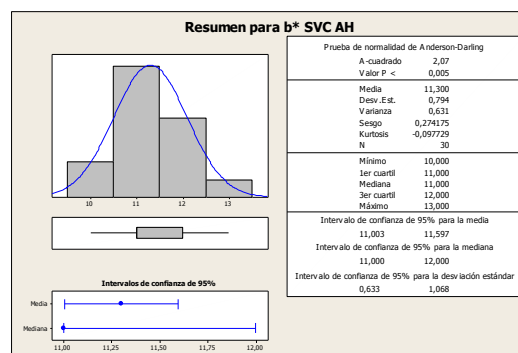
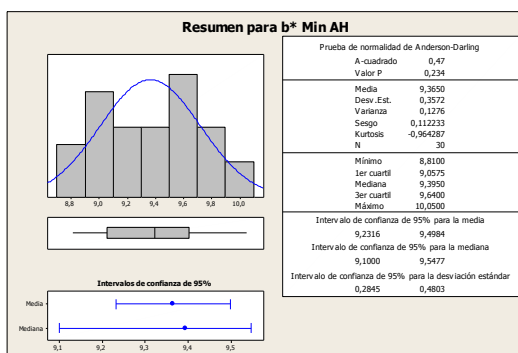
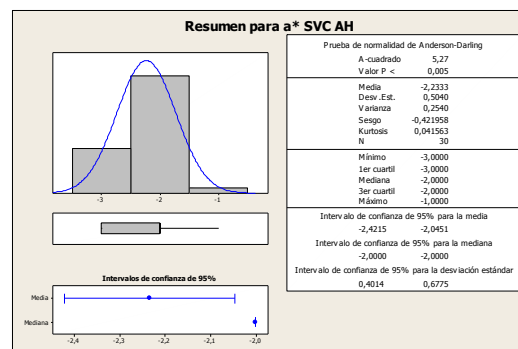
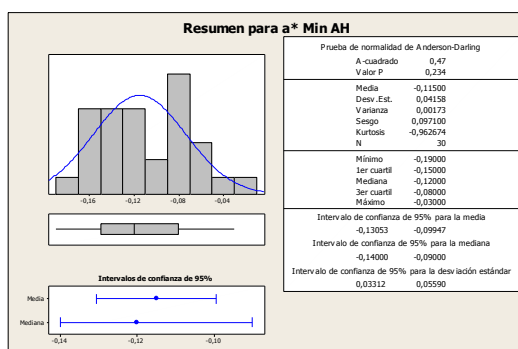
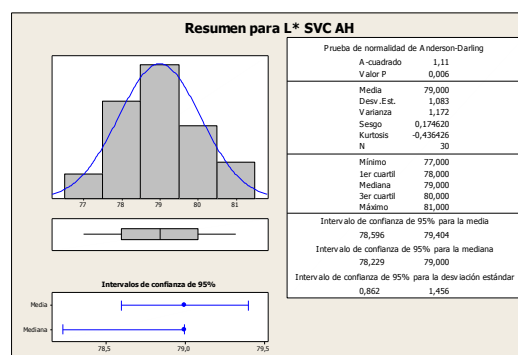
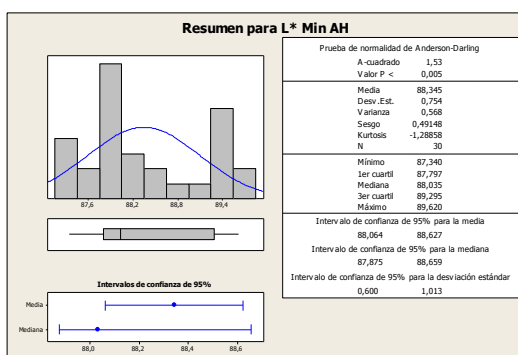


(Continúa...)

