

## MODELOS MATEMÁTICOS DE DIFERENCIA DE COLOR CIELAB Y EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMAGENES EN LA INDUSTRIA DE ALIMENTOS: YUCA (*Manihot esculenta crantz*)

---

*Vertel Morinson Melba Liliana*

Universidad de Sucre  
Grupo de Investigación Estadística y  
Modelamiento Matemático  
Campus Puerta Roja

*Fabián Ortega Quintana*

Universidad de Córdoba

All content in this magazine is licensed under a Creative Commons Attribution License. Attribution-Non-Commercial-Non-Derivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0).



**Resumen:** La industria de alimentos puede aprovechar programas especializados caso procesos de evaluación sensorial con o sin instrumentos, en entornos donde se demandan métodos innovadores de procesamiento de imágenes digitales. Se busca incentivar la apropiación social del conocimiento, integrando el arte, la ciencia y la tecnología ayudados por áreas STEM +A y el análisis de datos. Chips de yuca se deshidrataron por microondas (70W, 280W, 490W y 700W). Se aplicó un diseño completamente al azar con arreglo factorial para evaluar el efecto del color ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ). Se muestra una ventana abierta que puede utilizarse satisfactoriamente para analizar la calidad de los alimentos a través del color. Se evidencia el impacto de nuevas aplicaciones de gestión de imágenes digitales y tecnologías de hardware en entornos informáticos (R, Matlab).

**Palabras clave:** Visión artificial, CIELAB, industria alimentaria.

## INTRODUCCIÓN

El color no es propiedad de un objeto, es una propiedad de la luz. El color lo construimos nosotros, sin cerebro no hay color. El color, primer parámetro en la percepción de la calidad de un alimento y su vida útil, es considerado un atributo visual de la superficie del alimento y crítico para su aceptación, incluso antes de que entre en la boca.

El CIEL<sup>\*</sup>a<sup>\*</sup>b<sup>\*</sup> (modelo cromático, describe todos los colores percibidos por ojo humano), es uno de los espacios de color más populares y uniforme usado para evaluar propiedades físico-químicas y sensoriales de los alimentos [1-2]. El color y aspecto del alimento es asociado con el aroma, seguridad, tiempo de almacenamiento, nutrición y nivel de satisfacción [3-4].

La determinación del color (por ejemplo: oscurecimiento) en materias primas (frutas

y vegetales) se realiza por método visual, instrumental y visión computacional (CV) y comienza solamente si ha ocurrido una deshidratación en el alimento (reacciones de pardeamiento enzimático y no enzimático), y depende de la rata de secado y del coeficiente de transferencia de calor durante las diferentes etapas de cocción (secado y almacenamiento). Se espera que las variables de proceso tales como tiempo y potencia, afecten al color de los productos [5]. Los cambios del color en los alimentos son el resultado de la reacción de Maillard, que depende del contenido de los azúcares reductores (principalmente D-glucosa), tiempo de cocción y de otros factores. El objetivo de este trabajo fue: evaluar parámetros de color de la escala CIELAB de un alimento sometido a estrés o procesamiento por medio de la técnica de visión computacional (CV), con la herramienta *Matlab*.

## PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMAGENES

### MODELO CIELAB

Este modelo queda definido por tres variables que se representan en sistemas cartesianos (XYZ) o polares, técnicamente  $x(l)$ ,  $y(l)$  y  $z(l)$ , en el modelo representan la claridad de color ( $L^*$ ,  $L^*=0$  indica negro y  $L^*=100$  indica blanca), la posición entre magenta y verde ( $a^*$ , valores negativos indican verde mientras valores positivos indican magenta) y la posición entre amarillo y azul ( $b^*$ , valores negativos indican azul y valores positivos indican amarillo) [6]; otros parámetros derivados de  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  son Saturación ( $C^*$ ) y tono ( $h^*$ ). Cuando la luz del estímulo-color  $C(\lambda)$  alcanza la retina, ésta interactúa con los sensores rojo, verde y azul, para dar tres respuestas que llegan al cerebro [2].

