

OPTIMIZATION OF OVEN DRYING CONDITIONS OF BANANA (*Musa spp.*, AAA GROUP, cv 'Luvhele' AND 'Mabonde') USING RESPONSE SURFACE METHODOLOGY

OPTIMIZACIÓN DE LAS CONDICIONES DE SECADO DE PLÁTANO (*Musa spp.*, GRUPO AAA, cv. *Luvhele* Y *Mabonde*) EN HORNO CON LA METODOLOGÍA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA

Adewale Olusegun-Omolola^{1*}, Afam Israel Obiefuna-Jideani¹, Patrick Francis-Kapila², Victoria Adaora-Jideani³

¹Department of Food Science & Technology, ²Department of Agricultural & Rural Engineering, School of Agriculture, University of Venda, Private Bag X5050, Thohoyandou 0950, South Africa. (omololadewale@gmail.com). ³Department of Food Technology, Cape Peninsula University of Technology, Cape Town, South Africa.

ABSTRACT

Luvhele and *Mabonde* banana varieties are bananas grown in Limpopo province of South Africa and they are rich in nutrients and antioxidants. Optimization of oven drying conditions of *Luvhele* and *Mabonde* banana varieties were studied using response surface methodology. The drying was performed according to a central composite rotatable design to explore two sets of variables: oven temperatures (40, 50 and, 60 °C) and drying time (1260, 1080, and 900 min) for *Luvhele*; (40, 50 and, 60 °C) and (1260, 900, and 600 min) for *Mabonde*. The color and texture (hardness) data were analyzed using ANOVA and regression analysis. Results indicated that L*, a*, b*, hue angle and hardness varied with drying conditions for the two banana varieties. The hue angle ranged between 63.38-74.70 and 60.14-72.80 in dried slices of the banana varieties, *Luvhele* and *Mabonde*. The hardness ranged between 1.15-14.62 N and 1.28-14.29 N. Oven temperature and drying time had significant ($p \leq 0.05$) effects on the overall color (hue) and hardness of both varieties. Models obtained for the prediction of overall color (hue) and hardness of dried slices of both banana varieties as a function of the process variables drying temperature and time had no significant ($p > 0.05$) lack of fit test, adequate and acceptable regression values: adjusted R² between 0.78 and 0.80, coefficient of variance < 10 %. The drying temperature of 47.56 °C for 944.87 min were optimum to obtain a quality product desirability of 0.97 to the *Luvhele* variety. Drying temperature of 40 °C and 646.17 min, with a desirability of 0.83, were predicted as optimum drying conditions to the

RESUMEN

En la provincia de Limpopo, Sudáfrica, se cultivan las variedades de plátano *Luvhele* y *Mabonde* y son ricas en nutrientes y antioxidantes. En este estudio evaluamos la optimización de las condiciones de secado en horno de ambas variedades, con la metodología de superficie de respuesta. La deshidratación se realizó de acuerdo con un diseño giratorio compuesto central para explorar dos conjuntos de variables: temperaturas del horno (40, 50 y 60 °C) y tiempo de secado (1260, 1080 y 900 min) para la variedad *Luvhele* y para *Mabonde* (40, 50 y 60 °C y 1260, 900 y 600 min). Los datos de color y textura (dureza) se analizaron con ANDEVA y análisis de regresión. Los resultados indicaron que L*, a*, b*, ángulo de matiz y dureza variaron con las condiciones de secado en ambas variedades. El ángulo de tono osciló entre 63.38 y 74.70 en las rodajas secas de *Luvhele* y 60.14 y 72.80 en *Mabonde*; la dureza de las rodajas osciló entre 1.15 y 14.62 N y 1.28 y 14.29 N. La temperatura del horno y el tiempo de secado tuvieron efectos significativos ($p \leq 0.05$) en el color general (matiz) y la dureza de ambas variedades. Los modelos obtenidos para la predicción del color general y la dureza de rodajas secas de ambas variedades en función de la temperatura y tiempo de secado no tuvieron ajuste significativo ($p > 0.05$), o valores de regresión adecuados y aceptables: R² ajustado entre 0.78 y 0.80, con coeficiente de varianza < 10 %. El secado a 47.56 °C por 944.87 min fue óptimo para obtener un producto de calidad deseable, de 0.97, de la variedad *Luvhele*. El secado a 40 °C por 646.17 min se predijo como óptimo, con deseabilidad de 0.83, para *Mabonde*. El resultado de este estudio podría usarse como un estándar para deshidratar en horno plátano de las variedades *Luvhele* y *Mabonde*.

*Autor responsable ❖ Author for correspondence.

Recibido: marzo, 2017. Aprobado: febrero, 2018.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 52: 539-551. 2018.

Palabras clave: plátano, *Luvhele*, *Mabonde*, secado en horno, optimización.

Mabonde. The result of this study could be used as a standard for oven drying of *Luvhele* and *Mabonde* banana varieties.

Keywords: Banana, *Luvhele*, *Mabonde*, Oven drying, Optimization.

INTRODUCTION

Drying refers to the removal of moisture from a material with the primary aim of reducing microbial activity, product deterioration (Fellows, 2007; Jangam *et al.*, 2010) and extension of shelf life. Most food commodities contain enough moisture to permit the activity of native enzymes and microorganisms, so drying is necessary to reduce their water activity and prevent microbial spoilage (Sivasanker, 2008; Ahmed *et al.*, 2013). All dried fruits provide essential nutrients and an array of health protective bioactive ingredients, making them valuable to increase diet quality (USDA, 2005). *Luvhele* and *Mabonde* banana varieties are grown in Limpopo province of South Africa. They are rich in nutrients and antioxidants (Anyasi *et al.*, 2015). Studies on these varieties include the effects of organic acid pretreatment on some physical, functional and antioxidant properties of flour obtained from three unripe banana cultivars (Anyasi *et al.*, 2015); modeling microwave drying kinetics and moisture diffusivity of *Mabonde* banana variety (Omolola *et al.*, 2014), and modeling of thin layer drying characteristics of banana cv. *Luvhele* (Omolola *et al.*, 2015).

Perception of people about quality of dried fruit products can be influenced by drying process (Soysal *et al.*, 2006). Color is a main quality characteristic of food products affected by the drying conditions. Effect of cyclical variations of air temperature on drying kinetics and color changes during drying of banana and guava pieces were investigated by Chua *et al.* (2000). The authors reported that with appropriate temperature and time variations, it is possible to reduce significantly the overall color change of the products while maintaining high drying rates.

Texture changes in solid foods during processing by drying are an important cause of quality deterioration. Heating and the loss of water cause stress in the cellular structure of the food, and this stress leads to size and shape changes of food products (Mayor and Sereno, 2004). When moisture is removed within the solid network of a harvested product during drying,

INTRODUCCIÓN

El secado se refiere a la eliminación de la humedad de un material con el objetivo principal de reducir actividad microbiana y deterioro del producto (Fellows, 2007; Jangam *et al.*, 2010) y extender de la vida útil. La mayoría de los productos alimenticios contienen suficiente humedad para permitir la actividad de enzimas y microorganismos nativos, por lo que es necesario secarlos para reducir la actividad del agua y evitar el deterioro microbiano (Sivasanker, 2008; Ahmed *et al.*, 2013). Todas las frutas secas proporcionan nutrientes esenciales y una variedad de ingredientes bioactivos que protegen la salud, por lo que son valiosas para aumentar la calidad de la dieta (USDA, 2005). Las variedades de plátano *Luvhele* y *Mabonde* se cultivan en la provincia de Limpopo en Sudáfrica y son ricas en nutrientes y antioxidantes (Anyasi *et al.*, 2015). Los estudios sobre estas variedades de plátano incluyen los efectos del pretratamiento con ácido orgánico en algunas propiedades físicas, funcionales y antioxidantes de la harina obtenida de tres cultivares inmaduros (Anyasi *et al.*, 2015), modelado de la cinética de secado por microondas y difusividad de la humedad en la variedad *Mabonde* (Omolola *et al.*, 2014) y modelado de las características de secado en capa delgada del cv. *Luvhele* (Omolola *et al.*, 2015).