Resumen Gráfico para las coordenadas de color L*, a* y b* de Harina de Arroz (AH) medidas en el colorímetro Minolta CR-400 y en el SVC

Minolta CR-400

SVC



ANEXO B

Prueba no paramétrica Mann-Whitney para las coordenadas de color

L*, a* y b* de Arroz Entero (AE)

	N	Mediana
L* Konika Minolta CR-400 AE	30	62,725
L* SVC AE	30	61,000
Estimación de diferencia		1,540
Intervalo de confianza (IC) para la diferencia		(0,880; 1,880)
Nivel de confianza para el intervalo		95,2%
Estadístico de prueba W		1224,5
Valor p		0,0000
Valor p (ajustado por empates)		0,0000

	N	Mediana
a* Konika Minolta CR-400 AE	30	-0,2300
a* SVC AE	30	-1,0000
Estimación de diferencia		0,7500
Intervalo de confianza (IC) para la diferencia		(0,6900; 0,8698)
Nivel de confianza para el intervalo		95,2%
Estadístico de prueba W		1104,0
Valor p		0,0053
Valor p (ajustado por empates)		0,0049

	N	Mediana
b* Konika Minolta CR-400 AE	30	10,115
b* SVC AE	30	27,000
Estimación de diferencia		-16,885
Intervalo de confianza (IC) para la diferencia		(-17,090; -16,790)
Nivel de confianza para el intervalo		95,2%
Estadístico de prueba W		465,0
Valor p		0,0000
Valor p (ajustado por empates)		0,0000

(Continúa...)

**Prueba no paramétrica Mann-Whitney para las coordenadas de color
L*, a* y b* de Arroz Quebrado (AQ)**

	N	Mediana
L* Konika Minolta CR-400 AQ	30	68,430
L* SVC AQ	30	69,000
Estimación de diferencia		-0,330
Intervalo de confianza (IC) para la diferencia		(-0,830; 0,450)
Nivel de confianza para el intervalo		95,2%
Estadístico de prueba W		856,0
Valor p		0,3871
Valor p (ajustado por empates)		0,3856

	N	Mediana
a* Konika Minolta CR-400 AQ	30	-0,3750
a* SVC AQ	30	-1,0000
Estimación de diferencia		0,6700
Intervalo de confianza (IC) para la diferencia		(0,6299; 1,5500)
Nivel de confianza para el intervalo		95,2%
Estadístico de prueba W		1335,0
Valor p		0,0000
Valor p (ajustado por empates)		0,0000

	N	Mediana
b* Konika Minolta CR-400 AQ	30	10,030
b* SVC AQ	30	24,000
Estimación de diferencia		-13,950
Intervalo de confianza (IC) para la diferencia		(-14,060; -13,860)
Nivel de confianza para el intervalo		95,2%
Estadístico de prueba W		465,0
Valor p		0,0000
Valor p (ajustado por empates)		0,0000

(Continúa...)

Prueba no paramétrica Mann-Whitney para las coordenadas de color

L*, a* y b* de Harina de Arroz (AH)

	N	Mediana
L* Konika Minolta CR-400 AH	30	88,035
L* SVC AH	30	79,000
Estimación de diferencia		9,350
Intervalo de confianza (IC) para la diferencia		(8,870; 9,890)
Nivel de confianza para el intervalo		95,2%
Estadístico de prueba W		1365,0
Valor p		0,0000
Valor p (ajustado por empates)		0,0000

	N	Mediana
a* Konika Minolta CR-400 AH	30	-0,1200
a* SVC AH	30	-2,0000
Estimación de diferencia		1,9100
Intervalo de confianza (IC) para la diferencia		(1,8701; 1,9301)
Nivel de confianza para el intervalo		95,2%
Estadístico de prueba W		1365,0
Valor p		0,0000
Valor p (ajustado por empates)		0,0000

