

Estudio de la Variación de Parámetros de Color del Yacón utilizando un Prototipo de Medición de Color y Temperatura

Alba Mery Garzón-García, Saúl Dussán-Sarria, Raúl Emilio Melo-Sevilla

Facultad de Ingeniería, Dpto. Ingeniería y Administración, Univ. Nacional de Colombia. Sede Palmira. A.A. 237. Palmira, Valle del Cauca-Colombia. (e-mail: almgarzonga@unal.edu.co; sdussan@unal.edu.co; remelos@unal.edu.co)

Recibido Feb. 15, 2018; Aceptado Abr. 17, 2018; Versión final Jun. 22, 2018, Publicado Dic. 2018

Resumen

El objetivo de este trabajo fue proponer un prototipo de medición de color y temperatura construido con los sensores DHT11 de temperatura y TCS230-3200 de color conectados a un Arduino Nano, con una conexión serial se transfirió la información a un ordenador con los programas PXL-DAQ y Microsoft Excel® 2013, siendo las mediciones de color registradas en el modelo de color RGB para su conversión al sistema CIE L*a*b*. Un equipo de medición simultánea de color y temperatura a nivel piloto, como el que se propone, se convierte en una alternativa económica frente a los costosos equipos comerciales. Con el prototipo se analizó la pérdida de luminosidad y la variación temperatura del yacón (*Smallanthus sonchifolius*), y los cambios de índice de pardeamiento y diferencia de color. Estos mostraron un comportamiento similar al encontrado en la literatura.

Palabras clave: Smallanthus sonchifolius; prototipo de medición; luminosidad; índice de pardeamiento; diferencia de color.

Evaluation of Yacon Luminosity with Color and Temperature Measurement Prototype

Abstract

The objective of this work was to propose a color and temperature measurement prototype constructed with the temperature sensor DHT11 and the color sensor TCS230-3200 connected to an Arduino Nano, with a serial connection information was transferred to a computer with PXL-DAQ and Microsoft Excel® 2013 programs, the color measurements were recorded in RGB color model for a conversion to CIE L*a*b* system. A simultaneous color and temperature measurement equipment at pilot level, as the one proposed in this paper, becomes an economical alternative to costly commercial equipment. With the prototype the luminosity loss and changes of temperature of yacon (*Smallanthus sonchifolius*) were quantified, and the changes of browning indexes and color difference. These parameters presented a behavior similar to that found in the literature.

Keywords: Smallanthus sonchifolius; measurement prototype, luminosity, browning index, color difference.

INTRODUCCIÓN

El color se define como la percepción humana de la luz reflejada por un objeto. Es un fenómeno que se genera cuando el cerebro procesa la luz captada a través de los ojos, y se ve afectado por variables como el objeto, el observador, el iluminante, la geometría óptica, el área, el fondo, la superficie, el brillo y la temperatura (Delmoro *et al.*, 2010). La importancia del color en los alimentos radica en que es el primer atributo que valoran los consumidores en la elección de un producto. Asimismo, se relaciona con la determinación de la calidad e idoneidad de forma rápida, precisa y objetiva (Mathias-Rettig y Ah-Hen, 2014). La evaluación del color se realiza con sistemas visuales, en los cuales se analizan comparaciones con referencias de color bajo iluminación controlada o con colores estándar, implicando una inspección especializada y el entrenamiento de los observadores. También se mide con instrumentos como el colorímetro, el espectrofotómetro, el espectrocolorímetro y la visión computarizada (Pathare *et al.*, 2013) como tecnología para adquirir y analizar una imagen con herramientas computacionales y electrónicas para obtener información o controlar procesos (Mery y Pedreschi, 2005). Por otro lado, la medición de temperatura en los alimentos es fundamental durante las operaciones agroindustriales. Para determinar este parámetro se utilizan los dispositivos de temperatura de fuerza (FTDs) divididos en bimetálicos y sistemas térmicos rellenos, y los dispositivos de temperatura eléctrica, como lo son los detectores de temperatura de resistencia (RTD), termopares, resistencias de silicio y semiconductores (Richardson, 2001).

