

EFFECTO DE LA TEMPERATURA DEL PROCESO Y EL ESPESOR DE LAS LÁMINAS EN
EL SECADO POR VENTANA REFRACTIVA EN BATATA BLANCA (*Ipomoea batatas* L.)
SOBRE LA CINÉTICA DE SECADO Y PROPIEDADES FÍSICAS.



HEYNE DE JESÚS MONTALVO LAMBRAÑO

CÉSAR DAVID PADILLA FERIA

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS

BERÁSTEGUI-CÓRDOBA

2020

EFFECTO DE LA TEMPERATURA DE PROCESO Y EL ESPESOR DE LAS LÁMINAS EN
EL SECADO POR VENTANA REFRACTIVA EN BATATA BLANCA (*Ipomoea batatas L.*)
SOBRE LA CINÉTICA DE SECADO Y PROPIEDADES FÍSICAS.

HEYNE DE JESÚS MONTALVO LAMBRAÑO

CÉSAR DAVID PADILLA FERIA

Trabajo de grado para optar por el título de INGENIERO DE ALIMENTOS

Director (es)

OMAR ANDRÉS PERÉZ SIERRA, Ph.D.

FABIÁN ALBERTO ORTEGA QUINTANA, Ph.D.

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS

BERÁSTEGUI-CÓRDOBA

2020

DEDICATORIA

*“Al Dios Vivo y Todopoderoso Jehová de los ejércitos, quien es digno de toda la gloria, honra, honor, alabanza, exaltación y adoración; al Unigénito Hijo de Dios nuestro **Señor y Salvador Jesús**, quien es merecedor de toda potencia, exaltación, gloria, honor, riqueza y cuyo reino es sempiterno, por su grande amor y gracia inmerecida derramada en nuestros corazones, y al **Espíritu Santo de Dios** por consolarnos y guiarnos a toda verdad siempre en nuestras pruebas y tribulaciones.”*

*A nuestras madres **Sady del Carmen Lambraño Gonzales** y **Argenedith Feria Marimon** por apoyarnos en todo momento, por los valores que nos han inculcado, por la oportunidad de tener una buena educación y por el amor y paciencia que nos regalado en todos nuestros años de vida.”*

“Al resto de nuestros familiares y amigos que siempre han estado con nosotros, enseñándonos y apoyándonos en nuestros estudios e ideas de trabajo.”

*“A la **Universidad de Córdoba**, por su grande aporte a nuestra formación académica durante todos estos años y por el grande aporte científico y educativo a la región cordobesa, a Colombia y al mundo.”*

AGRADECIMIENTOS

*“Doy gracias a **Jehová nuestro Padre Celestial** por su grande misericordia, amor, paciencia y todas las demás riquezas que Él me ha dado y concedido sin yo merecerlas. Tuyo son **Señor** el conocimiento y la sabiduría, tu eres quien muda los tiempos y las edades; eres quien quita reyes, y pones reyes, eres quien da esfuerzo al cansado y multiplica las fuerzas al que no tiene ningunas (Daniel 2:21 y Isaías 40:29). Gracias **Señor Jesús** por tu inmenso amor dado a mi vida, y por tu grande salvación, no sería no nadie en este pequeño mundo sin ti **Señor**, alejados de ti y fuera de ti nada seríamos, ¿a quién iremos **Señor**?, si sólo tú tienes palabras de vida eterna (Juan 6:68), ¡Aleluya!”.*

*“Doy gracias a Dios por las vidas de mi amada madre **Sady Lambraño Gonzales**, mis hermanos **Juan José** y **Valentina** y toda mi familia, por su apoyo, fortaleza, enseñanza e impulso a seguir este logro académico, gracias por todos sus consejos que me llevaron a culminar mis estudios”.*

*“Doy gracias a Dios por permitirme conocer a mi hermano y compañero de tesis **Cesar Padilla Feria**, el cual es una excelente persona que ha dedicado parte de su tiempo a llevar a cabo este estudio; hermano le pido al Señor que te guarde y prospere tu vida y alma, y puedas ejecutar cada uno de los deseos y sueños que hay en tu corazón”.*

*“Doy gracias Dios por la vida de **Omar Andrés Pérez Sierra** nuestro director de tesis, por el tiempo y apoyo brindado a este proyecto. Profe eres un excelente padre académico y gran amigo, me siento agradecido con Dios por contar con un excelente ser humano como usted, deseo que el Señor more en usted y en toda su familia. De igual manera, agradezco al Señor por la vida de mi*

hermano y codirector de tesis **Fabián Alberto Ortega Quintana** por su grande apoyo e insistencia a lograr este proyecto. Espero en el Señor que siempre estés lleno de Su presencia, que el Señor te bendiga grandemente, al igual que a tu esposa e hijos.”