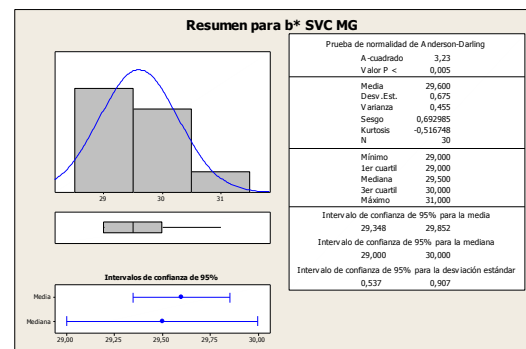
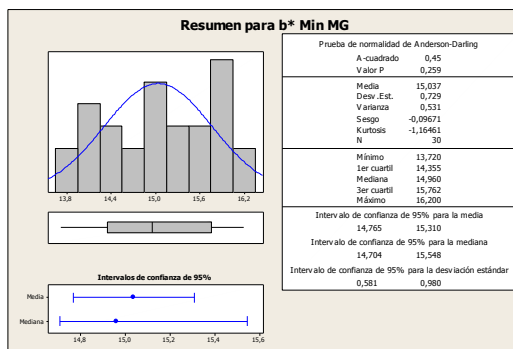
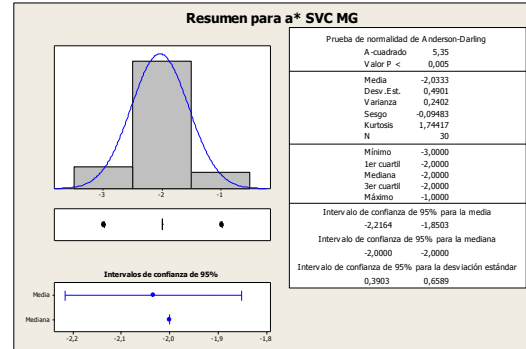
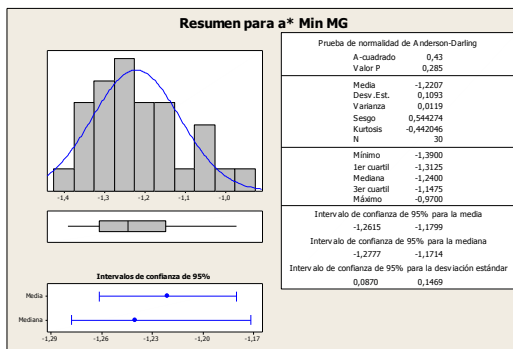
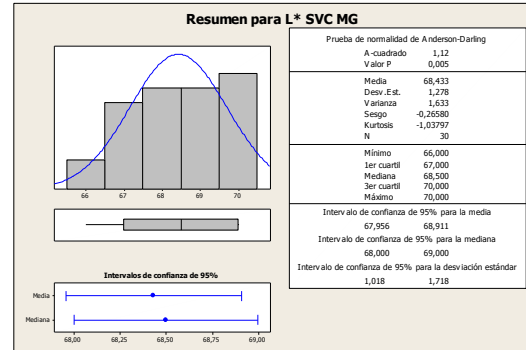
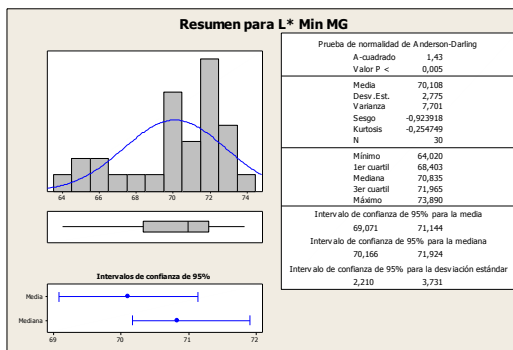
	N	Mediana
b* Konika Minolta CR-400 AH	30	9,395
b* SVC AH	30	11,000
Estimación de diferencia		-1,930
Intervalo de confianza (IC) para la diferencia		(-2,190; -1,530)
Nivel de confianza para el intervalo		95,2%
Estadístico de prueba		473,00
Valor p		0,0000
Valor p (ajustado por empates)		0,0000

ANEXO C

Resumen Gráfico para las coordenadas de color L*, a* y b* de Pan de Hamburguesa (MG) medidas en el colorímetro Minolta CR-400 y en el SVC

