



El color en los alimentos un criterio de calidad medible

Color in food as a measurable quality criterion

Mathias-Rettig, K.^a, Ah-Hen, K.^b*

^a Escuela de Graduados, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Austral de Chile, Campus Isla Teja, Valdivia, Chile.

^b Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Austral de Chile, Julio Sarrazín s/n, Campus Isla Teja, Valdivia, Chile.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 25.09.14

Accepted 28.11.14

Keywords:

Color system
Measurement of color
CIE and Hunter Lab
Digital vision
Image processing
Image analysis

Review Articles,

Food and Technology Science

*Corresponding author:

Kong Ah-Hen

E-mail address:

kshun@uach.cl

ABSTRACT

The importance of color as a physical and quality parameter of foods demands for objective measurements to obtain comparable and reproducible data. Color is influenced by many factors, such as illumination, reference observer, light spectra, presence of pigments or the own characteristics of surface, size, texture and brightness of the sample under analysis. Today due to increased expectations imposed on foods with respect to quality and safety norms, there is an urge to determine quality precisely, rapidly and objectively. Computerized vision provides a variant of automatized, non-destructive and economically viable measuring technique that can achieved this demand. Therefore, in this work, the physical, psychological and physiological characteristics that can explain the nature of color and enable its quantitative and objective measurement have been presented. Descriptions related to the science of color have been included besides the technical applications currently used in the food industry.

RESUMEN

La importancia del color como una característica de valoración física y de calidad en los alimentos hace necesario disponer de métodos objetivos de medición que permitan la obtención de valores comparables y reproducibles. El color es afectado por muchos factores, tales como la iluminación, el observador, el espectro, la presencia de pigmentos o las propias características de superficie, tamaño, textura y brillo de la muestra analizada. Actualmente por el aumento de las expectativas impuestas en los alimentos en cuanto a normas de calidad y seguridad, surge la necesidad de determinar la calidad precisa, rápida y objetiva. La visión por sistemas computarizados proporciona una alternativa para una técnica automatizada, no destructiva y rentable para lograr estos requisitos. Por lo tanto, en este trabajo se presentan las características físicas, psicológicas y fisiológicas que explican la naturaleza del color y que hacen posible la medición cuantitativa y objetiva del mismo. Se incluyen descripciones relacionadas con la ciencia del color y la aplicación de técnicas vigentes de medición del color en la industria de alimentos.

Palabras clave: Sistema del color, medición del color, CIE y Hunter Lab, visión digital, procesamiento de imágenes, análisis de imágenes.

1. INTRODUCCIÓN

Los consumidores manifiestan una fuerte preferencia por aquellos productos de apariencia atractiva y el color es el primer atributo que se juzga de los productos. Esto es decisivo ya que en innumerables pruebas se ha comprobado que cuando el color de un alimento cambia sin alterar su forma, aroma u otros atributos de textura, se obtienen una respuesta de rechazo por parte de los consumidores, o incluso de los catadores entrenados

(Badui, 2006). Los alimentos, tanto en su forma natural como procesada, presentan un color característico y bien definido mediante el cual el consumidor los identifica. El color a menudo se utiliza para determinar el contenido de pigmentos de un producto, que a su vez es un índice de calidad, como lo es en el caso del salmón o del vino (González y Vicente, 2007). También puede proporcionar cierta información sobre la cualidad de comestible de un alimento, sobre su identidad o sobre la intensidad del sabor. Por ello, en muchos casos se ha comprobado el

papel decisivo que tiene el color sobre la experiencia de la persona en saborear un alimento (Badui, 2006).

El color es una cualidad organoléptica de los alimentos y se aprecia por medio del sentido físico de la vista. También suele ser considerado un factor psicológico de apreciación y un criterio para elegir un producto alimenticio; incluso en los productos de origen vegetal se relaciona con la posibilidad de elegir la maduración y su idoneidad. Sin embargo, no siempre resulta válida la correlación entre color y calidad, por el uso o tal vez el abuso de aditivos, colorantes, que pueden enmascarar esta apreciación (Bello, 2008). De acuerdo a Figura y Teixeira (2007) el color no es solamente un fenómeno psíquico o psicológico, sino es el resultado de la evaluación de la energía radiante (una magnitud física) en términos de una correlación visual (psicológica) y está basada en las propiedades del ojo humano (fisiológicas). Según Bello (2008) el color es la propiedad que se aprecia por el sentido de la vista, cuando le estimula la luz reflejada por el alimento que contiene sustancias con grupos cromóforos, capaces de absorber parte de las radiaciones luminosas dentro de una determinada longitud de onda.

En este artículo se aborda el color como una variable cuantificable en la determinación de la calidad en los alimentos en forma rápida, precisa y objetiva. Hoy en día existen diferentes herramientas para medir el color de forma objetiva y, son cada vez más precisas y de fácil interpretación. El uso de estas herramientas en la industria alimentaria va en crecimiento, sobre todo ahora con las nuevas tecnologías de la visión digital, la cual es una técnica no invasiva para el alimento y, permite inspeccionar el 100% de la producción, asegurándose al mismo tiempo la inocuidad y la calidad en la producción de los alimentos. Además se puede correlacionar la imagen también con otras propiedades físicas de los alimentos, tales como la textura, el tamaño, el área o la distribución de ingredientes.

2. LA TEORÍA TRICROMÁTICA Y LA PERCEPCIÓN DEL COLOR

Thomas Young propuso que el ojo detecta diferentes colores porque contiene tres tipos de receptores, cada uno de ellos sensible a una única tonalidad del color (Badui, 2006). Esta teoría fue denominada la teoría tricromática y fue sugerida por el hecho de que para los observadores humanos cualquier color puede ser reproducido mezclando tres colores, en cantidades variables, acertadamente seleccionadas de distintos puntos del espectro (Badui, 2006). El ojo humano es sensible a un rango limitado de longitudes de onda (λ), llamado espectro de luz visible, el cual constituye sólo una pequeña parte del espectro electromagnético. Se extiende aproximadamente entre 380 y 780 nm. De ahí viene que el color sea *"la parte de la energía radiante*

que el humano percibe mediante las sensaciones visuales que se generan por la estimulación de la retina del ojo" (Badui, 2006).