A nivel de planta piloto o laboratorio es importante disponer de instrumentos y equipos que permitan medir diferentes atributos en los alimentos y que no demanden grandes costos. He ahí el porqué del desarrollo y diseño de prototipos a escala piloto que permitan automatizar y controlar procesos (Narendra y Hareesha, 2010). En este caso, de productos sensibles como la raíz reservante del yacón (*Smallanthus sonchifolius*), un vegetal que durante su pelado y procesamiento sufre de una rápida reacción enzimática al contacto de la pulpa con el oxígeno, debido a la actividad de la polifenoloxidasas y a su contenido de compuestos fenólicos (Rodrigues *et al.*, 2014). Con la evaluación del color del yacón a diferentes temperaturas y empleando modelos cinéticos, es posible describir la degradación térmica del color a partir de la pérdida de luminosidad (Zhu *et al.*, 2016). Los modelos cinéticos de degradación de componentes alimenticios son esenciales para el diseño de nuevos procesos y dan como resultado productos de alta calidad. Los parámetros cinéticos, entre ellos la constante de velocidad de reacción y la energía de activación, contribuyen en la predicción de la calidad final del producto y a minimizar los cambios no deseados en productos procesados (Urrea *et al.*, 2012).

El objetivo de este trabajo fue utilizar un prototipo de medición de color y temperatura construido con sensores, tarjetas electrónicas de bajo costo y un sistema de adquisición de datos, para determinar la cinética de variación de la luminosidad, cambios de los valores del índice del pardeamiento y las diferencias de color en las raíces del yacón a las temperaturas de 10 °C, 20 °C y 30 °C.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se detalla el funcionamiento del equipo empleado para la medición de color y temperatura, la adecuación del material vegetal, la evaluación de la cinética de variación de color del yacón por efecto de las variables ya mencionadas, así como el cálculo de los parámetros de color BI y ΔE . De igual forma, se describe cómo se llevó a cabo el análisis estadístico y se corroboró el ajuste del modelo cinético.

Funcionamiento del prototipo de medición de color y temperatura

Se observó inicialmente que los equipos que miden más de dos atributos son difíciles de conseguir, adaptar o no existen para ciertos procesos agroindustriales. En cuanto a la ciencia del color en los alimentos, se tiene que normalmente la medición de este parámetro se lleva a cabo con un colorímetro, el cual posee la desventaja de evaluar superficies menores a los 2 cm², obteniendo medidas poco representativas y un complejo análisis global del alimento (León *et al.*, 2006). Para mitigar el inconveniente anteriormente mencionado, investigadores crearon sistemas de visión computarizada incluyendo ordenadores, cámaras digitales y videocámaras (Saldaña *et al.*, 2014), algoritmos lineales, cuadráticos y neurales, softwares especializados para segmentar las imágenes como Photoshop, Matlab e Image J (Saldaña *et al.*, 2013). Sin embargo, en la literatura no se encontraban reportes específicos en relación al uso de sensores de fácil adquisición para evaluar el color de los alimentos. Siendo así, se pensó en un prototipo con elementos de bajo costo, que se pudieran programar en un lenguaje sencillo (C++) e integrar con softwares libres encontrados en Internet.

El prototipo de medición de color y temperatura en alimentos fue elaborado y ensayado en el Laboratorio de Frutas y Hortalizas de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira. El equipo constó de una caja con dimensiones 20 cm x 20 cm x 20 cm y paredes de color negro. Se adaptaron el sensor de temperatura DHT11 en la base y el sensor de color TCS230-3200 sobre el material biológico a evaluar, y fueron conectados a un

Arduino Nano, el cual tenía el rol de tarjeta de adquisición de datos (DAQ). Con una conexión serial, se estableció la transferencia de los datos para ser procesados en un ordenador con la ayuda del programa PXL-DAQ. Los valores obtenidos por medio del sistema de adquisición de datos, se llevaron a un archivo en Microsoft Excel® 2013 para realizar la conversión del modelo de color RGB al sistema CIE L*a*b*.

Conversión del sistema RGB a CIE L*a*b*

El sensor TCS230-3200 detecta las medidas de color en el sistema RGB y estas son convertidas al sistema CIE L*a*b*. Según Saldaña *et al.* (2014), el primer paso de esta conversión, es transformar los valores RGB (R=rojo, G=verde, B=azul) en valores rgb como se nota en las Ecuaciones 1, 2 y 3, obteniendo la primera variación.

$$\text{VarR} = R/255 \quad (1)$$

$$\text{VarG} = G/255 \quad (2)$$

$$\text{VarB} = B/255 \quad (3)$$

En seguida fueron consideradas las condiciones a) y b) y aplicadas las ecuaciones 4 a la 9.