Minolta CR-400

SVC

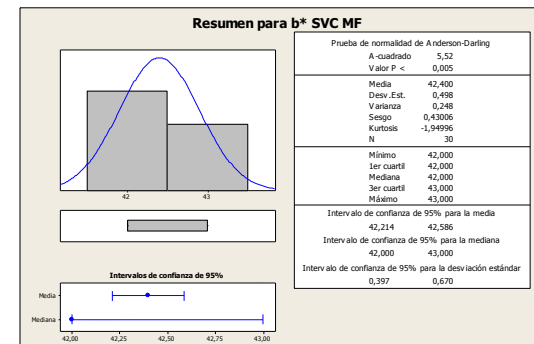
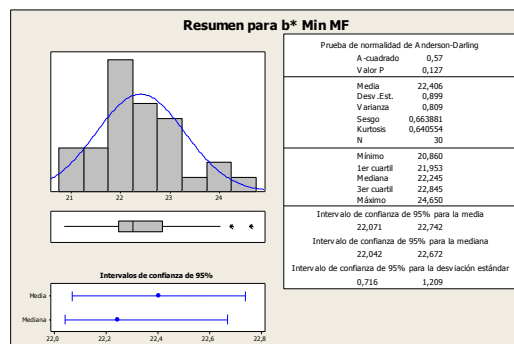
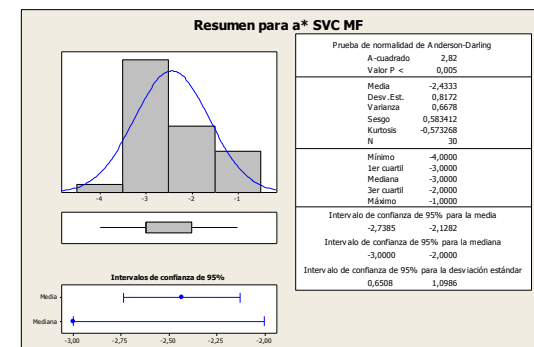
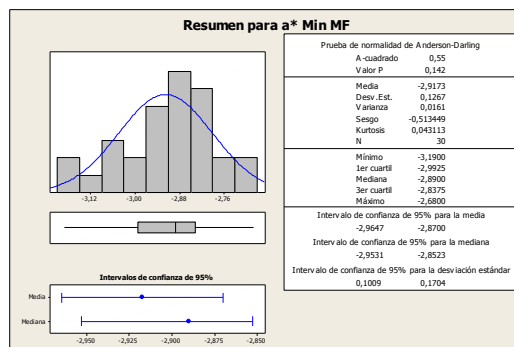
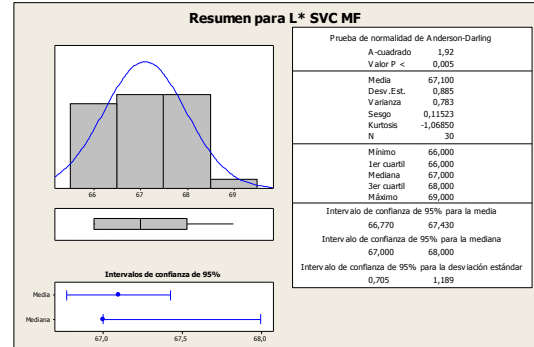
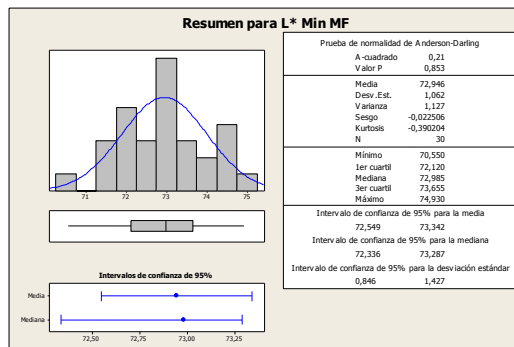


(Continúa...)