Los objetos absorben y reflejan la luz de forma distinta dependiendo de sus características físicas, tal como la forma o la composición. El color que se percibe de un objeto es el rayo de luz que rechaza. Se capta esos "rebotes" con diferentes longitudes de onda, gracias a la estructura de los ojos. Si los rayos de luz atraviesan al objeto, éste es invisible. Las células sensoriales o fotorreceptores de la retina que reaccionan en respuesta a la luz son de dos tipos: conos y bastones. Los bastones se activan en la oscuridad y sólo permiten distinguir el negro, el blanco y los distintos matices del gris, por lo tanto, permite la percepción del contraste. Los conos, en cambio, funcionan de día y en ambientes iluminados y hacen posible la visión de los colores. Existen tres tipos de conos; uno especialmente sensible a la luz roja (R) con longitud de onda variando desde 700 a 770 nm, otro a la luz verde (G) desde 495 a 570 nm y un tercero a la luz azul (B) desde 400 a 475 nm, lo que forma la base del sistema de medición RGB. Tanto los conos como los bastones se conectan con los centros cerebrales de la visión por medio del nervio óptico. La combinación de estos tres colores básicos (rojo, verde y azul) permite diferenciar numerosos tonos. El ojo humano puede distinguir aproximadamente 200 tonalidades diferentes, 20-25 grados de saturación y alrededor de 500 grados de luminosidad (Figura y Teixeira, 2007). Así por ejemplo el naranja es rojo con un poco de amarillo y el violeta azul con un poco de rojo. Es en el cerebro donde se lleva a cabo esta interpretación. No obstante, hay personas que no distinguen bien los colores debido al fallo de los genes encargados de producir los pigmentos de los conos. Así, dependiendo del pigmento defectuoso, la persona confundirá unos colores de otros. Por ejemplo si el pigmento defectuoso es el del rojo, el individuo no distinguirá el rojo ni sus combinaciones.

De esta forma y volviendo sobre la teoría tricromática, ésta se basa en suponer la existencia de un sistema trirreceptor en el órgano de la visión, es decir, que sin importar la composición espectral de la radiación que llega a la retina, la respuesta será evaluada según tres parámetros. Luego, cuando un observador ve un determinado color, puede discriminar: (1) la claridad, la cual es un atributo del color que hace corresponder a cada uno de ellos una equivalencia con una escala de grises, (2) el tono, atributo que adjudica al color una cualidad que se define como rojo (R), verde (G) y azul (B), o cualquier combinación de ellos y (3) la saturación, atributo que fijado al tono, describe el color por su similitud con un color espectral puro; cuanto más parecido a éste, resulta más saturado. El resultado implica una integración de los tres parámetros y el observador no hace distinción del tipo de radiación que produce la sensación de color (González y Vicente, 2007), sólo lo aprecia.

3. EL COLORANTE EN LOS ALIMENTOS

Los colores de los alimentos se deben a distintos compuestos, principalmente orgánicos, algunos que se producen durante el manejo y procesamiento y otros que son pigmentos naturales o colorantes sintéticos añadidos (Badui, 2006). Según Bello (2008), las causas que definen la coloración de un alimento son las siguientes: (1) la presencia de pigmentos o colorantes naturales, que son sustancias que tienen una función biológica muy importante en el tejido, tal como en el caso de la clorofila y la fotosíntesis, y de la mioglobina y el almacenamiento muscular del oxígeno, entre otros. En este sentido cabe indicar que algunos de estos pigmentos se extraen de su estado natural y se emplean como colorantes en la elaboración de un gran número de alimentos, (2) la formación de pigmentos colorantes como consecuencia de reacciones químicas o enzimáticas. Un ejemplo muy conocido es el cambio de color durante la cocción o en general un tratamiento térmico de los alimentos. Estos desarrollan tonalidades que van desde un ligero amarillo hasta un café intenso, mediante las reacciones de Maillard y de caramelización, (p. ej. el color de la corteza del pan), (3) la adición intencionada de sustancias químicas colorantes para dar el color a las bebidas refrescantes y (4) el efecto físico de los sistemas fisicoquímicos presentes en el alimento y relacionado con la dispersión de la luz. El color blanco de la leche es causado por los glóbulos de grasa y las micelas de caseína y el fosfato de calcio coloidal, aunque también influye la presencia de carotenos y riboflavina. Cuando más pequeños sean los glóbulos de grasa, principales responsables de la dispersión de la luz, mayor será el efecto de la dispersión y mayor la blancura de la leche.

Sustancias naturales en los ingredientes responsables del color.

Un cuerpo presenta generalmente el color de la radiación luminosa que refleja y esto es una función relacionada con las presencias de las moléculas de ciertos grupos funcionales orgánicos que integran sus estructuras químicas, por cada ingrediente de la formulación (Bello, 2008). Para que una estructura química presente la propiedad de ser colorante, necesita responder a tres requisitos esenciales: (1) la presencia de grupos cromóforos. Estos se encuentran en los sistemas conjugados "pi" o complejos metálicos. En la primera forma, los niveles de energía que alcanzan los electrones son de los orbitales "pi" generados a partir de series de enlaces simples y dobles alternados, como sucede en los sistemas aromáticos. Entre los ejemplos más comunes se encuentran los licopenos, los beta-carotenos y las antocianinas. Los cromóforos de complejos metálicos surgen de la división de orbitales "d" al vincular metales de transición con ligantes. Algunos ejemplos de estos cromóforos

se encuentran en la clorofila, usada para la fotosíntesis en los vegetales, la hemoglobina y la hemocianina. Una característica bioquímica común es el cromóforo formado por cuatro anillos de pirrol y, puede ser de dos tipos: (1) pirrol en cadena abierta, no metálica (fitocromo, ficobilina o bilirrubina) y (2) pirrol en anillo (porfirina), con un ion metálico en el medio (hemoglobina o clorofila). La combinación de los grupos cromóforos con estructuras cíclicas pueden ser del radical bencilo (C₆H₅-). Existen los grupos auxocromos que incluyen en su estructura grupos ácidos (carboxilos) o básicos (aminos), capaces de estar ionizados según el pH del medio y ofrecer de este modo una coloración determinada.