“Gracias doy al Señor por la vida de todos mis amigos y compañeros académicos. Ustedes siempre me motivaron a echar para adelante. ¡Dios les bendiga siempre!”

“Gracias a Dios por las vidas de mis padres espirituales **Víctor Beltrán** y **Devis Soto**, y a todos **mis hermanos en Cristo** por el consejo y sabiduría brindado a este necio, que el Poderoso de Israel les guarde, prospere y bendiga siempre”.

“Por último doy gracias a Dios por la Universidad de Córdoba, por la oportunidad de culminar mis estudios de pregrado. Además, al resto de profesores del Programa de Ingeniería de Alimentos, ustedes son excelentes personas, grandes amigos y científicos.”

Heyne De Jesús Montalvo Lambraño,

*“En primer lugar le doy gracias a **Dios** por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos más difíciles y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y felicidad”.*

*“A mi director de tesis **Omar Pérez Sierra** por haberme brindado su confianza y orientación en el desarrollo de este trabajo, también el haberme facilitado los medios para llevar a cabo las actividades propuestas durante el avance de mi trabajo, por toda la disponibilidad y paciencia conmigo. Además, mi más sentido agradecimiento al codirector **Fabián Ortega Quintana** por su participación, su disponibilidad y paciencia, la cual ha enriquecido el trabajo realizado”.*

*“A mi compañero de Tesis **Heiner Montalvo Lambraño**, por su perseverancia y dedicación en este trabajo, la buena comunicación logró que juntos hiciéramos un maravilloso trabajo, gracias por acompañarme durante este arduo camino”.*

*“A mi madre **Argenedith Feria Marimon** por apoyarme en todo momento, por los valores que me ha inculcado, por la oportunidad de tener una buena educación, pero sobre todo quiero darle las gracias por ser un gran ejemplo de vida. De igual manera, a mi hermana **Mari Yeny Padilla Feria** por su amor incondicional y confianza, la cual me ha motivado siempre a salir adelante; a mi tía **Rosario Arrieta Villega** por su generosidad y por ser parte significativa de mi vida; a mi primo **Fabio Anderson Padilla Montiel** por compartir conmigo sus conocimientos y amistad; a mi prima **Claudia Benítez Feria** por ser un ejemplo de Valentía y superación; a mis primo **Erick Xavier Pinto**, **David Padilla Padilla** y **Jorge Andrés Padilla**, de quienes siempre he recibido palabras de apoyo, consuelo y con los cuales he construido una base de buenos hábitos de trabajo y responsabilidad”.*

*“A mis profesores y todos los miembros del programa de Ingeniería de Alimentos, les agradezco todo el apoyo brindado a lo largo de la carrera, por su tiempo, amistad y sobre todo por todos los conocimientos que me transmitieron. A mis amigos por los momentos que pasamos juntos en Nuestra Alma Mater, por los trabajos que juntos realizamos y los conocimientos que adquirimos a la par, espero que en el futuro **Dios** nos regale la oportunidad de compartir experiencias en nuestra vida profesional a futuro”.*

*“Al señor **Nollys José Velásquez Ortega** (QEPD) por ser parte significativa en mi vida, por todo el apoyo, comprensión y sobre todo amistad, los momentos que juntos vivimos siempre serán recordados con una gran alegría”.*

“¡Para ustedes y por ustedes, muchas gracias!”

César David Padilla Feria

TABLA DE CONTENIDOS

	Pág.
LISTADO DE FIGURAS	11
LISTADO DE TABLAS	12
LISTADO DE APÉNDICES	13
RESUMEN	14
ABSTRACT	16
INTRODUCCIÓN.....	18
CAPÍTULO 1. REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	23
1.1. GENERALIDADES DE LA BATATA.....	23
1.1.1. Descripción y origen.....	23
1.1.2. Características nutricionales.....	24
1.1.3. Procesamiento y usos.....	25
1.2. SECADO.	25
1.2.1. Tipos de secado	27
1.2.2. Secado por Ventana Refractiva	29
1.2.3. Terminología y definiciones fundamentales	34
1.2.4. Efecto de los principales factores en la cinética de secado	37
1.2.5. Modelo matemático de transferencia de masa para el secado por Ventana Refractiva.	40
1.2.6. Efectos del secado sobre las propiedades físicas.....	43
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	49
2.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN	49
2.2. LOCALIZACIÓN	49