Resumen Gráfico para las coordenadas de color L*, a* y b* de Pan de Molde (MF) medidas en el colorímetro Minolta CR-400 y en el SVC

Minolta CR-400

SVC

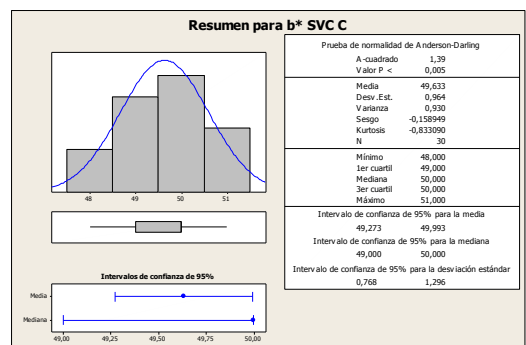
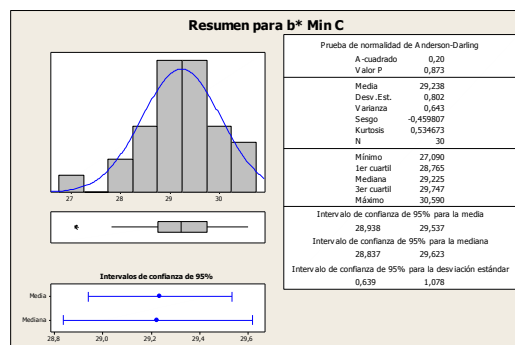
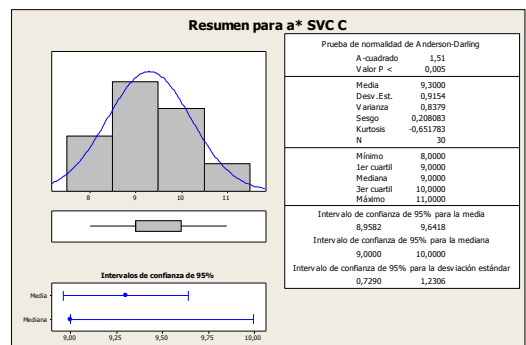
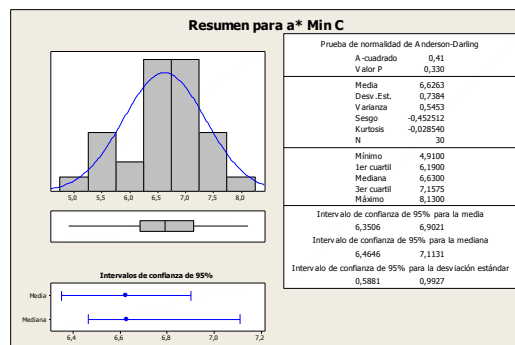
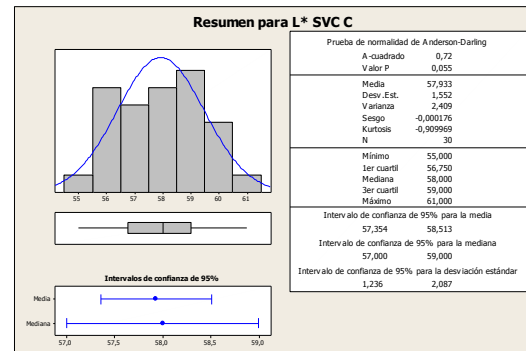
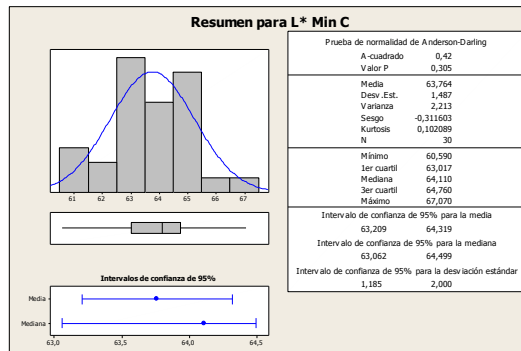


(Continúa...)