Si se atiende sólo la presencia natural de pigmentos colorantes, se pueden establecer cinco grupos, que representan a estructuras básicas: (1) Estructuras químicas derivadas de núcleos tetrapirrólicos: la hemoglobina de la sangre, la mioglobina del tejido muscular y la clorofila de los tejidos vegetales verdes, (2) Estructuras químicas derivadas del isopreno: carotenos, xantofilas y bixina (crustáceos, pescados, verduras, etc), (3) Estructuras químicas derivadas del benzopirano: antocianinas y flavonoides que se encuentran en las raíces de algunas plantas, en flores y bayas, (4) Estructuras químicas betalainas: los dos pigmentos de la betarraga, las betacianinas de color rojo y la betaxantinas de color amarillo y, (5) Estructuras químicas poliméricas: las melanoidinas y el colorante caramelo.

4. FACTORES EN LA CAPTURA DEL COLOR EN UN ALIMENTO

El iluminante

El color es una propiedad de la materia que se relaciona directamente con el espectro de la luz. Por lo tanto, se puede medir físicamente en términos de la energía radiante o la intensidad, y por la longitud de onda (Badui, 2006). Un color puede ser descrito subjetivamente por la experiencia del observador u objetivamente, de acuerdo a la longitud de onda. El espectro visible es una radiación electromagnética con longitudes de onda entre 380 nm 780 nm. Las longitudes de onda más largas pertenecen a la radiación infrarroja (IR) y las longitudes de onda más cortas pertenecen a la radiación ultravioleta (UV). En el espectro visible, la luz roja tiene una longitud de onda (λ) entre 700 y 770 nm; el color amarillo entre 570 y 590 nm y el color azul entre 400 y 475 nm. Todas ellas están comprendidas en la llamada luz blanca, tal como fue demostrado por Newton al hacer pasar la luz blanca a través de un prisma para descomponerla en los colores del arcoíris (Figura y Texeira, 2007).

Sin embargo, al mirar un objeto, el color que se percibe en ese momento puede variar dependiendo de la intensidad y el tipo de luz. Los colores parecen diferentes al observarlos en el anochecer o a la luz del sol y, son

también distintos si se observa bajo la luz natural o la luz artificial. Todas ellas contienen los diferentes colores del espectro, pero en distinta proporción. La fluorescente tiene más azul y la incandescente más rojo y amarillo. Por lo tanto, al momento de describir el iluminante es conveniente hacerlo en términos de su longitud de onda. Esto puede hacerse midiendo la energía relativa emitida por la fuente de luz a todas las longitudes de onda del espectro visible y graficando los resultados (González y Vicente, 2007). De modo que para “medir” el color de un objeto (igual para el color de los alimentos) se precisa conocer con exactitud la composición espectral de la luz incidente. Esto se soluciona disponiendo de iluminantes normalizados. Un iluminante es una fuente de luz definida por una potencia espectral relativa, la cual puede estar físicamente disponible como una fuente estándar de iluminación. La CIE (*Commission Internationale de l'Éclairage*) definió las series de iluminantes A, B, C y más recientemente las D y F (Cuadro 1). Estos iluminantes responden a la necesidad de simular instrumentalmente y de manera normalizada las condiciones naturales bajo las cuales se observa el color (González y Vicente, 2007). Cada iluminante tiene un comportamiento diferencial en cuanto a la emisión de energía a lo largo del espectro de luz visible. Los iluminantes de la serie D (D50, D55, D65, D75) son los más representativos de la distribución espectral de la luz blanca y son los más utilizados en la actualidad, aunque el iluminante C sigue siendo un estándar de comparación.

El espectro del color

El color también es provocado al incidir una radiación electromagnética sobre el alimento. La absorción de fotones provoca el paso de electrones a niveles

Cuadro 1. Iluminantes estándares establecidos por la CIE.
Table 1. Standard illuminant as established by the CIE.

Iluminante	Simula a	Temperatura K
A	Lámpara de filamento incandescente	2854
B	Luz del medio día	4870
C	Luz diurna promedio	6750
D ₆₅	Luz natural de día (iluminante C+UV)	6500
F ₂	Lámpara fluorescente blanca	4200
F ₇	Lámpara fluorescente luz de día	6500

Fuente: González y Vicente, (2007).

energéticos superiores y resulta en una diferencia neta de energía que determina la longitud de onda de la radiación absorbida. Si ésta se encuentra en el intervalo del espectro visible, la radiación que sale del alimento (trasmitida si es transparente o reflejada si es opaco) tiene una distribución distinta a la incidente, o lo que es lo mismo, un color diferente al del iluminante utilizado (Perea *et al.*, 2002). De esta manera, se caracteriza el color del alimento por su espectro de reflexión. La luz que es absorbida por el objeto y la luz que percibe el observador como color del mismo son complementarias; mezcladas dan lugar a la luz blanca. También, un objeto blanco refleja la totalidad de las ondas, mientras que un objeto negro las absorbe todas (Perea *et al.*, 2002).

Al incidir la luz sobre un cuerpo (sólido, líquido o gaseoso) se producen diferentes fenómenos ópticos (difracción, dispersión, transmisión, reflexión, absorción), los cuales son dificultosos de separar, pero resultan en mayor o menor grado selectivos según la naturaleza del medio y la posición del observador. De ellos, la absorción de la luz es la que más influye en el color (Perea *et al.*, 2002). Según la forma de interacción óptica con la luz, los cuerpos se clasifican en: (1) transparentes (absorbe y refleja toda la luz - transmisión especular), (2) translúcidos (absorbe la luz, pero no la refleja - transmisión difusa), (3) opacos-mate (reflexión difusa) y (4) opacos brillantes (reflexión especular). De esta manera, la luz puede reflejarse, absorberse o transmitirse y la importancia relativa de cada uno de estos fenómenos determina la apariencia del alimento, donde el factor más importante es la reflexión de la luz especular y difusa. La reflexión especular ocurre desde el ángulo de la normal con respecto a la luz incidente sobre la superficie lisa del alimento, lo cual provoca el brillo de este, mientras que la reflexión difusa ocurre en cualquier dirección sobre la superficie rugosa y ésta es la que permite al observador ver el tono (Tipler y Mosca, 2005).