La percepción de la calidad de los frutos secos por los consumidores puede modificarse por el proceso de secado (Soysal *et al.*, 2006). El color es una característica principal de calidad de los productos alimenticios afectados por las condiciones de secado. El efecto de las variaciones cíclicas de la temperatura del aire en la cinética de secado y los cambios de color durante el secado de trozos de plátano y guayaba lo investigaron Chua *et al.* (2000). Los autores indicaron que con variaciones adecuadas de tiempo y temperatura es posible reducir significativamente el cambio de color general de los productos respecto a las velocidades altas de secado.

Los cambios de textura en alimentos sólidos durante el secado son causa importante del deterioro de la calidad. El calentamiento y la pérdida de agua causan estrés en la estructura celular de los alimentos, que provoca cambios en el tamaño y la forma de los productos alimenticios (Mayor y Sereno, 2004). Cuando se elimina humedad, durante el secado, dentro de la red sólida de un producto cosechado, como los frutos,

a pressure unbalance is produced between the inner and external tissues of the fruit, generating contraction stresses that lead to material shrinkage, changes in shape and sometimes product cracking (Mayor and Sereno, 2004; Fellows, 2007).

The technique of response surface methodology (RSM) is employed to optimization of multi-responses. The standardization of the drying process of the banana varieties is important in order to obtain the optimum drying conditions and an optimum product in terms of color and textural qualities. The aim of this study was to optimize the oven drying conditions of *Luvhele* and *Mabonde* banana varieties using RSM.

MATERIALS AND METHODS

Source and preparation of sample

Bananas of the varieties *Luvhele* and *Mabonde* (*Musa* species) obtained from a farm in Limpopo province of South Africa were used in the study. The ripe fruits had peel color index of 7, which is associated with the maximum sucrose content and completely yellow skin with small brownish speckles (Kulkarni *et al.*, 2011). The bananas fingers were cleaned, washed, peeled and sliced manually into a thickness of 5 mm. The sliced portions were treated with 4 % (w/v) citric acid solution for 10 min.

Drying experiment

The drying experiment was carried out in a forced air laboratory oven (Prolab Instrument - model OTE 80, Vancouver, Canada). Drying was conducted according to the central composite rotatable design with two independent variables (oven drying temperature and drying time). Table 1 shows the independent variables used to generate the experimental runs using Design-Expert software version 8.0.1.0. The use of different temperature-time variations is to allow efficient control of individual color parameter and hardness of the banana slices during drying (Chua *et al.*, 2000).

Color determination

The surface color of dried banana slices was measured using a colorimeter (ColorFlex, Hunter Lab, USA). The colorimeter was calibrated with a standard white ($L^*=93.71$, $a^*=-0.84$ and $b^*=1.83$) and black plate before each color measurement. The colors were expressed as L-value (lightness/darkness), a-value

se produce desequilibrio de presión entre los tejidos internos y externos, se generan tensiones de contracción que provocan la contracción del material, cambios de forma y, a veces, agrietamiento del producto (Mayor y Sereno, 2004; Fellows, 2007).

La metodología de superficie de respuesta (MSR) se usa para optimizar respuestas múltiples. La estandarización del proceso de secado de las variedades de plátano permite determinar las condiciones de secado óptimas para obtener el color y las cualidades de textura óptimas del producto. El objetivo de este estudio fue optimizar las condiciones de secado en horno de las variedades de plátano *Luvhele* y *Mabonde* mediante MSR.

MATERIALES Y MÉTODOS

Origen y preparación de la muestra

En el estudio se utilizaron plátanos de las variedades *Luvhele* y *Mabonde* (*Musa*) obtenidas de una granja en la provincia de Limpopo en Sudáfrica. Los frutos maduros tenían índice de color 7 en la cáscara, que está asociado con el contenido máximo de sacarosa, y cáscara completamente amarilla con pequeños puntos marrón (Kulkarni *et al.*, 2011). Los plátanos se limpiaron, lavaron, descascararon y cortaron manualmente en rodajas, de 5 mm de espesor. Las porciones cortadas se trataron con una solución de ácido cítrico al 4 % (p/v) por 10 min.

Secado experimental

El secado experimental se hizo en un horno de laboratorio con circulación forzada de aire (Prolab Instrument, modelo OTE 80, Vancouver, Canadá). El secado se realizó de acuerdo con el diseño rotativo compuesto central con dos variables independientes (temperatura del horno de secado y tiempo de secado). El Cuadro 1 incluye las variables independientes usadas para generar las ejecuciones experimentales con el software Design-Expert versión 8.0.1.0. El uso de variaciones temperatura-tiempo permite el control eficiente de los parámetros de color individuales y la dureza de las rodajas de plátano durante el secado (Chua *et al.*, 2000).

Determinación del color

El color de la superficie de rodajas secas se midió con un colorímetro (ColorFlex, Hunter Lab, EUA). El colorímetro se calibró con un blanco estándar ($L^*=93.71$, $a^*=-0.84$ y $b^*=1.83$) y una placa negra antes de cada medición. Los colores se expresaron como valor L (claridad/oscuridad), a (enrojecimiento/verdor) y b

Table 1. Levels of independent variables used for the central composite rotatable experimental design.
Cuadro 1. Niveles de variables independientes usados para el diseño experimental central rotatorio compuesto.

Banana	Code	Temperature (°C)	Drying time (min)
<i>Luwhele</i>	-1	40	900
	0	50	1080
	1	60	1260
<i>Mabonde</i>	-1	40	600
	0	50	900
	1	60	1200

(redness/greenness) and b-value (yellowness/blueness). The overall color of dried banana slices was presented using hue angle (Thuwapanichayanan *et al.*, 2011), which was calculated from:

$$\text{Hue} = \tan^{-1} (b/a) \quad (1)$$

Texture (hardness) determination

Textural attributes of dried banana slices (5 mm) were measured using a texture analyzer TA.XT PLUS, Stable Micro Systems fitted with a 5-N load cell equipped with a 35 mm flat ended cylindrical aluminum. The flat ended cylindrical aluminum moved down vertically and compressed the sample slice placed on the base. The maximum compression force in the force–deformation curve of each sample was considered as an indication of the hardness of the sample (Kotwaliwale *et al.*, 2007; Kumar *et al.*, 2014).

Statistical analysis

Collected data were processed using Design-Expert Version 8.0.1.0 (Statease Inc; Minneapolis, USA). The software was used for ANOVA, mathematical modeling, regression analysis, and optimization. The response surface plots were generated for different interactions. The numerical optimization of the drying process was aimed at finding the levels of oven temperature and drying time, which could maximize the overall color (hue) and minimize hardness.