Resumen Gráfico para las coordenadas de color L*, a* y b* de Pan de Precocido (C) medidas en el colorímetro Minolta CR-400 y en el SVC.

Minolta CR-400

SVC



ANEXO D

Prueba no paramétrica Mann-Whitney para las coordenadas de color L*, a* y b* de Pan de Hamburguesa (MG)

	N	Mediana
L* Konika Minolta CR-400 MG	30	70,835
L* SVC MG	30	68,500
Estimación de diferencia		2,220
Intervalo de confianza (IC) para la diferencia		(1,371; 3,150)
Nivel de confianza para el intervalo		95,2%
Estadístico de prueba W		1148,0
Valor p		0,0006
Valor p (ajustado por empates)		0,0006

	N	Mediana
a* Konika Minolta CR-400 MG	30	-1,2400
a* SVC MG	30	-2,0000
Estimación de diferencia		0,7700
Intervalo de confianza (IC) para la diferencia		(0,7202; 0,8500)
Nivel de confianza para el intervalo		95,2%
Estadístico de prueba W		1278,0
Valor p		0,0000
Valor p (ajustado por empates)		0,0000

	N	Mediana
b* Konika Minolta CR-400 MG	30	14,960
b* SVC MG	30	29,500
Estimación de diferencia		-14,550
Intervalo de confianza (IC) para la diferencia		(-15,010; -14,140)
Nivel de confianza para el intervalo		95,2%
Estadístico de prueba W		465,0
Valor p		0,0000
Valor p (ajustado por empates)		0,0000

(Continúa...)

**Prueba no paramétrica Mann-Whitney para las coordenadas de color
L*, a* y b* de Pan de Molde (MF)**

	N	Mediana
L* Konika Minolta CR-400 MF	30	72,985
L* SVC MF	30	67,000
Estimación de diferencia		5,890
Intervalo de confianza (IC) para la diferencia		(5,240; 6,310)
Nivel de confianza para el intervalo		95,2%
Estadístico de prueba W		1365,0
Valor p		0,0000
Valor p (ajustado por empates)		0,0000

	N	Mediana
a* Konika Minolta CR-400 MF	30	-2,8900
a* SVC MF	30	-3,0000
Estimación de diferencia		-0,0800
Intervalo de confianza (IC) para la diferencia		(-0,8499; 0,0800)
Nivel de confianza para el intervalo		95,2%
Estadístico de prueba W		863,0
Valor p		0,4464
Valor p (ajustado por empates)		0,4413

	N	Mediana
b* Konika Minolta CR-400 MF	30	22,245
b* SVC MF	30	42,000
Estimación de diferencia		-19,970
Intervalo de confianza (IC) para la diferencia		(-20,390; -19,720)
Nivel de confianza para el intervalo		95,2%
Estadístico de prueba		465,0
Valor p		0,0000
Valor p (ajustado por empates)		0,0000

(Continúa...)

**Prueba no paramétrica Mann-Whitney para las coordenadas de color
L*, a* y b* de Pan Precocido (C)**

	N	Mediana
L* Konika Minolta CR-400 C	30	64,110
L* SVC C	30	58,000
Estimación de diferencia		5,910
Intervalo de confianza (IC) para la diferencia		(5,050; 6,640)
Nivel de confianza para el intervalo		95,2%
Estadístico de prueba W		1363,0
Valor p		0,0000
Valor p (ajustado por empates)		0,0000

	N	Mediana
a* Konika Minolta CR-400 C	30	6,6300
a* SVC C	30	9,0000
Estimación de diferencia		-2,5900
Intervalo de confianza (IC) para la diferencia		(-3,0303; -2,2499)
Nivel de confianza para el intervalo		95,2%
Estadístico de prueba W		471,0
Valor p		0,0000
Valor p (ajustado por empates)		0,0000