La composición química y la estructura del material también afectan la reflectancia. Ciertas moléculas orgánicas contienen grupos cromóforos, los cuales son agrupaciones de átomos que pueden transformar la calidad espectral de la luz (-N=N-, >C=C<, >C=O, etc.). Pigmentos naturales como la clorofila, mioglobina y hemoglobina son claros ejemplos de este tipo de moléculas (Bello, 2008).

El Observador

La percepción del color comienza por el observador. Cuando el ojo humano mira un objeto expuesto a la luz incidente, la intensidad energética de la luz que percibe no es la reflejada por el objeto, sino la que resulta de multiplicar, para cada longitud de onda, la energía del espectro de reflexión del objeto por el valor de la visibilidad relativa a la misma longitud de onda. Luego, la intensidad luminosa de un objeto, tal como la percibe el ojo humano, se llama claridad. En la práctica el problema es aún más comple-

jo, pues el ojo percibe al mismo tiempo la luz incidente y la reflejada (Albertí, 2000). Debido a que aún en muchas industrias se realiza un elevado número de evaluaciones visuales, resulta conveniente normalizar la medida visual del color. En 1931 la CIE estableció el observador estándar, cuya visión del color es representativa del promedio de la población humana con una visión normal del color. Posteriormente, en 1964 se estableció el observador estándar suplementario (Billmeyer y Saltzman, 1981). Al primero se lo denomina observador estándar 2°, u observador patrón de colorimetría para un campo foveal y al suplementario, observador 10° u observador para un campo visual amplio (Figura 1). La utilidad de estos observadores reside en evaluar la luminancia de una determinada luz desde el punto de vista perceptivo no fotométrico (Lozano, 1978). El observador 10° es el más ampliamente utilizado ya que presenta una mejor concordancia con el promedio de la estimación visual (Fairchild, 1993).

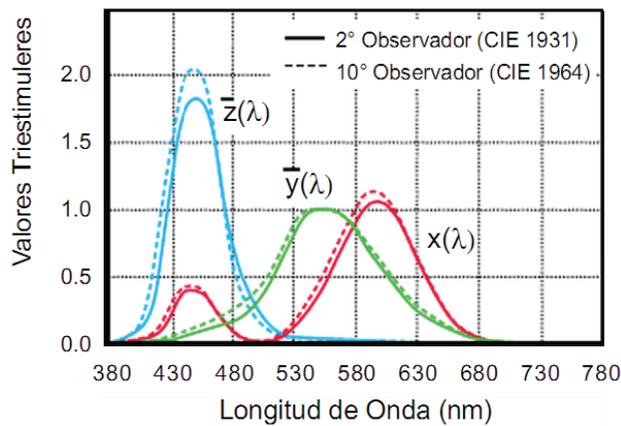


Figura 1. Valores triestímulo del observador patrón: x rojo, y verde & z azul.

Figure 1. Tristimulus values of reference observer: x red, y green & z blue.

El Entorno

El entorno de las mediciones del color es también un factor determinante. La forma, el tamaño y el color del fondo sobre el que se halla la muestra, pueden ejercer un importante efecto de contraste, modificando la sensación que produce un determinado color sobre el observador (Calvo y Durán, 1997).

5. MEDICIÓN DEL COLOR

La comprensión de la imagen y descripción de un objeto, puede ser utilizada para la evaluación de calidad e inspección de los alimentos. Las mediciones de color pueden ser realizadas de formas visuales (con el ojo humano) o instrumentales con un colorímetro, o utilizando la visión digital (Wu y Sun, 2013). Para fines técnicos se define el color en tres atributos: matiz, croma y brillo (Cuadro 2), términos acuñados en la ciencia del color por Munsell (1905).

Escalas de medición de color

Estas escalas se utilizan en instrumentos de medición del color, en el marco de una serie de condiciones normales de iluminantes, observadores y la metodología de espectros.

Sistema Munsell

Este sistema desarrollado por Albert H. Munsell, cuya primera publicación data de 1905, pone de relieve su afán por establecer una base científica a la especificación de los colores. Munsell era profesor de pintura y su deseo de expresar científicamente los parámetros de los elementos con los que trabajaba lo llevó a formular que: “Si la música está provista de un sistema en el que cada sonido se define en términos de tono, intensidad y duración, el color también puede ser especi-

Cuadro 2. Atributos del color.

Table 2. Color attributes.

Atributo	Descripción	Ejemplo
Matiz	Tono, tinte, color, “hue”. Es caracterizado por la longitud de onda de la radiación y hace diferente un color de otro. Representa un espacio en el diagrama de cromaticidad.	Rojo-amarillo o verde-amarillo
Cromaticidad	Saturación, intensidad, pureza, “chroma”. Define la intensidad o pureza espectral del color que va desde los tonos grises, pálidos, apagados a los más fuertes y vivos. Es el grado de color (incoloro, brillo, palidez).	Brillante rojo- amarillo o pálido-rojo amarillo
Luminosidad	Brillante, brillo, “brightness”. Es dado por el contenido total de energía. Da lugar a los colores claros y oscuros. Es el grado entre la oscuridad y el brillo máximo.	Rojo brillante-amarillo o rojo oscuro-amarillo

cado, mediante un sistema apropiado, en base al tono, luminosidad y croma de las sensaciones". Este sistema establece tres dimensiones del color, midiendo cada una de ellas con una escala apropiada (Lozano, 1978). Este espacio de color es mucho menos físico y más fisiológico y psicológico que los descritos por la CIE (Gilabert, 1992). Las ventajas que Munsell impuso a su sistema fueron: (1) se reemplazan definiciones vagas y abstractas del color por una notación definida, (2) cada nombre de un color autodefine su grado de tono, croma y luminosidad, (3) cada color se puede registrar y comunicar mediante un código, (4) se puede escribir la especificación de un color y verificarla mediante pruebas físicas, (5) los colores nuevos no perturban la clasificación ordenada pues les está reservado un lugar y (6) la decoloración se puede definir y representar gráficamente a ciertos intervalos, poniendo de manifiesto su progreso en términos de tono, croma y luminosidad (Lozano, 1978).