RESULTS AND DISCUSSION

Color characteristics of banana slices dried with oven drying process

The color characteristics of dried banana slices in terms L^* , a^* , b^* and hue angle (which represent

(amarillez/azulado). El color general de las rodajas deshidratadas de plátano se presentó con el ángulo de matiz (Thuwapanichayanan *et al.*, 2011), que se calculó con la siguiente ecuación:

$$\text{Hue} = \tan^{-1} (b/a) \quad (1)$$

Determinación de la textura (dureza)

Los atributos de textura de las rodajas deshidratadas (5 mm) se midieron con un analizador de textura TA.XT PLUS, Stable Micro Systems, equipado con una celda de carga 5-N, con un cilíndrico de aluminio de 35 mm, con punta plana. El cilindro de aluminio con punta plana se movió hacia abajo, verticalmente y comprimió la rodaja colocada en la base. La fuerza de compresión máxima en la curva fuerza-deformación de cada muestra se consideró como indicación de la dureza de la muestra (Kotwaliwale *et al.*, 2007; Kumar *et al.*, 2014).

Análisis estadístico

Los datos recopilados se procesaron con el programa Design-Expert, versión 8.0.1.0 (Statease Inc., Minneapolis, EUA). El software se usó para determinar ANDEVA, modelado matemático, análisis de regresión y optimización. Los diagramas de superficie de respuesta se generaron para diferentes interacciones. La optimización numérica del proceso de secado tuvo como objetivo encontrar los niveles de temperatura del horno y el tiempo de secado, lo que podría maximizar el color general (matiz) y minimizar la dureza.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Color de las rodajas de plátano secadas en horno

Los valores L^* , a^* , b^* y ángulo de matiz (que representan el color general) de las rodajas deshidratadas

the overall color of dried slices of banana) are in Table 2 for *Luvhele* variety and Table 3 for *Mabonde* variety. The L*, a*, b*, and hue angle varied with drying conditions for the two banana varieties. This variability can be attributed to the degradation of color inducing compound due to heat and oxidation during drying (Thuwanpaniyanan *et al.*, 2011).

Hue angle is said to be a chromatic aberration model containing whole color parameter. It defines the color change direction. Larger values of hue angle signify more shift from red hue to yellow hue (Soysal *et al.*, 2006; Thuwapanichayanan *et al.*, 2011). Banana slices of the *Luvhele* variety dried at 40 °C for 1260 min and 50 °C for 1080 min had the highest L* and hue angle values, respectively (Table 2), while the highest L* and hue angle values for banana dried slices of the *Mabonde* variety were obtained at 50 °C for 900 min and 50 °C for 475.74 min (Table 3). Consequently, slices of banana *Luvhele* variety dried at 64.14 °C for 1080 min and 50 °C for 1334.56 min had the lowest L

de la variedad *Luvhele* y *Mabonde* están en el Cuadro 2 y el 3. Los valores de L*, a*, b* y ángulo de matiz cambiaron con las condiciones de secado en las dos variedades de plátano, lo cual se atribuye a la degradación por calor del compuesto que confiere el color y a la oxidación durante el secado (Thuwanpaniyanan *et al.*, 2011).

El ángulo de matiz es un modelo de aberración cromática y contiene el parámetro de color completo que define la dirección de cambio en el color. Los valores de ángulo de matiz mayores significan cambio mayor del tono rojo al amarillo (Soysal *et al.*, 2006; Thuwapanichayanan *et al.*, 2011). Las rodajas de plátano de la variedad *Luvhele* deshidratadas a 40 °C por 1260 min y 50 °C por 1080 min tuvieron los valores mayores de L* y ángulo de matiz, respectivamente (Cuadro 2). Los valores mayores de L* y de ángulo de matiz los presentaron las rodajas secas de la variedad *Mabonde* a 50 °C por 900 min y a 50 °C por 475.74 min (Cuadro 3). En consecuencia, las rodajas de plátano de la variedad *Luvhele* secadas a 64.14 °C por 1080 min y a 50 °C por 1334.56 min tuvieron los valores menores

Table 2. Experimental values of quality parameters of color and texture for *Luvhele* banana variety under different oven drying conditions.

Cuadro 2. Valores experimentales de parámetros de calidad de color y textura en plátano de la variedad *Luvhele*, deshidratado en horno.

Treatment	Independent variables		Response variables				
	Temperature (°C)	Time (min)	L*	a*	b*	Hue (°H)	Hardness (N)
1	60.00	900.00	49.44	11.73	35.62	71.77	9.81
2	50.00	1334.56	44.52	14.56	30.52	64.66	12.46
3	40.00	900.00	46.91	10.93	35.96	73.09	3.39
4	50.00	825.44	47.29	9.67	35.05	74.57	1.67
5	64.14	1080.00	36.75	11.93	26.19	65.49	6.36
6	35.86	1080.00	43.83	12.26	32.82	69.51	4.66
7	60.00	1260.00	45.08	10.59	33.77	72.58	6.44
8	40.00	1260.00	52.84	10.76	38.22	74.27	4.29
9	50.00	1080.00	46.53	9.20	33.65	74.70	1.15
10	40.00	1260.00	53.40	12.37	40.8	73.13	4.56
11	50.00	1080.00	41.59	9.98	29.29	71.18	2.16
12	60.00	1260.00	43.49	12.65	30.87	66.06	3.99
13	50.00	825.44	48.15	9.43	34.38	74.65	1.39
14	60.00	900.00	42.35	16.64	34.6	64.31	9.81
15	50.00	1334.56	41.80	15.80	31.54	63.38	12.55
16	50.00	1080.00	45.47	10.11	33.79	73.45	2.41
17	40.00	900.00	47.88	11.66	35.09	71.62	3.84
18	64.14	1080.00	42.28	14.84	31.96	65.09	14.62
19	35.86	1080.00	53.17	12.56	43.02	73.72	8.07

L* (lightness/darkness), a* (redness/greenness) and b* (yellowness/blueness). ❖ L* (claridad/oscuridad), a* (enrojecimiento/verdor) y b* (amarillez/azulado).

Table 3. Experimental values of the quality parameters of color and texture for *Mabonde* banana variety under different oven drying conditions.**Cuadro 3. Valores experimentales de los parámetros de calidad de color y textura en plátano de la variedad *Mabonde*, deshidratado en horno.**

Treatment	Independent variables		Response variables				
	Temperature (°C)	Time (min)	L*	a*	b*	Hue (°H)	Hardness (N)
1	50.00	1324.26	42.03	8.78	15.35	70.43	14.01
2	60.00	1200.00	42.48	16.01	30.20	62.07	14.29
3	35.86	900.00	47.08	12.29	36.55	71.40	3.00
4	40.00	600.00	43.40	12.65	33.22	69.15	1.29
5	60.00	1200.00	38.02	15.82	27.57	60.14	11.60
6	64.14	900.00	43.99	15.28	30.69	63.52	8.80
7	40.00	1200.00	44.83	11.38	33.98	71.47	5.00
8	50.00	1324.26	43.18	13.41	33.21	68.01	12.13
9	50.00	900.00	44.56	14.50	36.34	68.24	9.77
10	60.00	600.00	43.01	15.87	32.33	63.86	8.25
11	35.86	900.00	43.57	11.96	32.59	69.85	2.03
12	64.14	900.00	46.56	15.76	34.69	65.56	6.66
13	50.00	900.00	45.66	11.78	35.52	71.65	5.89
14	40.00	1200.00	43.94	13.37	34.53	68.83	3.00
15	60.00	600.00	44.14	12.93	29.59	66.38	13.03
16	50.00	475.74	48.93	12.75	38.81	71.81	1.81
17	50.00	475.74	47.23	12.11	39.14	72.8	1.28
18	40.00	600.00	39.73	12.24	29.93	67.74	3.67
19	50.00	900.00	50.08	14.97	40.82	69.86	5.38

L* (lightness/darkness), a* (redness/greenness) and b* (yellowness/blueness). ❖ L* (claridad/oscuridad), a* (enrojecimiento/verdor) y b* (amarillez/azulado).

and hue angle values (Table 2). The lowest L and hue angle values for dried slices of *Mabonde* were obtained at 60 °C and 1200 min (Table 3).