a) Si $\text{VarR}; \text{VarG}; \text{VarB} \leq 0,404045$ entonces,

$$r = \text{VarR}/12,92 \quad (4)$$

$$g = \text{VarG}/12,92 \quad (5)$$

$$b = \text{VarB}/12,92 \quad (6)$$

b) Si $\text{VarR}; \text{VarG}; \text{VarB} > 0,404045$ entonces,

$$r = \left(\frac{\text{VarR} + 0,055}{1,055} \right)^{2,4} \quad (7)$$

$$g = \left(\frac{\text{VarG} + 0,055}{1,055} \right)^{2,4} \quad (8)$$

$$b = \left(\frac{\text{VarB} + 0,055}{1,055} \right)^{2,4} \quad (9)$$

Posteriormente fue realizada la conversión de los parámetros rgb al sistema CIE XYZ, usando los coeficientes de la Ecuación 10, para un observador de 2° y un iluminante D65.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = 100 \times \begin{bmatrix} 0,4124 & 0,3576 & 0,1805 \\ 0,2126 & 0,7152 & 0,0722 \\ 0,0193 & 0,1192 & 0,9505 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ g \\ b \end{bmatrix} \quad (10)$$

Luego fue realizada la conversión del sistema CIE XYZ al sistema CIE L*a*b* con una variación de los valores de X, Y y Z; en donde los valores de X_n, Y_n, Z_n para un observador de 2° e iluminante D65 fueron respectivamente 95,03; 100 y 108,88. Para esto se tuvieron las condiciones a) y b) y se aplicaron las ecuaciones 11 a la 16.

a) Si $\frac{X}{X_n}; \frac{Y}{Y_n}; \frac{Z}{Z_n} > 0,008856$ entonces;

$$\text{VarX} = \left(\frac{X}{X_n} \right)^{1/3} \quad (11)$$

$$\text{VarY} = \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} \quad (12)$$

$$\text{VarZ} = \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{1/3} \quad (13)$$

b) Si $\frac{x}{x_n}, \frac{y}{y_n}, \frac{z}{z_n} \leq 0,008856$ entonces;

$$\text{VarX} = \left(7,787 \times \frac{x}{x_n}\right) + \frac{16}{116} \quad (14)$$

$$\text{VarY} = \left(7,787 \times \frac{y}{y_n}\right) + \frac{16}{116} \quad (15)$$

$$\text{VarZ} = \left(7,787 \times \frac{z}{z_n}\right) + \frac{16}{116} \quad (16)$$

Finalmente, se hallaron los valores del sistema CIE L*a*b* con las ecuaciones 17,18 y 19.

$$L^* = (116 \times \text{VarY}) - 16 \quad (17)$$

$$a^* = 500 \times (\text{VarX} - \text{VarY}) \quad (18)$$

$$b^* = 200 \times (\text{VarY} - \text{VarZ}) \quad (19)$$

Evaluación de la cinética de variación de color en yacón

Fue utilizado 1 kg de la raíz yacón (*Smallanthus sonchifolius*) comprada en el mercado local. Se llevó a cabo la selección del material biológico con el fin de eliminar producto con evidentes daños mecánicos y una clasificación peso y tamaño, siendo este en media de 450 g por cada raíz y un diámetro aproximado de 8 cm. Siguiendo la metodología de Saldaña *et al.* (2014), las raíces fueron lavadas con agua potable y detergente neutro para eliminar los rastros de suciedad. Luego, fueron inmersas en una solución a 100 $\mu\text{l l}^{-1}$ de hipoclorito de sodio durante tres minutos antes de ser almacenado durante 18 horas a 4 °C. Posteriormente y en el mismo instante de realizar la medición de las coordenadas de color, al material biológico le fue retirada la cáscara de forma manual y cortado en rodajas de 0,5 cm de diámetro, esta operación debe de realizarse rápidamente debido a que el oscurecimiento del yacón es acelerado.

Calibración del prototipo de medición de color y temperatura

Previamente a la evaluación del yacón, la temperatura se verificó con un termopar y la calibración del color del prototipo se realizó con un convertidor de color, una carta de códigos de color con valores de RGB en línea y las cartas de color PANTONE.

Medición de color y temperatura del yacón

La temperatura en el yacón se controló con el sensor de temperatura del prototipo y se dio inicio a la medición de color cuando la temperatura del producto alcanzó los 10 °C, registrando datos a cada 5 segundos de acuerdo a la programación de la tarjeta de adquisición de datos hasta que la superficie del yacón llegara a los 30 °C. El aumento gradual de la temperatura del fruto se logró por la ganancia de calor del mismo medio ambiente sin contar con ningún tipo de calentamiento ni control de esta variación de temperatura. El programa PLX-DAQ permitió que los datos se transfirieran a Microsoft Excel® 2013 para realizar la conversión del sistema RGB al sistema CIE L*a*b, el estudio de la cinética de variación de la luminosidad y el análisis estadístico.