Otra ventaja de este sistema es la disposición de los colores según un orden de percepción visual (Francis y Clydesdale, 1975). El valor o luminosidad es la magnitud que corresponde a la escala de grises que se encuentra comprendida entre 1 y 10 de negro a blanco (Lozano, 1978; Gilabert, 1992). Para simplificarlo, Munsell dividió su círculo en 100 unidades, de 0 a 100 comenzando con los tonos rojo púrpura a rojo (RP-R), pasando por el 5, rojo (R); el 25, amarillo (Y); el 45, verde (G); el 65, azul (B); el 85, púrpura (P) y los intermedios: el 15, amarillo-rojo (YR); el 35, verde-amarillo (GY); el 55, azul-verde (BG); el 75, púrpura-azul (PB) y el 95, rojo púrpura (RP), aunque sólo son cinco los tonos principales - rojo, amarillo, verde, azul y púrpura (Lozano, 1978; Hunt, 1991). Estableció además una relación (Ec. 1) entre la luminosidad y el valor de cada color:

$$V^2 = 100L_r = 100 \frac{L_x}{L_{MgO}} \quad \text{Ec. (1)}$$

- V valor del color,
- L_r luminosidad del color bajo observación,
- L_x valor medio del color, relativo a la luminosidad del óxido de magnesio
- L_{MgO} luminosidad del óxido de magnesio (MgO).

Diferentes trabajos realizados por la compañía Munsell han permitido utilizar un atlas de colores denominado Diccionario Munsell confiable y reproducible. Es posible, además, mediante una transformación adecuada, conocer la equivalencia de estos colores en otros sistemas (Calvo y Durán, 1997).

Sistema Hunter

Tomando como base la teoría de los colores opuestos de Hering, que dice que la respuesta de los co-

nos rojos, verdes y azules se re-mezclan en sus codificadores opuestos a medida que se desplazan a lo largo del nervio óptico hasta el cerebro, Hunter desarrolló en 1948 el sistema L, a, b (Calvo y Durán, 1997). Este nuevo sólido de color denominado Hunter Lab tiene una superficie uniforme de color definida por tres coordenadas rectangulares: L (luminosidad) donde 0 es el negro y 100 es el blanco, a (rojo-verde); los valores positivos para rojo, negativos para verde y 0 el neutro y b (eje amarillo-azul) valores positivos para amarillo, negativos para azul y 0 el neutro (Figura 2). La economía y rapidez de respuesta, que supuso la aparición en el mercado de los colorímetros triestímulo (colorímetros Hunter Lab) frente a los espectrofotómetros convencionales, ayudaron a la gran difusión del sistema L, a, b . Contribuyó también lo intuitivo de la representación gráfica, la cual se basa en la teoría de los colores opuestos. Tanto la escala de color L, a, b de Hunter como la CIE L^*, a^*, b^* emanan del sistema CIE XYZ. Sin embargo, la CIE recomienda hoy en día el uso de CIE L^*, a^*, b^* .

Sistemas CIE

La CIE ha desarrollado los sistemas más importantes y más utilizados en la actualidad para la descripción y medición del color; los cuales se basan en la utilización de fuentes de iluminación y observadores estándares (Giese, 1995). Los sistemas CIE usan tres coordenadas para ubicar un color en un espacio de color. Estos espacios de color incluyen (1) CIE XYZ, (2) CIE $L^*a^*b^*$ y (3) CIE $L^*C^*h^\circ$.

Los valores de color $X Y Z$, CIE triestímulo se obtienen multiplicando los valores para el iluminante, la reflectancia o trasmisión del objeto y las funciones del observador patrón. El producto entonces se suma para

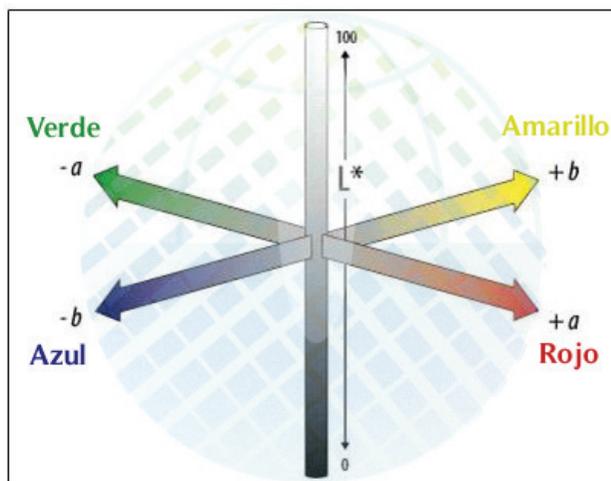


Figura 2. Coordenadas de color en el sistema Hunter Lab.
 Figura 2. Coordinates of Hunter Lab color system.

la longitud de onda en el espectro visible y esto resulta en los valores triestímulos XYZ . Existen varios métodos para calcular los coeficientes tricromáticos del color de una muestra, sometida a un iluminante determinado, a partir de la luz que refleja. Uno de ellos consiste en la utilización de un colorímetro provisto de tres filtros determinados, con los cuales se realizan tres medidas sucesivas de la luz reflejada calculándose luego a partir de éstas X, Y, Z (Caivano, 1995).

La diferencia de color entre dos muestras es la distancia existente en el espacio euclídeo (X, Y, Z) entre los puntos que representan el color de ambas muestras, obtenidos por aplicación del teorema de Pitágoras (Ec. 2):

$$\Delta E = \sqrt{\{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2\}} \quad \text{Ec (2)}$$

Donde Δ representa una diferencia y E es la letra inicial de *Empfindung* del alemán, lo cual significa sensación (Francis y Clydesdale, 1975). Por lo tanto, define la cuantificación de un cambio en el color.