## VISIÓN COMPUTACIONAL (CV)

La visión artificial, en un intento de reproducir la luz que el ser humano captura a través de los ojos, y esta información que circula por el nervio óptico hasta el cerebro donde es procesada. Existen razones para creer que el primer paso de este procesado consiste en encontrar elementos más simples para descomponer la imagen, se define tradicionalmente cuatro etapas principales: Etapa 1. Sensorial, captura imágenes digitales mediante algún tipo de sensor; Etapa 2. Tratamiento digital de imágenes, facilita etapas posteriores. Hace un procesamiento previo, mediante transformaciones geométricas y filtros, elimina partes indeseables o se realza partes interesantes de una imagen; Etapa 3. Segmentación, busca aislar elementos que interesan de la escena para comprenderla; Etapa 4. Reconocimiento o clasificación, distinguir objetos segmentados, debido al análisis de ciertas características preestablecidas para diferenciarlas.

Una visión artificial busca extraer información del mundo físico a partir de imágenes, utilizando para ello un computador (CV). Una cámara digital o de video conectada a un computador para adquirir la imagen componen un sistema CV, con estándares de iluminación (A (2856 K), C (6774 K), D65 (6500 K) y D (7500 K) en industria de alimentos); 45° el ángulo entre eje del lente de cámara y fuente de iluminación, garantizando luz uniforme [7], debe contar con software para procesamiento y análisis de imagen. El sistema sensorial visual interpreta amplitudes y longitudes de onda de la luz, produciendo sensaciones que conocemos como brillo y color respectivamente. Así, una onda electromagnética que viaja por el vacío con longitud de onda de 680 nanómetros se interpreta como la sensación del color rojo.

## MATERIA PRIMA Y PROCESADO DEL ALIMENTO

La yuca (*Manihot esculenta Crantz*) o mandioca es un producto básico (45% de sólidos secos aproximadamente), recurso energético en la alimentación humana [8], abastece en la dieta a más de mil millones de personas. La **variedad “ICA-costeña”** (Sucre- Colombia) fue escogida teniendo en cuenta características de calidad (tamaño, uniformidad de superficie, grosor uniforme, libre de tierra y daños de tejidos) para reducir variabilidad estadística en el experimento. El tubérculo se lavó y peló manualmente, cortando discos de  $3,5 \pm 0,5$  cm y espesor  $1,5 \pm 0,5$  mm [9], después en plato giratorio se colocaron tres muestras a potencia específica cada 30 segundos (Horno Hacob Arezzo HM 0.7 Microondas), seguido una fotografía en cada repetición/muestra (Cámara incorporada celular S10 Samsung de 12 megapíxeles f/2.4 Zoom OIS, uso de soporte fijo para celular y aro de luz para mantener menor variabilidad en la iluminación); para diferentes tiempos en cada potencia (70W, 280W, 490W, 700W) se realizaron determinaciones de color a 3 lecturas/ tiempo (Figura 1), cada fotografía fue procesada con Matlab instalado (recortar y rotar imagen, eliminar ruido, histograma de imagen, obtener valores de píxeles, formato RGB, detectar regiones de textura en imágenes) y paquete *Apps Image Viewer* para obtener valores de color ( $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ ).

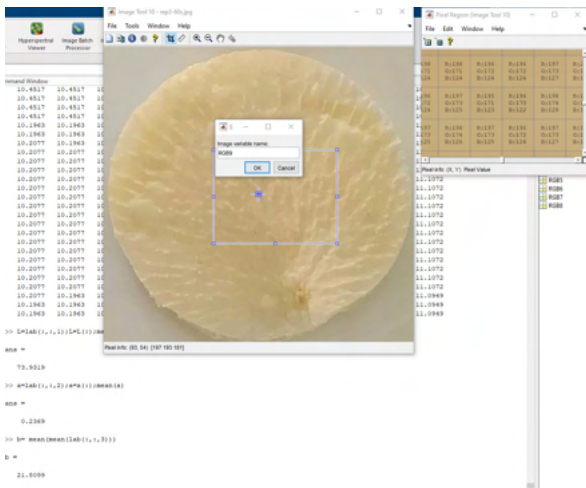


Figura 1. Proceso de evaluación de parámetros de color.

El calentamiento o procesado por microondas, es un método alternativo de procesos convencionales de transferencia de calor en el área de Tecnología alimentaria, la transmisión de energía térmica directamente sobre alimentos [8].