This is an indication that banana slices of the *Luvhele* and *Mabonde* varieties dried at the above drying conditions were browner as manifested by their lowest L* and hue values. Furthermore, it indicates that degradation of color inducing compound and oxidation increased with drying temperature. Thuwapanichayanan *et al.* (2011) also reported that the overall color (°hue) of dried banana decreased with increase in drying temperature. ANOVA of the effect of model parameters on color characteristics of banana slices of both varieties showed that linear effects of temperature and drying time, interaction effects of temperature and drying time, quadratic effects of temperature and drying time were all significant ($p \leq 0.05$) to the overall color (hue) of banana *Luvhele* variety (Table 4). Linear effect of temperature were significant ($p \leq 0.05$) to the overall color (hue) of banana *Mabonde* variety (Table 5).

de L y ángulo de matiz, respectivamente (Cuadro 2). Las rodajas de *Mabonde* deshidratadas a 60 °C y 1200 min presentaron los valores menores de L y ángulo de matiz (Cuadro 3).

Esto indica que las rodajas deshidratadas en las condiciones señaladas antes eran las más oscuras, según sus valores menores de L* y matiz. También, esto indica que la degradación del compuesto que imparte color aumentó con la temperatura de secado. Thuwapanichayanan *et al.* (2011) también informaron que el color general (°matiz) en plátano deshidratado disminuyó con el aumento de la temperatura de secado. El ANDEVA mostró que los efectos lineales de la temperatura y el tiempo de secado, de la interacción de la temperatura y del tiempo de secado, los cuadráticos de la temperatura y del tiempo de secado, fueron significativos ($p \leq 0.05$) para el color (matiz) de la variedad *Luvhele* (Cuadro 4). En la variedad *Mabonde* el efecto lineal de la temperatura fue significativo ($p \leq 0.05$) para el color general (matiz) (Cuadro 5).

Los gráficos de superficie de respuesta a la temperatura y el tiempo de secado en las características de color

Table 4. ANOVA results of regression models obtained to quality parameters of color and texture of banana slices of *Luwhele* variety dried in oven dryer.**Cuadro 4. Resultados de ANDEVA de modelos de regresión con parámetros de calidad de color y textura de rodajas de plátano deshidratadas en horno secador de la variedad *Luwhele*.**

Source	L*	a*	b*	°Hue	Hardness
	P-value				
Model	0.018 [†]	0.0109 [†]	0.0058 [†]	0.0003 [†]	0.0005 [†]
<i>A-Temperature</i>	0.0054 [†]	0.3765	0.0018 [†]	0.0002 [†]	0.0008 [†]
<i>B-Time</i>	0.7491	0.7184	0.0629	<0.0001 [†]	0.1018
<i>AB</i>		0.8215	0.0069 [†]	0.0017 [†]	0.0112 [†]
<i>A</i> ²		0.001 [†]		0.0064 [†]	<0.0001 [†]
<i>B</i> ²		0.8633		0.0202 [†]	0.4901

[†]Significant at $p \leq 0.05$; *A*: linear effect of temperature; *B*: linear effect of drying time; *AB*: interaction effect of temperature and drying time; *A*²: quadratic effect of temperature; *B*²: quadratic effect of drying time; L* (lightness/darkness); a* (redness/greenness) and b* (yellowness/blueness). ❖ [†]Significante con $p \leq 0.05$, *A*: efecto lineal de la temperatura, *B*: efecto lineal del tiempo de secado, *AB*: efecto de interacción de la temperatura y el tiempo de secado, *A*²: efecto cuadrático de la temperatura, *B*²: efecto cuadrático del tiempo de secado, L* (claridad/oscuridad), a* (enrojecimiento/verdor) y b* (amarillez/azulado).

Table 5. ANOVA results of regression models obtained to quality parameters of color and texture of banana slices of *Mabonde* variety dried in oven dryer.**Cuadro 5. Resultados de ANDEVA de modelos de regresión con parámetros de calidad de color y textura de rodajas de plátano deshidratado en horno secador de variedad *Mabonde*.**

Source	L*	a*	b*	°Hue	Hardness
	P-value				
Model	0.0009 [†]	0.0002 [†]	0.001 [†]	0.0005 [†]	0.0001 [†]
<i>A-Temperature</i>	0.0028 [†]	0.0002 [†]	0.0032 [†]	0.0004 [†]	0.0001 [†]
<i>B-Time</i>	0.0008 [†]	0.129	0.0015 [†]	0.0565	0.0001 [†]

[†]Significant at $p \leq 0.05$; *A*: linear effect of temperature; *B*: linear effect of drying time; L* (lightness/darkness), a* (redness/greenness) and b* (yellowness/blueness). ❖ [†]Significante con $p \leq 0.05$, *A*: efecto lineal de la temperatura, *B*: efecto lineal del tiempo de secado, L* (claridad/oscuridad), a* (enrojecimiento/verdor) y b* (amarillez/azulado).

Response surface plots of the effect of drying temperature and time on the color characteristics of banana slices *Luwhele* and *Mabonde* are shown in Figures 1-3. Akinoso and Adeyanju (2012) reported that response surface plot help to visualize the shape of the response surface and give useful information about fitted model.

L* (Figure 1A) increased with decrease in drying temperature and a* (Figure 1B) and b* (Figure 1C) increased with increase in drying temperature and time.

de las rodajas de plátano se presentan en las Figuras 1 a 3. Akinoso y Adeyanju (2012) indicaron que el trazado de la superficie de respuesta permite visualizar la forma de la superficie de respuesta y proporciona información sobre el modelo ajustado.

L* (Figura 1A) aumentó con la disminución de la temperatura de secado y a* (Figura 1B) y b* (Figura 1C) aumentaron con la temperatura y el tiempo de secado.

Las ecuaciones de regresión que relacionan los parámetros de color, L*, a*, b* y tono, en las rodajas