Se deduce entonces que dos muestras que presenten los mismos valores triestímulos aparecerán con un mismo color para determinadas condiciones de iluminación y observación. Por el contrario, si cualquier valor triestímulo es diferente, tales muestras no estarán igualadas y la diferencia total será una media aproximada de la diferencia de color percibida entre ellas (Lozano, 1978). Este sistema de valores triestímulo CIE presenta algunos inconvenientes, tales como: (1) Es relativamente complejo. Normalmente se lo utiliza simplificado, relacionando el color del objeto con un solo coeficiente: luminosidad, pureza o longitud de onda dominante (Francis y Clydesdale, 1975). Se entiende por esta última a la longitud de onda del espectro que mezclada con una correspondiente cantidad de "blanco" da lugar al color deseado (Schmidhofer, 1994), (2) No permite reconstruir el espectro de reflexión del objeto a partir de los valores triestímulo, (3) En virtud de su estructura, si dos muestras presentan diferencias de color (diferentes valores triestímulo) no permite cuantificar dicha diferencia y (4) no es uniforme, es decir, que cuando se presentan sobre el diagrama algunos emplazamientos de colores que el ojo no puede diferenciar entre sí, se comprueba que éstos ocupan superficies más o menos grandes.

Luego, para intentar solucionar estos y otros problemas, los valores X, Y, Z , se transforman matemáticamente hasta obtener un espacio de color más uniforme. En 1976 la CIE recomendó el espacio de color CIE Lab, adoptado también como norma UNE (Francis y Clydesdale, 1975). La principal ventaja de esta aplicación estriba en la similitud con la uniformidad visual humana, donde las distancias equitativas en el sistema representan aproximadamente las distancias equitativas

visuales (Warris, 1995). El sólido de color de este sistema se obtiene por transformaciones no lineales del sistema CIE XYZ-1931. Se define entonces un espacio con las coordenadas rectangulares (L^*, a^*, b^*) junto con otro en las coordenadas cilíndricas (L^*, H^*, C^*) , resultando un sistema tridimensional esférico. Las coordenadas L^*, a^*, b^* son magnitudes adimensionales, cuya equivalencia con el sistema CIE XYZ se calcula con las siguientes ecuaciones (Ec. 3, 4 y 5):

$$L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{1/3} - 16 \quad \text{Ec. (3)}$$

$$a^* = 500 \left[\left(\frac{X}{X_0} \right)^{1/3} - \left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{1/3} \right] \quad \text{Ec. (4)}$$

$$b^* = 200 \left[\left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{1/3} - \left(\frac{Z}{Z_0} \right)^{1/3} \right] \quad \text{Ec. (5)}$$

Donde X, Y, Z son los valores triestímulo de la muestra y X_0, Y_0, Z_0 los del punto acromático correspondiente al iluminante empleado. La diferencia de color (ΔE) viene determinada por la siguiente ecuación (Calvo y Durán, 1997):

$$\Delta E^* = \{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2\}^{0,5} \quad \text{Ec (6)}$$

La coordenada L^* recibe el nombre de luminosidad o claridad y, puede tomar valores entre 0 y 100. Las coordenadas colorimétricas a^* y b^* forman un plano perpendicular a la coordenada L^* .

La a^* define la desviación del punto acromático correspondiente a la luminosidad hacia el rojo si a^* es positiva, y hacia el verde si a^* es negativa. Análogamente la coordenada b^* define la desviación hacia el amarillo si b^* es positiva, y hacia el azul si b^* es negativa (Gilbert, 1992). El conjunto $a^* b^*$ recibe el nombre de cromaticidad y junto con L^* definen el color del estímulo (en coordenadas cartesianas o rectangulares); esto corresponde al término de cromaticidad que no indica explícitamente ni el tono ni la saturación. Este inconveniente se soluciona definiendo C^* (croma) y H^* (tono) (Francis y Clydesdale, 1975).

$$C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{0,5} \quad \text{Ec. (7)}$$

$$H^* = \arctg \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \quad \text{Ec. (8)}$$

El croma C^* toma el valor 0 para estímulos acromáticos y normalmente no pasa de 150, aunque puede superar valores de 1000 para estímulos monocromáticos.

El tono, H^* , varía entre 0 y 360° y para los estímulos acromáticos ($a^* = b^* = 0$) es una magnitud indefinida. Ambos términos (C^* , H^*) también definen la cromaticidad del color de un estímulo y, junto con la L^* , determinan las coordenadas cilíndricas del espacio CIE Lab, siendo muy parecidas a las coordenadas del sistema Munsell.

La especificación numérica del color psicofísico en este sistema viene dada por las tres magnitudes: L^* (luminosidad), C^* (croma) y H^* (tono), en este orden. Se debe tener además en cuenta que si bien la caracterización del color se logra mediante las coordenadas de L^* , a^* y b^* , el objetivo principal de la colorimetría es la determinación objetiva de las diferencias de color (Schmidhofer, 1994).

Si bien el espacio de color CIE Lab tiene la misma configuración que el sistema Munsell, presenta frente a éste las siguientes ventajas: (1) El cálculo de las coordenadas es mucho más simple y (2) Las unidades de las escalas en las magnitudes CIE Lab son casi iguales. Comparado con el sistema Hunter Lab, los espacios de color de ambos resultan similares puesto que miden la luminosidad, el grado de rojo-verde y el de amarillo-azul (Giese, 1995), aunque con magnitudes diferentes. La escala CIE Lab se expande en el área correspondiente al amarillo y se contrae en el área de los azules. Las diferencias de color en ambos sistemas se calculan de igual forma.

6. TÉCNICAS DE MEDICIÓN DEL COLOR

Visión digital (técnicas variacionales)

La visión digital es una nueva tecnología con la generación de imágenes por medio de cámaras digitales o escáneres seguido del procesamiento y análisis de dichas imágenes en computadoras, usando software especial, de modo que el sistema integrado interpreta la información de manera equivalente a lo que hace el ojo y el cerebro humano (Aguilera, 2011). La visión digital ha tenido una gran aplicación en la industria alimentaria en los sistemas de aseguramiento de calidad por su carácter no invasivo y la posibilidad de automatización de los procesos en línea. Entre los casos específicos se cuentan la determinación de color y localización de manchas en la sangre (hematomas) en filetes de salmón, la detección de huesos en trozos de pollo y filetes de pescado en combinación con imágenes obtenidas con rayos X y, la determinación de color para productos de horneado (Figura y Teixeira, 2007). Existen también muchas investigaciones que han puesto de manifiesto su potencial para la inspección y clasificación de frutas y verduras. La visión por computador, ha sido adoptada con éxito por el análisis de la calidad de la carne, pescado, pizza, queso y pan. Del mismo modo la calidad y características del grano han sido examinadas por esta nueva técnica (Brosnan y Sun, 2004).