## ANÁLISIS DE DATOS

Las determinaciones  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  para el análisis CV fue generado por un script en Matlab con el paquete *Apps Image Viewer*. Las tablas descriptivas de los resultados fueron realizadas en cada etapa de tiempo y/o potencia de los diferentes parámetros. Se elaboraron gráficas de los parámetros y cambios de color *versus* el tiempo para diferentes valores de potencia de horno microondas. Los resultados fueron analizados con Análisis de Varianza -ANOVA- si cumplían normalidad y homogeneidad de varianzas, donde los tratamientos fueron los tiempos. Si había diferencias significativas en ANOVA se estimaba una superficie de respuesta con una regresión polinomial. El ANOVA, regresión y fueron realizados en el software R. Se investigaron modelos matemáticos para representar cinéticas de cambios de color y se obtuvieron valores de parámetros de los mismos. Para describir

cambios de color dentro del proceso de la materia prima (yuca o mandioca), un modelo cinético de orden 1 [3],  $\Delta E$  valor con respecto al punto de referencia CIELAB,  $\Delta E_e$  valor del color en el equilibrio con respecto al punto de referencia CIELab. A tiempo cero, el color tiene valor  $\Delta E_0$ .

## COLORIMETRÍA DE LA YUCA O MANDIOCA

En la Figura 2, se evidencia cambio de color a medida que transcurre el proceso de horneado, y más pronunciado en potencia de 700 W y tiempo de 180 s. Para este tipo de estudios se requiere el uso de cámaras digitales de grado industrial y sistemas de iluminación para reducir la variabilidad de las condiciones físicas, sobre todo la iluminación y el movimiento de la cámara al utilizar un dispositivo móvil sin soporte fijo.

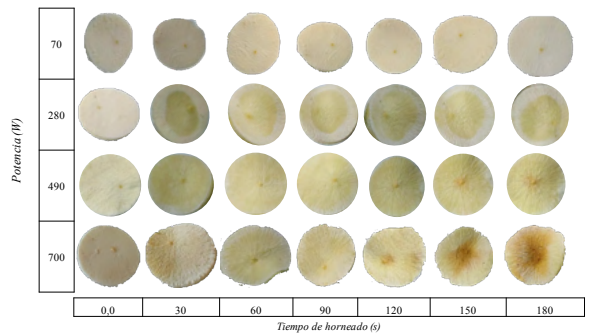


Figura 2. Cambios de color en la muestra de yuca. Tiempo determinado *vs.* potencias.

Para este experimento, la repetitividad de las mediciones fue importante, se tuvieron 84 muestras fotográficas procesadas (3 rep. x 4 potencias x 7 tiempos), cada imagen seleccionada (archivo jpeg) en la *APPS Image Viewer* fue recortada en un rectángulo especificado manualmente con la función *Crop Image* en Matlab. La herramienta *Pixel Region* ayudo para explorar los valores de píxeles, después la imagen es almacenada como una matriz tridimensional de intensidades para los píxeles  $L^*a^*b^*$ , tres redes separadas

para cada cubierta de segmento rojo, verde y azul para enmarcar una imagen RGB de dimensión 256x256x3. La función RGB2Lab, que convierte una imagen del espacio de color RGB al espacio de color CIELAB, se obtuvo el promedio de color sobre una región específica de la imagen.

La Figura 3, muestra el comportamiento descriptivo de  $L^*$  para diferentes potencias y tiempos para los chips de yuca horneados. Entre más alta es la potencia, más oscura (pardeamiento no enzimático) la superficie del alimento.  $L^*$ , decreció cuando se incrementó potencia y/o tiempo, se registraron valores de [60-80], que coinciden con los rangos reportados por Ortega et al. [9] en freído por inmersión de chips de yuca.

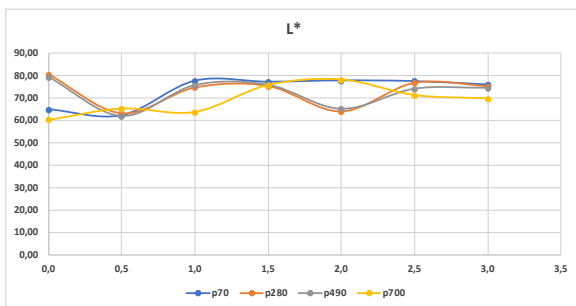


Figura 3. Cambios en la Claridad ( $L^*$ ) durante horneado en microondas de muestras de yuca.