Índice de pardeamiento (BI)

El índice de pardeamiento enzimático o browning index (BI) fue cuantificado a través del índice bioquímico (Lunadei *et al.*, 2011) y Dussán-Sarria *et al.* (2017) utilizando las ecuaciones 20 y 21.

$$\text{BI} = \frac{(x - 0,31)}{0,17} \times 100 \quad (20)$$

$$x = \frac{(a^* + 1,75L^*)}{(5,645L^* + a^* - 3,012b^*)} \quad (21)$$

Diferencia de color

La diferencia de color (ΔE) fue calculada entre los valores L*a*b* obtenidos con el prototipo y su comparación con los valores estándares en el sistema CIE L*a*b*. Si ΔL^* es positivo, la muestra es más luminosa que la

estándar. Si Δa^* es negativo, sería más verde o menos rojo. Si Δb^* es positivo, la muestra es más amarilla o menos azul que la estándar. El valor de ΔE fue determinado con las ecuaciones 22, 23, 24 y 25, en donde el subíndice 1 es para la muestra estándar y el 2 es para las rodajas de yacón evaluadas (Jha, 2010).

$$\Delta L^* = L_2^* - L_1^* \quad (22)$$

$$\Delta a^* = a_2^* - a_1^* \quad (23)$$

$$\Delta b^* = b_2^* - b_1^* \quad (24)$$

$$\Delta E = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2} \quad (25)$$

Cálculo de la cinética de variación de luminosidad

Para las temperaturas de análisis 10 °C, 20 °C y 30 °C fueron calculadas las constantes de variación y energía de activación con la luminosidad (L^*). Según Ordoñez-Santos *et al.* (2014), para determinar el cambio de color de los alimentos como función del tratamiento térmico, muchas ecuaciones han sido publicadas en la literatura, donde la variación del factor C en el tiempo puede ser representado de acuerdo a la ecuación 26.

$$\frac{dC}{dt} = -kC^n \quad (26)$$

En donde k se refiere a la constante cinética (s^{-1}), C es la medida de color a un tiempo t y n el número de orden de reacción. Para la mayoría de los alimentos, la dependencia con el tiempo está descrita por cinética de orden cero o de primer orden, y se puede cuantificar según la ecuación de Arrhenius (ecuación 27).

$$k = e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (27)$$

En donde E_a es la energía de activación (J), R la constante de los gases ideales (8,31434 J/mol K) y T es la temperatura absoluta (K).

Factor Q_{10}

Según Carrillo *et al.* (2016), el parámetro adimensional Q_{10} se define como la razón entre la constante de velocidad de reacción de pardeamiento a una temperatura (T) y la constante de velocidad de reacción de pardeamiento a una temperatura T+10°C. Se representa con la ecuación 28, siendo k_T la constante de velocidad de reacción a la temperatura T y k_{T+10} la constante de velocidad de reacción a la temperatura T + 10 °C.

$$Q_{10} = \frac{k_{T+10}}{k_T} \quad (28)$$

Análisis estadístico

La evaluación de color del yacón fue realizada por triplicado a las temperaturas de análisis 10 °C, 20 °C y 30 °C. Asimismo, se llevó a cabo un ANOVA de un factor y con test de rango múltiple Duncan (IBM SPSS Statistics Subscription Beta Preview) para los datos de L^* , índice de pardeamiento y diferencia de color. Fue realizada una regresión lineal para hallar las velocidades de reacción y la energía de activación a partir de la variación de la luminosidad, y se estableció el ajuste del modelo cinético calculando el coeficiente de determinación, error medio absoluto (MAE) y error cuadrático medio (MSE).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentan los resultados y discusión en las subsecciones mencionadas seguidamente: cinética de variación de luminosidad en yacón, índice de pardeamiento y diferencia de color.

Luminosidad e Índice de pardeamiento del yacón

En la Tabla 1 se observan los valores medios de la coordenada L^* o luminosidad de las rodajas de yacón siendo estadísticamente diferentes a $p < 0,05$ en las tres temperaturas de 10 °C, 20 °C y 30 °C con valores de L^* de $79,4 \pm 1,44$, $74,54 \pm 1,10$ y $67,67 \pm 0,69$ respectivamente. La disminución de los valores de luminosidad a medida que se eleva la temperatura del yacón indica un efecto notorio causado por el incremento