Colorímetros.

Basados en la visión del ojo humano, los colorímetros son dispositivos triestimulares (tres filtros) para cada longitud de onda: filtros rojo, verde y azul. De esta forma se emula la respuesta del ojo humano al color y la luz. En algunas aplicaciones de control de calidad, estas herramientas representan la respuesta de menor costo. Existe una serie de equipos, tales como los colorímetros Hunter Lab, Gardner, Color Eye, Color Master, Momcolor, Dr. Lange y Minolta (Figura y Teixeira, 2007).

Espectrofotómetros

Es una forma de espectrómetro que contiene un dispositivo fotoeléctrico para cuantificar la potencia de radiación, capaz de seleccionar y medir la intensidad de las radiaciones de diferentes longitudes de onda contenidas en un espectro, dentro del rango para el cual ha sido diseñado. Generalmente permiten registrar gráficas o espectros; existen diseños para el ultravioleta y el visible, y para las regiones del infrarrojo cercano, el infrarrojo fundamental o medio y el infrarrojo lejano.

Cartas de color

El Sistema Munsell, uno de los primeros sistemas de medición de color es el creado por A. H. Munsell en 1905, el cual utilizó un gran número de tarjetas de colores clasificadas de acuerdo a su tono, luminosidad y saturación; posteriormente el sistema Munsell evolucionó un poco más al asignarle una codificación de letras y números.

Imágenes hiper-espectrales

En los últimos años, las imágenes hiper-espectrales han ganado un amplio reconocimiento por determinar la calidad y análisis de seguridad en forma no destructiva y rápida. Es un método de evaluación para una amplia gama de alimentos con éxito en diferentes aplicaciones. Consiste en recopilar y procesar información a lo largo de todo el espectro electromagnético. La formación de imágenes espectrales divide el espectro en muchas bandas. Esta técnica de dividir las imágenes en bandas puede extenderse más allá de lo visible. De aquí surge la técnica de formación de imágenes hiper-espectrales (Wu y Sun, 2013).

7. MEDICIÓN CUANTITATIVA DE COLOR APLICADA EN ALIMENTOS

La aplicación del color en la industria de los alimentos es amplia en el control de calidad y seguridad alimentaria. Algunos ejemplos de estas aplicaciones en la industria son: (1) la determinación del color de la carne de las aves de corral durante el procesamien-

to, para determinar si es corte claro u oscuro, el cual tiene incidencia directa con la retención de agua (Petracci *et al.*, 2004), (2) el estudio del color en las hojas del cultivo de maíz para caracterizar los niveles de estrés debido a las deficiencias de agua y nitrógeno en hojas (Ahmad y Reid, 1996), (3) el control de calidad en alimento en cuanto a forma, color y distribución de ingredientes, mediante análisis de imágenes por computador (Brosnan y Sun, 2004), (4) la determinación del color y la blancura del azúcar como parámetro de calidad (Figura y Teixeira, 2007), (5) la evaluación del proceso de secado en cuanto al color de los productos deshidratados, tales como manzana, plátano, patata o zanahoria (Krokida *et al.*, 2001), (6) la medición del color por la imagen digital de la superficie de los alimentos (Yam y Papadakis, 2004), (7) la visión digital con imágenes de radar de los alimentos para obtener las propiedades físicas (Abdullah *et al.*, 2004), (8) la detección de defectos en la superficie por análisis de imagen en frutas (Davenel *et al.*, 1998), (9) la distribución y tamaños de las burbujas en la cerveza a través de visión digital (Hepworth *et al.*, 2004), (10) la clasificación de la textura del músculo de la carne bovina a través de imágenes (Basset *et al.*, 1999), (11) el colorímetro de tomate (Hunter y Yeatman, 1961), (12) los atributos visuales de calidad de los camarones por visión digital (Luzuriaga *et al.*, 1997), (13) la cinética de cambios en la textura y el color de espárragos verdes durante los tratamientos térmicos (Lau *et al.*, 2000) y, (14) las mediciones de color con cámaras CCD (*Charge-Coupled Device* – dispositivo de carga acoplado) y las imágenes digitales (Mendoza *et al.*, 2006).

8. CONCLUSIÓN

El color es una característica sensorial que es posible describir con parámetros físicos cuantificables. En la industria de alimentos la medición instrumental del color sirve como herramienta de control de calidad. Existen diferentes formas de cuantificar el color, las cuales han ido evolucionando a métodos cada vez más rápido y no invasivos. Dentro de los métodos con mayor proyección se encuentra la visión digital, aunque todavía queda mucho por investigar. Sin embargo, su eficacia en las industrias ya se ha comprobado. Es reconocida como un método rápido, eficiente, barato y no destructivo, por lo cual se puede usar en la inspección de una línea completa de proceso, además de permitir por la captación de imágenes la implementación de un proceso de automatización para distintos tipos de tareas de inspección de rutina.