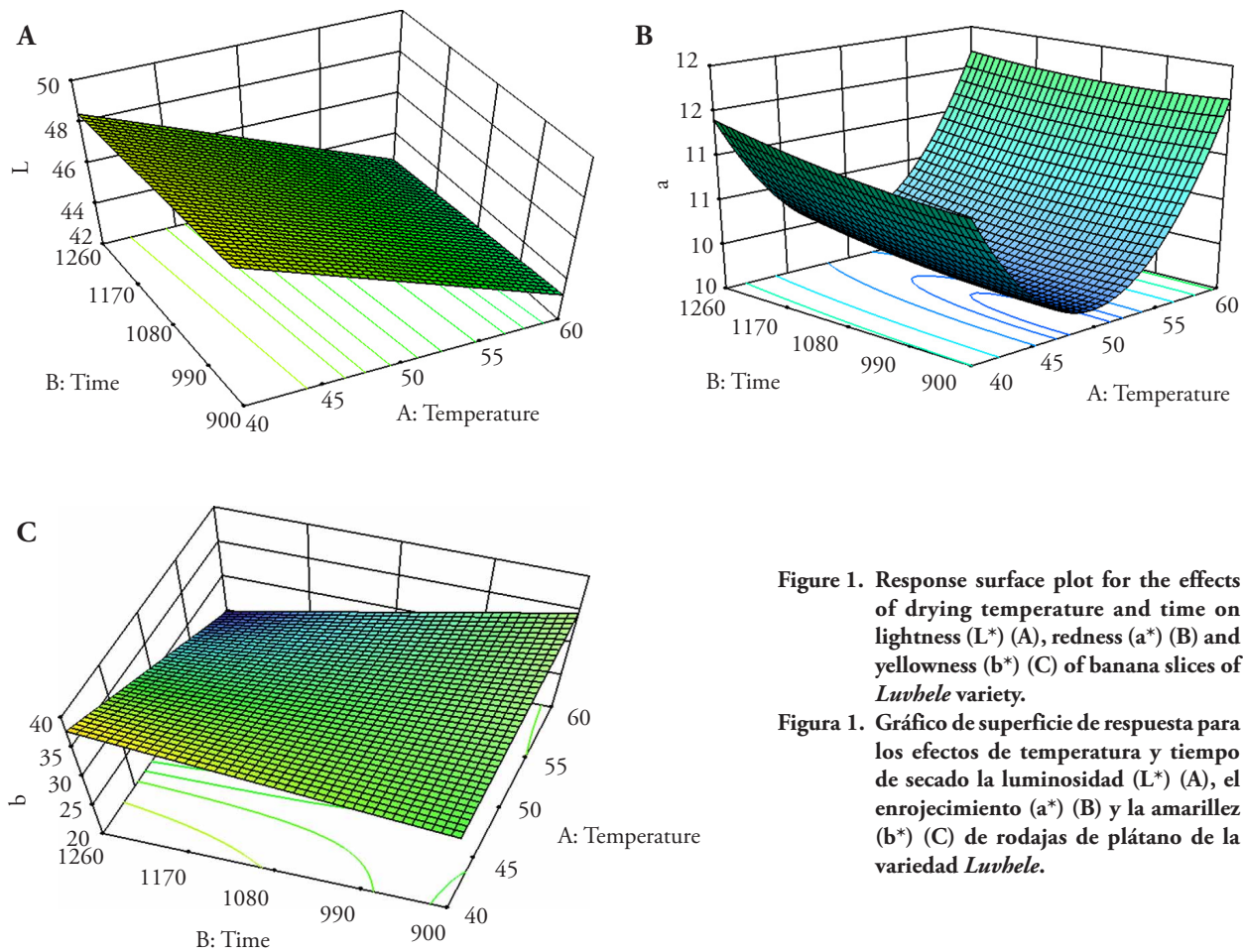


Figure 1. Response surface plot for the effects of drying temperature and time on lightness (L^*) (A), redness (a^*) (B) and yellowness (b^*) (C) of banana slices of *Luvhele* variety.

Figura 1. Gráfico de superficie de respuesta para los efectos de temperatura y tiempo de secado la luminosidad (L^*) (A), el enrojecimiento (a^*) (B) y la amarillez (b^*) (C) de rodajas de plátano de la variedad *Luvhele*.

Regression equations relating the color parameters L^* , a^* , b^* and hue of dried banana slices to drying process variables (actual levels), temperature and time are shown in Tables 6 and 7 for *Luvhele* and *Mabonde* varieties. The predictive models had adequate regression values. Myers and Montgomery (2002) reported that a good predictive model should have a significant P value ($p \leq 0.05$), adjusted $R^2 \geq 0.80$, a coefficient of variance (CV) value $\leq 10\%$, and test lack of fit > 0.1 . This is in agreement and consistent with the values of significance of model (p value), CV and lack of fit obtained in our study, except the adjusted R^2 values of all the obtained models to color responses of dried slices of both banana varieties (Tables 6 and 7), which had values of this parameter less than 0.80. However, the overall color response variable (hue value) for both banana varieties had values close to 0.80 for adjusted R^2 (0.78) which, added to the other statistical parameters of goodness of fit mentioned above and described in Tables 6 and 7,

deshidratadas de plátano con las variables del proceso de secado (niveles reales), temperatura y tiempo, en las variedades *Luvhele* y *Mabonde* se presentan en los Cuadros 6 y 7. Los modelos predictivos tuvieron valores de regresión adecuados. Myers y Montgomery (2002) indicaron que un buen modelo predictivo debería tener valor de p significativo ($p \leq 0.05$), $R^2 \geq$ ajustado de 0.80, valor de coeficiente de varianza (CV) $\leq 10\%$ y falta de ajuste de prueba > 0.1 . Esto concuerda con los valores de significancia (p) del modelo, CV y falta de ajuste en nuestro estudio, excepto los valores R^2 ajustados de todos los modelos obtenidos para la respuesta del color en las rodajas de ambas variedades de plátano (Cuadro 6 y 7); que tuvieron valores menores a 0.80. Sin embargo, la respuesta general del color (matiz) en ambas variedades de plátano mostró valores R^2 (0.78) ajustados cercanos a 0.80 y los otros parámetros estadísticos de ajuste de bondad, descritos en los Cuadros 6 y 7, se consideraron aceptable para el proceso de optimización, que se describe enseguida.

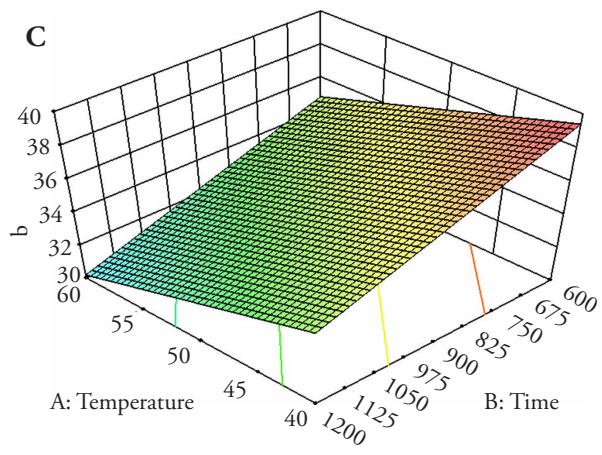
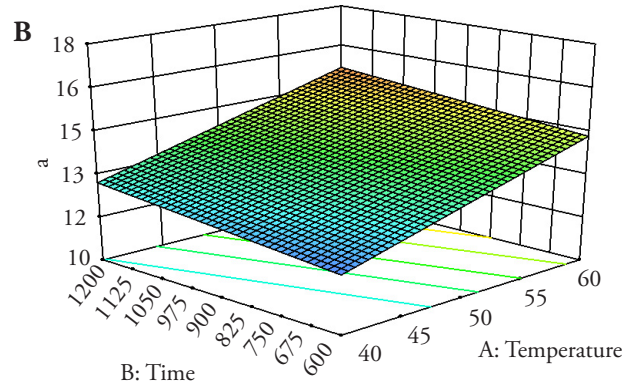
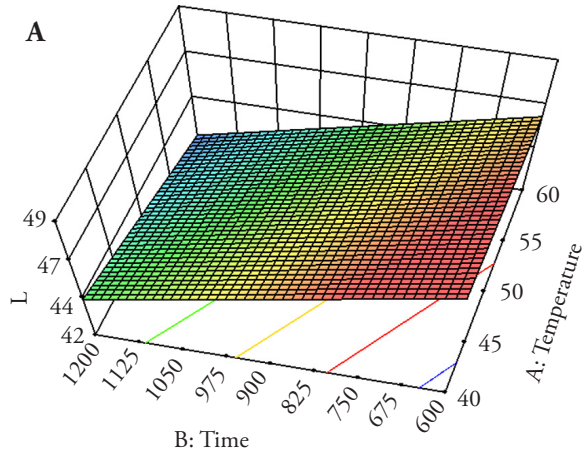


Figure 2. Response surface plot for the effects of drying temperature and time on lightness (L^*) (A); redness (a^*) (B); and yellowness (b^*) (C) of banana slices of *Mabonde* variety.