La variabilidad en valores  $L^*$  se atribuye a la forma de captura de parámetros de color, donde pueden incidir factores externos que permita homogenizar la forma de captura. También, la heterogeneidad de la materia prima, en cuanto a su contenido químico en su estructura, es decir, habrá zonas con más humedad y otras con menos contenido de agua. Otro puede ser, la región de muestreo para el cálculo interno de los parámetros de color en la estimación (Figura 1). Los componentes cromáticos del color  $a^*$  y  $b^*$ , los cuales se encuentran entre -120 y 120. Los comportamientos de  $a^*$  y  $b^*$  se muestran en las Figuras 4 y 5, parecido a lo reportado en Ortega et al. [9] en freído por inmersión de

chips de yuca (-5, 0). Los mayores valores se dieron en la potencia más baja (70 W), en la medida que fueron evaluados en el tiempo cada potencia de horneado fue presentando cambios polinomiales, como resultado de la formación de compuestos de la reacción no enzimática de Maillard, aunque los valores de  $b^*$  tienden a incrementar más rápido en tanto la potencia aumenta [10]. Al realizar el análisis de varianza se encontró diferencias significativas para los parámetros  $a^*$  y  $b^*$ . Se ajustaron modelos de regresión con buenos resultados ( $R^2 \geq 80\%$ ).

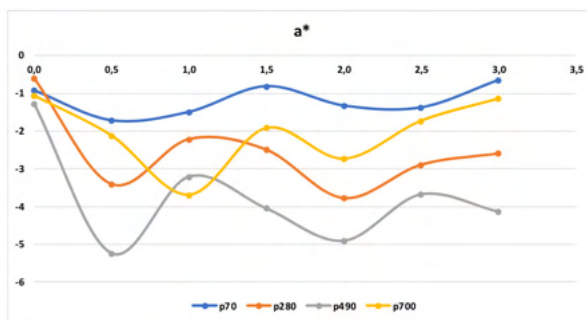


Figura 4. Cambios en cromaticidad roja/verde ( $a^*$ ).

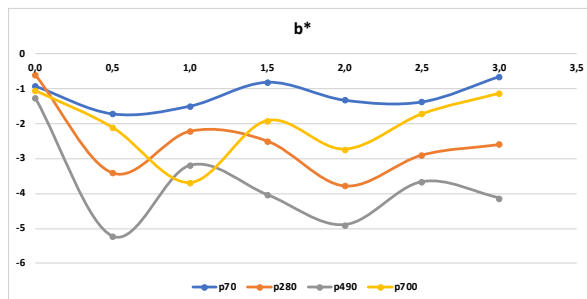


Figura 5. Cambios en cromaticidad amarillo/azul ( $b^*$ ).

## CINÉTICA DEL COLOR

Al estudiar efecto del tiempo x potencias en chip de yuca, con cocción en microondas se mostraron cambios en color medido en: claridad ( $L$ ), cromaticidad roja/verde ( $a^*$ ), amarillo/azul ( $b^*$ ) y  $\Delta E$  como resultado del efecto de los tratamientos. Aunque el método de adquisición de imágenes y equipo utilizado no fueron tan robustos, los resultados estimados son similares a otros experimentos que modelan muestran de yuca.

Al modelar cambios de color, con diferentes freídos de alimentos algunos autores han usado cinética de reacciones de orden cero y primero, donde  $L^*$  disminuye exponencialmente con el tiempo de horneado [10].

Se observa en la Figura 6, que no hay diferencias entre potencias, lo que se comprueba en el análisis de varianza, mientras, si hay diferencias entre tiempos, a mayor tiempo es mayor la constante de velocidad de reacción del color ( $\Delta E$ ).