REFERENCIAS

- ALBERTÍ, P. 2000. Medición del color. In: Cañeque, V., Sañado, C. (Eds.), Metodología para el estudio de la calidad de la canal y de la carne en rumiantes. Monografías INIA, Ganadera n° 1, Madrid, pp. 159-166.
- ABDULLAH, M. Z., GUAN, L. C., LIM, K. C., KARIM, A. A. 2004. The applications of computer vision system and tomographic radar imaging for assessing physical properties of food. *Journal of Food Engineering* 61(1): 125-135.
- AGUILERA, J. M. 2011. Ingeniería gastronómica. Universidad Católica de Chile, Santiago.
- AHMAD, I. S., REID, J. F. 1996. Evaluation of colour representations for maize images. *Journal of Agricultural Engineering Research* 63(3): 185-195.
- BROSNAN, T., SUN, D. W. 2004. Improving quality inspection of food products by computer vision—a review. *Journal of Food Engineering* 61(1): 3-16.
- BADUI, S. 2006. Química de los Alimentos. 4 ed. Pearson Educación. México.
- BELLO, J. 2008. Ciencia Bromatológica; Principios Generales de Los Alimentos, Ediciones Díaz de Santos S. A., Madrid.
- BASSET, O., DUPONT, F., HERNANDEZ, A., ODET, C., CULIOLI, J. 1999. Texture image analysis: application to the classification of bovine muscles from meat slice images. *Optical Engineering* 38(11): 1950-1959.
- BILLMEYER, F.W., SALTZMAN, M. 1981. Principles of Color Technology. J. Wiley & Sons, New York.
- CAIVANO, J. L. 1995. Sistemas de orden del color (Vol. 12). José Luis Caivano. Facultad de Arquitectura, Diseño y urbanismo, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires.
- CALVO, C., DURÁN, L. 1997. Propiedades físicas II: Ópticas y color. Temas en Tecnología de Alimentos. Editado por J. M. Aguilera. Instituto Politécnico Nacional, México.
- DAVENEL, A., GUIZARD, C. H., LABARRE, T., SEVILA, F. 1988. Automatic detection of surface defects on fruit by using a vision system. *Journal of Agricultural Engineering Research* 41(1): 1-9.
- FRANCIS, F. J., CLYDESDALE, F. M. 1975. Food colorimetry: Theory and Applications. AVI Publishing Co. Inc., Westport, Connecticut.
- FAIRCHILD, M. D. 1993. The CIE 1931 standard colorimetric observer: Mandatory retirement at age 65. *Color Research & Application*, 18(2), 129-134.
- FIGURA, O., TEIXEIRA, A. 2007. Food Physics: Physical Properties, Measurement and Applications. Heidelberg, Springer-Verlag, Berlin, New York.
- GIESE, J. 1995. Measuring physical properties of foods. *Food Technology* 49(2): 53-63.
- GONZÁLEZ, A. M., VICENTE, I. 2007. El color en la industria de

los alimentos. Editorial Universitaria. La Habana.

- GILABERT, E. 1992. Medida del color. Servicio de publicaciones. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- HUNT, R. W. (1991). A brief look back. *Color Research & Application* 16(1): 57-60.
- HUNTER, R. S., YEATMAN, J. N. 1961. Direct-Reading Tomato Colorimeter. *Journal of the Optical Society of America* 51(5): 552-554.
- HEPWORTH, N. J., HAMMOND, J. R. M., VARLEY, J. 2004. Novel application of computer vision to determine bubble size distributions in beer. *Journal of Food Engineering* 61(1): 119-124.
- KROKIDA, M. K., MAROULIS, Z. B., SARAVACOS, G. D. 2001. The effect of the method of drying on the colour of dehydrated products. *International Journal of Food Science and Technology* 36(1): 53-59.
- LAU, M. H., TANG, J., SWANSON, B. G. 2000 Kinetics of textural and color changes in green asparagus during thermal treatments. *Journal of Food Engineering* 45(4): 231-236.
- LOZANO, R. D. 1978. "El color y su medición". Americalee S.R.L, Buenos Aires.
- LUZURIAGA, D. A., BALABAN, M. O., YERALAN, S. 1997. Analysis of visual quality attributes of white shrimp by machine vision. *Journal of Food Science* 62(1): 113-118.
- MENDOZA, F., DEJMEK, P., AGUILERA, J. M. 2006. Calibrated color measurements of agricultural foods using image analysis. *Postharvest Biology and Technology* 41(3):285-295.
- MUNSELL, A. H. 1905. A color notation – A measured color system based on the three qualities: Hue, value and chroma. Geo H. Ellis Co., Boston.
- PETRACCI, M., BETTI, M., BIANCHI, M., CAVANI, C. 2004. Color variation and characterization of broiler breast meat during processing in Italy. *Poultry Science* 83(12): 2086-2092.
- PEREA, P. C., ARTIGAS, J. M., RAMO, J. P. 2002. Tecnología del color. Universitat de València. 428 páginas (Vol. 55). [http://books.google.cl/books?hl=es&lr=&id=6Gb0Y5yRXD8C&oi=fnd&pg=PA7&dq=PEREA,+P.+C.,+ARTIGAS,+J.+M.,+y+RAMO,+J.+P.+\(2002\).+Fundamentos+de+colorimetr%C3%ADa.+Universitat+de+Val%C3%A8ncia.+ \(Vol.+55\)&ots=i0FydN0u_P&sig=9JGo01j78c00KdwdsQ0vq_LA8_w&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false](http://books.google.cl/books?hl=es&lr=&id=6Gb0Y5yRXD8C&oi=fnd&pg=PA7&dq=PEREA,+P.+C.,+ARTIGAS,+J.+M.,+y+RAMO,+J.+P.+(2002).+Fundamentos+de+colorimetr%C3%ADa.+Universitat+de+Val%C3%A8ncia.+ (Vol.+55)&ots=i0FydN0u_P&sig=9JGo01j78c00KdwdsQ0vq_LA8_w&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
- TIPLER, P. A., MOSCA, G. 2005. Física para la ciencia y la tecnología: Electricidad y magnetismo, luz, física moderna. (Vol. 2). Editorial Reverté, Barcelona.
- SCHMIDHOFER, T. 1994. Métodos analíticos. Tecnología e higiene de la carne, Parte E. Acribia, Zaragoza.
- YAM, K. L., PAPADAKIS, S. E. 2004. A simple digital imaging method for measuring and analyzing color of food surfaces. *Journal of Food Engineering* 61(1): 137-142.
- WARRIS, P. D., BROWN, S. N. 1995. The relationship between reflectance (EEL value) and colour (L*) in pork loins. *Animal Science* 61(1): 145-148.
- WU, D., SUN, D. W. 2013. Colour measurements by computer vision for food quality control—A Review. *Trends in Food Science & Technology* 29(1): 5-20