	N	Mediana
b* Konika Minolta CR-400 C	30	29,225
b* SVC C	30	50,000
Estimación de diferencia		-20,350
Intervalo de confianza (IC) para la diferencia		(-20,920; -19,920)
Nivel de confianza para el intervalo		95,2%
Estadístico de prueba W		465,0
Valor p		0,0000
Valor p (ajustado por empates)		0,0000

ANEXO E

Prueba Kruskal-Wallis para la comparación entre muestras de las coordenadas de color L*, a* y b*

Tratamiento	N	Mediana	Clasificación del promedio	Z
1	30	61	15,5	-7,7
2	30	69	45,5	0
3	30	79	75,5	7,7
General	90		45,5	
Estadístico de prueba H			79,12	
Grados de Libertad (GL)			2	
Valor p			0,000	
Valor p (ajustado)			0,000	

Prueba de Kruskal-Wallis para la coordenada L*

Tratamiento	N	Mediana	Clasificación del promedio	Z
1	30	-1,000	62,9	4,47
2	30	-1,000	51,0	1,42
3	30	-2,000	22,6	-5,89
General	90		45,5	
Estadístico de prueba H			37,77	
Grados de Libertad (GL)			2	
Valor p			0,000	
Valor p (ajustado)			0,000	

Prueba de Kruskal-Wallis para la coordenada a*

Tratamiento	N	Mediana	Clasificación del promedio	Z
1	30	27,00	75,5	7,70
2	30	24,00	45,5	0,00
3	30	11,00	15,5	-7,70
General	90		45,5	
Estadístico de prueba H			79,12	
Grados de Libertad (GL)			2	
Valor p			0,000	
Valor p (ajustado)			0,000	

Prueba de Kruskal-Wallis para la coordenada b*

ANEXO F

Prueba Mann-Whitney entre muestras Arroz Entero (AE), Arroz Quebrado (AQ) y Harina de Arroz (AH) de las coordenadas de color L*, a* y b*

	N	Mediana
L* Tratamiento 1 (AE)	30	61,000
L* Tratamiento 2 (AQ)	30	69,000
Estadístico de prueba W		465,0
Valor p		0,0000
Valor p (ajustado por empates)		0,0000

	N	Mediana
L* Tratamiento 1 (AE)	30	61,000
L* Tratamiento 3 (AH)	30	79,000
Estadístico de prueba W		465,0
Valor p		0,0000
Valor p (ajustado por empates)		0,0000

	N	Mediana
L* Tratamiento 2 (AQ)	30	69,000
L* Tratamiento 3 (AH)	30	79,000
Estadístico de prueba W		465,0
Valor p		0,0000
Valor p (ajustado por empates)		0,0000

	N	Mediana
a* Tratamiento 1 (AE)	30	-1,000
a* Tratamiento 2 (AQ)	30	-1,000
Estadístico de prueba W		1063,5
Valor p		0,0287
Valor p (ajustado por empates)		0,0148

	N	Mediana
a* Tratamiento 1 (AE)	30	-1,000
a* Tratamiento 3 (AH)	30	-2,000
Estadístico de prueba W		1288,5
Valor p		0,0000
Valor p (ajustado por empates)		0,0000

(Continúa...)

	N	Mediana
a* Tratamiento 2 (AQ)	30	-1,000
a* Tratamiento 3 (AH)	30	-2,000
Estadístico de prueba W		1229,5
Valor p		0,0000
Valor p (ajustado por empates)		0,0000

	N	Mediana
b* Tratamiento 1	30	27,000
b* Tratamiento 2	30	24,000
Estadístico de prueba W		1365,0
Valor p		0,0000
Valor p (ajustado por empates)		0,0000

	N	Mediana
b* Tratamiento 1	30	27,000
b* Tratamiento 3	30	11,000
Estadístico de prueba		1365,0
Valor p		0,0000
Valor p (ajustado por empates)		0,0000

	N	Mediana
b* Tratamiento 2	30	24,000
b* Tratamiento 3	30	11,000
Estadístico de prueba		1365,0
Valor p		0,0000
Valor p (ajustado por empates)		0,0000