Figura 2. Gráfico de superficie de respuesta para los efectos de temperatura y tiempo de secado en la luminosidad (L^*) (A), el enrojecimiento (a^*) (B) y la amarillez (b^*) (C) de rodajas de plátano de variedad *Mabonde*.

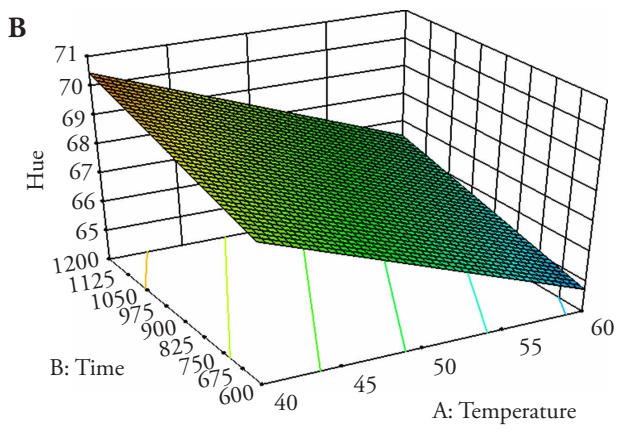
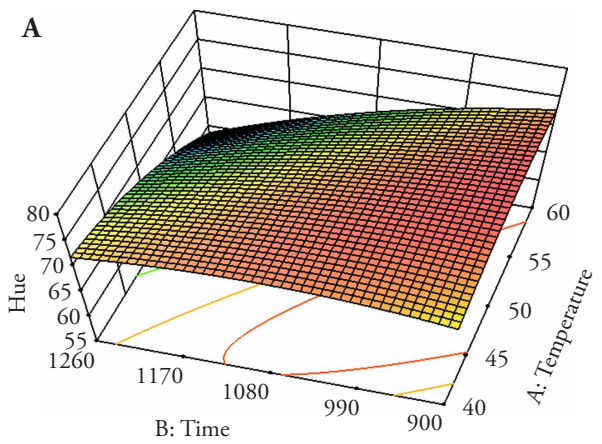


Figure 3. Response surface plot for the effects of drying temperature and time on overall color (hue) of banana slices of *Luvbele* (A) and *Mabonde* (B) varieties.

Figura 3. Gráfico de superficie de respuesta para los efectos de temperatura y tiempo de secado en el color general (matiz) de rodajas de plátano de las variedades *Luvbele* (A) y *Mabonde* (B).

Table 6. Regression models obtained to quality parameters of color and texture (response variables) of banana slices of *Luvbele* variety dried in oven dryer.

Cuadro 6. Modelos de regresión obtenidos con parámetros de calidad de color y textura (variables respuesta) de rodajas de plátano de la variedad *Luvbele* deshidratadas en horno secador.

Response variables	Models	R ²	Adjusted R ²	C.V%	Lack of fit p-value
L*	62.08669-0.28802* A-1.62070E-003*B	0.79	0.71	7.81	0.23 [†]
a*	48.27688-1.54080* A-1.69626E-003 * B-4.66989E-005*A* B+0.016140* A ² +2.16815E-006* B ²	0.73	0.59	8.36	0.82 [†]
b*	-47.62959+1.77781* A+0.087908*B-1.91094E-003*A*B	0.64	0.54	6.93	0.22 [†]
°Hue	-119.67631+4.08919* A+0.19983*B-2.03170E-003 *A*B-0.021853*A ² -5.41360E-005*B ²	0.86	0.78	2.43	0.13 [†]
Hardness	40.27383-2.92632*A+0.059344*B-7.50694E-004*A*B+0.039339*A-1.19609E-005*B ²	0.89	0.80	9.68	0.14 [†]

A: linear effect of temperature; B: linear effect of drying time; AB: interaction effect of temperature and drying time; A²: quadratic effect of temperature; B²: quadratic effect of drying time; L* (lightness/darkness); a* (redness/greenness) and b* (yellowness/blueness); †: not significant (p>0.05); C.V %: coefficient of variation. ❖ A: efecto lineal de la temperatura, B: efecto lineal del tiempo de secado, AB: efecto de interacción de la temperatura y el tiempo de secado, A²: efecto cuadrático de la temperatura, B²: efecto cuadrático del tiempo de secado, L* (claridad/oscuridad), a* (enrojecimiento/verdor) y b* (amarillez/azulado), †: no significativo (p>0.05) y CV %: coeficiente de variación.

Table 7. Regression models obtained to quality parameters of color and texture (response variables) of banana slices of *Mabonde* variety dried in oven dryer.

Cuadro 7. Modelos de regresión obtenidos con parámetros de calidad de color y textura (variables respuesta) de rodajas de plátano de la variedad *Mabonde* deshidratadas en horno secador.

Response variables	Models	R ²	Adjusted R ²	C.V%	Lack of fit p-value
L*	+56.26807-0.1036*A-6.40142E-003*B	0.91	0.80	1.26	0.93 [†]
a*	+6.04157+0.12980*A+1.44973E-003*B	0.72	0.68	6.62	0.59 [†]
b*	+53.09055-0.21947*A-8.10311E-003*B	0.75	0.70	5.38	0.27 [†]
°Hue	+74.58848-0.19347*A+3.01877E003*B	0.82	0.78	1.90	0.92 [†]
Hardness	-17.27529+0.30813*A+9.64172E-003* B	0.81	0.79	10.00	0.14 [†]

A: linear effect of temperature; B: linear effect of drying time; AB: interaction effect of temperature and drying time; A²: quadratic effect of temperature; B²: quadratic effect of drying time; L* (lightness/darkness); a* (redness/greenness) and b* (yellowness/blueness); †: not significant (p>0.05); C.V %: coefficient of variation. ❖ A: efecto lineal de la temperatura, B: efecto lineal del tiempo de secado, AB: efecto de interacción de la temperatura y el tiempo de secado, A²: efecto cuadrático de la temperatura, B²: efecto cuadrático del tiempo de secado, L* (claridad/oscuridad), a* (enrojecimiento/verdor) y b* (amarillez/azulado). †: no significativo (p>0.05) y CV %: coeficiente de variación.

are considered acceptable to perform the optimization process, described in a later section.

Texture (hardness) of banana slices of *Luvbele* and *Mabonde* varieties dried with oven drying process

The hardness of dried banana slices of *Luvbele* ranged between 1.15 and 14.62 N (Table 2), and between 1.28 and 14.29 N in *Mabonde* (Table 3).