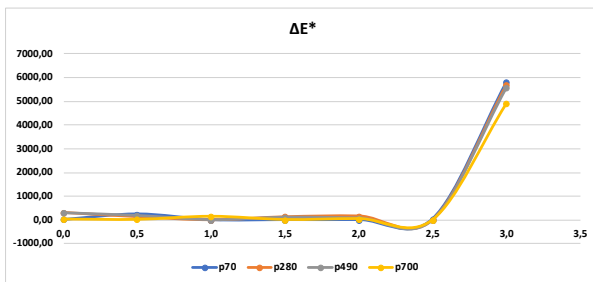


Figura 6. Cambio de color  $\Delta E$ , durante el horneado en microondas en muestras de yuca.

En cada caso se observó una cinética de orden cero para los parámetros evaluados. El trabajo se debe complementar con la estimación de los parámetros del modelo de Arrhenius para las energías de activación. La estimación de los parámetros de color con los datos experimentales, fue analizada inicialmente con ecuaciones cinéticas de orden 0 y 1. La Tabla 1 presenta los resultados obtenidos de orden cero sólo para  $L$ , en el de orden 1 no se reporta las  $E_a$  dieron valores negativos. Se identifica que los modelos cinéticos no pueden ser usados adecuadamente ( $R^2$  menor a 0.70).

c=Co+kt			
Modelos de primer orden de $L^*$			
Potencia	Co	k	R2
70	66.59	4.564	0.53
280	72.92	0.0321	0.00003
490	72.68	-0.0643	0.00001
700	63.435	3.9157	0.42

Tabla 1. Constantes cinéticas  $c_0$  y  $k$  del modelo.

## CONCLUSIONES

- El éxito de la industria de alimentos dependerá de la apropiación de herramientas digitales de innovación abierta tales como el procesamiento de imágenes con visión computacional y del manejo de la analítica de datos que le permita tomar decisiones que redunden en la creación y desarrollo de productos de calidad que respondan a las necesidades de los consumidores en términos de eficiencia y competitividad.
- Con la metodología planteada se analizó la pérdida de luminosidad en los chips de yuca (pardeamiento enzimático o no enzimático). El desarrollo del color en materias primas comienza solamente si ha ocurrido deshidratación en el alimento, y depende del porcentaje de secado y del coeficiente de transferencia de calor durante las diferentes etapas de cocción. La potencia en el horneado de chip de yuca (mandioca) afectó significativamente los cambios de color de la rodaja. La potencia y el tiempo tuvieron un efecto significativo (nivel de significancia de 5%) sobre la textura final de la rodaja horneada.

## REFERENCIAS

1. A Chiralt, N Martínez, Ch González, P Talens, G Moraga. Propiedades físicas de los alimentos. Editorial: Universidad Politécnica de Valencia. 2007.
2. A López. Diseño y Caracterización del Hormigón Autocompactante Coloreado. Tesis doctoral. Universidad Nacional de La Plata. 2012. 189 p.
3. F Pedreschi, J León, P Moyano. Development of a computer vision system to measure the color of potato chips. *Food Research International*, 2006. vol. 39: p1092–1098.
4. T Brosnan, D Sun. Improving quality inspection of food products by computer vision – A review. *Journal of Food Engineering*, 2004. vol. 61: p3–16.
5. Sahin, S. y Sumnu, S. *Advances in deep-fat frying of foods*. Ed. CRC Press Taylor & Francis Group. 2009. New York, USA, p81-113.
6. Gökmen, V. y Sügut, I. A non-contact computer vision-based analysis of color in foods. *International Journal of Food Engineering*, 2007. vol. 3(5): p1-13.
7. K León, F Pedreschi & J León. Color measurement in L\*a\*b\* units from RGB digital images. *Journal Food Research International*, 2006. vol. 39: p1084-1091.
8. A Alzate, F Vallejo, H Ceballos, J Pérez, M Fregene. Variabilidad genética de la yuca cultivada por pequeños agricultores de la región Caribe de Colombia. *Acta Agronómica*, 2010. vol. 59 (4): p385-393.
9. F Ortega, E Montes, O Pérez, G Vélez. Efecto de la deshidratación osmótica y la temperatura sobre el color y la fuerza máxima de fractura de rodajas de yuca en freído por inmersión. *Información Tecnológica*, 30(1), 2019, p. 311-320.
10. R Singh, *Scientific Principles of Shelf Life Evaluation*. In: Man, C.M.D. and A.A. Jones (Eds.), *Shelf Life Evaluation of Foods*. Springer, Boston, MA. 1994.