Textura (dureza) de rodajas de plátano de las variedades *Luvbele* y *Mabonde* deshidratadas en horno

La dureza de las rodajas deshidratadas de plátano de la variedad *Luvbele* varió entre 1.15 y 14.62 N (Cuadro 2) y en la variedad *Mabonde* entre 1.28 y 14.29 N (Cuadro 3). La dureza máxima de las variedades *Luvbele* y *Mabonde* se obtuvo a 64.14 °C por 1080 min y a 60 °C por 1200 min. El ANDEVA del

The maximum hardness for *Luvhele* and *Mabonde* banana varieties were obtained at 64.14°C for 1080 min and 60 °C for 1200 min. ANOVA of the effect of model parameters on the hardness characteristic of dried slices of both banana varieties showed that the linear term of temperature, interaction term of temperature and drying time, and the second order term of temperature had significant effect ($p \leq 0.05$) on this parameter of texture of *Luvhele* banana variety (Table 4). The linear terms of temperature and drying time had significant effect ($p \leq 0.05$) on hardness of *Mabonde* banana variety (Table 5). The regression models for predicting hardness of dried banana slices of *Luvhele* and *Mabonde* both varieties are shown in Tables 6 and 7.

These regression models for hardness of *Luvhele* and *Mabonde* banana varieties are characterized by high values of coefficient of determination (R^2) (Tables 6 and 7). This guarantees a good fit of the models for the experimental data. The values of adjusted determination coefficient ($\text{adj } R^2 = 0.79-0.80$) compared to the hardness of dried banana slices of both varieties indicates that the experimental results are highly consistent with the predicted values (Han *et al.*, 2016; Yan *et al.*, 2016). Furthermore, the p-values of lack of fit of regression models for hardness were not significant ($p > 0.05$). This indicates that the fitting model is good for interpreting the data. Consequently, the coefficients of variations were relatively low, indicating the better reliability of the experimental values.

The effect of drying temperature and time on the hardness of dried banana slices of *Luvhele* and *Mabonde* varieties is shown in Figures 4A and 4B, respectively. It can be observed that hardness of *Luvhele* variety decreased with drying time (Figure 4A), while hardness of *Mabonde* variety increased with increase in drying temperature and time (Figure 4B). This can be attributed to rapid removal of moisture at higher drying temperatures which might have caused collapse of capillary spaces inside the samples. A similar observation was reported by Kotwaliwale *et al.* (2007) and Kumar *et al.* (2014).

Optimization of oven drying process of banana slices of *Luvhele* and *Mabonde* varieties

The optimum oven drying condition for banana slices of the *Luvhele* variety was 47.56 °C for 944.87

efecto de los parámetros del modelo sobre la dureza característica de las rodajas secas de ambas variedades de plátano mostró que el término lineal de temperatura, el término de interacción de la temperatura y el tiempo de secado y el segundo orden de temperatura tuvieron efecto significativo ($p \leq 0.05$) en el parámetro de textura de la variedad *Luvhele* (Cuadro 4). Los términos lineales de temperatura y tiempo de secado tuvieron efecto significativo ($p \leq 0.05$) en la dureza de la variedad *Mabonde* (Cuadro 5). Los modelos de regresión para predecir la dureza de las rodajas deshidratadas de plátano de las variedades se presentan en los Cuadros 6 y 7.

Estos modelos de regresión para la dureza de las variedades de plátano *Luvhele* y *Mabonde* se caracterizaron por los valores altos de coeficiente de determinación (R^2) (Cuadros 6 y 7). Lo que asegura el ajuste mayor de los modelos para los datos experimentales. Los valores del coeficiente de determinación ajustado ($\text{adj } R^2 = 0.79-0.80$), en comparación con la dureza de las rodajas deshidratadas de ambas variedades, indicaron que los resultados experimentales son consistentes con los valores predichos (Han *et al.*, 2016; Yan *et al.*, 2016). Además, los valores p de los modelos de regresión con poco ajuste de la dureza no fueron significativos ($p > 0.05$). Esto indica que el modelo de ajuste es adecuado para interpretar los resultados. En consecuencia, los coeficientes de variación fueron relativamente bajos, lo que indicó fiabilidad mayor de los valores experimentales.

El efecto de la temperatura y el tiempo de secado en la dureza de las rodajas deshidratadas de las variedades *Luvhele* y *Mabonde* se representó en las Figuras 4A y 4B. La dureza de la variedad *Luvhele* disminuyó con el tiempo de secado (Figura 4A); en contraste, la de la variedad *Mabonde* aumentó con la temperatura y el tiempo de secado (Figura 4B). Esto es atribuible a la eliminación acelerada de la humedad a mayor temperatura, lo que podría causar colapso de los espacios capilares en las muestras. Esta observación fue similar a la documentada por Kotwaliwale *et al.* (2007) y Kumar *et al.* (2014).

Optimización del proceso de secado en horno de rebanadas de plátano de las variedades *Luvhele* y *Mabonde*

La condición óptima de secado en horno para las rodajas de plátano de la variedad *Luvhele* fue de

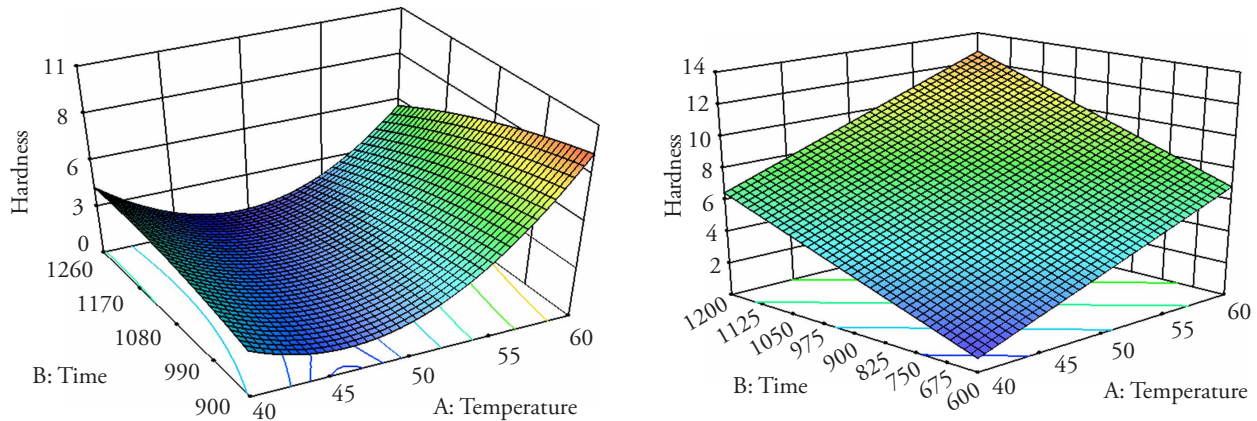


Figure 4. Response surface plot for the effects of drying temperature and time on hardness of banana slices of *Luvhele* (A) and *Mabonde* (B) varieties.

Figura 4. Gráfico de superficie de respuesta para los efectos de temperatura y tiempo de secado de rodajas de plátano de las variedades *Luvhele* (A) y *Mabonde* (B).

min and 40 °C for 646.17 min for *Mabonde* variety, respectively. The predicted values of color (hue) and hardness were 74.56° and 2 N for dried banana slices of the *Luvhele* variety, and 69° and 1 N were obtained for the *Mabonde* variety. Desirability of the obtained optimum conditions were 0.97 and 0.83 for *Luvhele* and *Mabonde* banana varieties, respectively. Experimental validation of the software generated optimum drying conditions for the banana varieties was achieved by subjecting the banana slices to the optimized drying conditions obtained by RSM. The experimental values of hue and hardness of dried banana slices were 74.60° and 1.88 N for *Luvhele* variety and 68.99° and 1.02 N for *Mabonde* variety, respectively. These values were close to the predicted values, hence confirming the validity of the optimized results and consistency of the regression models generated by the RSM analysis.

CONCLUSIONS

This study investigated the optimization of the oven drying process to obtain dried banana slices of *Luvhele* and *Mabonde* varieties with high values of overall color and low values of hardness using response surface methodology. The drying conditions of 47.56 °C and 944.87 min of drying time were found optimum with a desirability of 0.97 to obtain a high quality product for the *Luvhele* banana variety, while 40 °C and 646.17 min of drying duration with a desirability of 0.83 were predicted as best conditions

47.56 °C por 944.87 min y 40 °C por 646.17 min para la variedad *Mabonde*. Los valores pronosticados de matiz y dureza fueron 74.56° y 2 N para rodajas secas de plátano de la variedad *Luvhele* y 69° y 1 N para la variedad *Mabonde*. Las condiciones óptimas que se obtuvieron fueron 0.97 y 0.83 deseables para *Luvhele* y *Mabonde*. La validación experimental del software generó las condiciones óptimas de secado para las variedades al someter las rebanadas de plátano a las condiciones optimizadas de secado obtenidas por MSR. Los valores experimentales de color y dureza de las rodajas secas fueron 74.60° y 1.88 N para la variedad *Luvhele* y 68.99° y 1.02 N para la variedad *Mabonde*. Estos valores estuvieron cercanos a los valores predichos; lo que confirma la validez de los resultados optimizados y la consistencia de los modelos de regresión generados por el análisis MSR.

CONCLUSIONES

Este estudio investigó la optimización del proceso de secado en horno para obtener rodajas deshidratadas de plátano de las variedades *Luvhele* y *Mabonde* con valores altos de color y bajos de dureza, usando la metodología de superficie de respuesta. Las condiciones de secado óptimas encontradas fueron 47.56 °C y 944.87 min con deseabilidad de 0.97 para obtener un producto con alta calidad para la variedad de plátano *Luvhele*; para la variedad de plátano *Mabonde* los valores fueron 40 °C, 646.17 min y 0.83. El estudio demostró que la metodología de superficie de respuesta

of drying for the *Mabonde* banana variety. The study has shown that response surface methodology was efficient in investigating the behavior of color and hardness of *Luvhule* and *Mabonde* banana varieties under different oven drying conditions. Therefore, the optimum drying conditions obtained in this study could be used as a standard or base line information for industrial processing of the studied banana varieties.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors acknowledge the financial support to AOO from the Research fund project number SARDF/14/FST/01 and also the Work Study Programme of the University of Venda, Thohoyandou, South Africa.

LITERATURE CITED

- Abbott, J. A. 1999. Quality measurement of fruits and vegetables. *Post. Bio. Technol.* 15: 207-225.
- Ahmed, N., S. Jagmohan, H. Chauhan, P. G. Anjum, and H. Kour. 2013. Different drying methods: Their applications and recent advances. *Int. J. Food. Nutr. Saf.* 4: 34-42.
- Akinoso, R., and J. A. Adeyanju. 2012. Optimization of edible oil extraction from *ofada* rice bran using response surface methodology. *Food. Bioprocess. Technol.* 5: 1372-1378.
- Anyasi, T.A., A. I. O. Jideani, and G. R. A. Mchau. 2015. Effect of organic acid pretreatment on some physical, functional and antioxidant properties of flour obtained from three unripe banana cultivars. *Food. Chem.* 172: 515-522.
- Chua, K. J., A. S. Mujumdar, S. K. Chou, M. N. A. Hawlader, and J. C. Ho. 2000. Convective drying of banana, mango and potato pieces: effect of cyclical variations of air temperature on drying kinetics and color change. *Drying Technol.* 18: 907-936.
- Fellows, P. 2007. *Food Processing Technology*. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England. pp: 311-316.
- Han, L., Y. Suo, Y. Yang, J. Meng, and N. Hu. 2016. Optimization, characterization, and biological activity of polysaccharides from *Berberis dasystachya* Maxim. *Int. J. Bio. Macro.* 85: 655-666.
- Jangam, S.V., C. L. Law, and A. S. Mujumdar. 2010. *Drying of Foods, Vegetables and Fruits*. Singapore. pp: 31.
- Jideani, V.A., R. H. Oloruntopa, and I. A. Jideani. 2010. Optimization of *fura* production using response surface methodology. *Int. J. Food. Prop.* 13: 272-281.
- Kotwaliwale, N., P. Bakane, and A. Verma. 2007. Changes in textural and optical properties of oyster mushroom during hot air drying. *J. Food Eng.* 78: 1207-1211.
- fue eficiente para investigar el comportamiento del color y la dureza de las variedades de plátano *Luvhule* y *Mabonde* en diferentes condiciones de secado en horno. Por lo tanto, las condiciones de secado óptimas obtenidas en este estudio podrían utilizarse como información estándar y una base para el procesamiento industrial de las variedades de plátano.

—Fin de la versión en Español—



- Kulkarni, S. G., V. B. Kudachikar and M. N. Prakash. 2011. Studies on physico-chemical changes during artificial ripening of banana (*Musa* sp) variety 'Robusta'. *J Food. Sci. Technol.* 48: 730-734.
- Kumar, D., S. Prasad, and G. S. Murthy. 2014. Optimization of microwave-assisted hot air drying conditions of okra using response surface methodology. *J. Food. Sci. Tech.* 51: 221-232.
- Maskan, M. Microwave/air and microwave finish drying of banana. 2000. *J Food Eng.* 44: 71-78.
- Mayor, L., and M. Sereno. 2004. Modeling shrinkage during convective drying of food materials: A review. *J. Food. Eng.* 61: 373-386.
- Montgomery, D. C. 2005. *Design and Analysis of Experiments: Response Surface Method and Designs*. John Wiley and Sons Inc. New Jersey. 277 p.
- Omolola, A.O., A.I.O., Jideani, and P. Kapila. 2014. Modeling microwave drying kinetics and moisture diffusivity of banana (*Mabonde* variety). *Int. J. Agri. Bio. Eng.* 7: 107-113.
- Omolola, A. O., A. I. O. Jideani, and P. Kapila. 2015. Modeling of thin layer drying characteristics of banana cv. *Luvhule*. Bulgarian. *J. Agri. Sci.* 21: 342-348.
- USDA. 2005. *Dietary Guidelines for Americans-Food Sources of Selected Nutrients*. United States Department of Agriculture. 84 p.
- Sivasanker, B. 2008. *Food Processing and Preservation*. Gosh Publishers, New Delhi, pp: 216-230.
- Soysal, A., S. Oztekin, and O. Eren. 2006. Microwave drying of parsley: modeling, kinetics, and energy aspects. *Biosys. Eng.* 93: 403-413.
- Thuwapanichayanan, R., S. Prachayawarakorn, J. Kunwisawa, and S. Soponronnarit. 2011. Determination of effective moisture diffusivity and assessment of quality attributes of banana slices during drying. *LWT-Food. Sci. Tech.* 44: 1502-1510.
- Topuz, A. A. 2008. Novel approach for color degradation kinetics of paprika as a function of water activity. *LWT-Food. Sci. Tech.* 41: 1672-1677.
- Yan, F., K. Fan, J. He, and M. Gao. 2016. Ultrasonic-assisted solvent extraction of carotenoids from rapeseed meal: optimization using response surface methodology. *J Food Qual.* 38: 377-386.