2.3. EQUIPOS UTILIZADOS.....	49
2.3.1. Equipo de ventana refractiva (RW)	49
2.3.2. Equipos complementarios.	49
2.4. VARIABLES E INDICADORES.....	50
2.4.1. Variables independientes	50
2.4.2. Variables dependientes	50
2.5. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS.....	50
2.5.1. Obtención de la materia prima	50
2.5.2. Secado de batata	51
2.5.3. Determinación del contenido de humedad.....	51
2.5.4. Determinación del efecto de la temperatura del proceso y el espesor de las láminas sobre la cinética del secado por Ventana Refractiva™ en batata blanca.....	52
2.5.5. Obtención de los parámetros cinéticos para el secado por Ventana Refractiva™ en batata blanca.....	52
2.5.6. Determinación del efecto de la temperatura del proceso y el espesor de las láminas sobre las propiedades físicas	53
2.5.7. Diseño experimental	55
2.5.8. Análisis estadístico de datos.....	56
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	57
3.1. DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA DE PROCESO Y ESPESOR DE LAS LÁMINAS SOBRE LA CINÉTICA DEL SECADO POR VENTANA REFRACTIVA EN BATATA BLANCA.....	57
3.1.1. Curvas de secado para la razón de humedad.....	57
3.1.2. Curvas de velocidad de secado	60

3.2. OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS CINÉTICOS EN EL SECADO POR VENTANA REFRACTIVA EN BATATA BLANCA.....	64
3.2.1. Modelación matemática de la transferencia de masa en el secado por Ventana Refractiva	64
3.2.2. Influencia de la temperatura.....	66
3.3. DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA DEL PROCESO Y EL ESPESOR DE LAS LÁMINAS SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS	69
3.3.1. Encogimiento.....	69
3.3.2. Densidad aparente.....	73
3.3.3. Porosidad.....	77
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES.....	81
CAPÍTULO 5. RECOMENDACIONES	82
BIBLIOGRAFÍA.....	83
APÉNDICES.....	116

LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Operación tipo Batch a nivel de escala de laboratorio para el secado por Ventana Refractiva™ (Ochoa et al. 2012).	31
Figura 2. Esquema del Sistema Continuo (Convencional) de la Ventana Refractiva™ (Tomado de Abonyi et al. 1991).	32
Figura 3. Curvas comunes de velocidad de secado: (a) Velocidad versus Tiempo de secado, (b) Velocidad de secado versus Contenido de humedad (Tomado de Shafiur 2007).	37
Figura 4. Forma de las muestras de Batata usadas en cada experimento de secado.	51
Figura 5. Curvas de razón de humedad adimensional (MR) <i>versus</i> tiempo de secado a diferentes temperaturas. a) Espesor de 1.5 mm; b) Espesor de 2.5 mm.	60
Figura 6. Curvas de velocidad de secado <i>versus</i> tiempo de secado a diferentes temperaturas. a) Espesor de 1.5 mm; b) Espesor de 2.5 mm.	63
Figura 7. Efecto de la temperatura de secado sobre la difusividad efectiva.	66
Figura 8. Coeficiente convectivo promedio para la transferencia de masa.	68
Figura 9. Coeficiente de encogimiento <i>versus</i> razón de humedad (MR) durante el secado de batata por Ventana Refractiva en batata. a) Espesor de 1.5mm; b) Espesor de 2.5mm.	71
Figura 10. Densidad aparente <i>versus</i> razón de humedad (MR) durante el secado por Ventana Refractiva en batata. a) Espesor de 1.5mm; b) Espesor de 2.5mm.	75
Figura 11. Porosidad <i>versus</i> razón de humedad (MR) durante el secado por Ventana Refractiva en batata. a) Espesor de 1.5 mm; b) Espesor de 2.5 mm.	79

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Contenido de humedad inicial en las muestras.....	57
Tabla 2. Resultados de las comparaciones entre las diferencias de las medias para el tiempo de secado (ψ_1 , ψ_2 y ψ_3) respecto a los espesores de las láminas de batata.....	58
Tabla 3. Coeficientes de difusividad efectiva y coeficientes convectivos de transferencia de masa para cada tratamiento.....	65
Tabla 4. Energía de activación (E_a) y factor de Arrhenius (D_0) para el modelo tipo Arrhenius. ..	67
Tabla 5. Modelo lineal para el coeficiente convectivo de transferencia de masa en función de la temperatura de secado.....	69
Tabla 6. Modelo lineal para los diferentes tratamientos con sus respectivos coeficientes de correlación (R^2), sumas del cuadrado del error (SSE) y las raíces del cuadrado medio del error (RMSE) durante el secado de batata por Ventana Refractiva.....	72
Tabla 7. Resultados de las comparaciones entre las diferencias de las medias para la densidad de aparente (ψ_4 , ψ_5 y ψ_6) respecto a los espesores de las láminas de batata.	74
Tabla 8. Modelo polinómico de cuarto grado para la densidad aparente en función de MR para los diferentes tratamientos durante el secado por Ventana Refractiva TM en batata.....	76
Tabla 9. Resultados de las comparaciones entre las diferencias de las medias para la porosidad (ψ_7 , ψ_8 y ψ_9) respecto a los espesores de las láminas de batata.	77
Tabla 10. Modelo polinómico de cuarto grado para la porosidad (%) en función de MR para los diferentes tratamientos durante el secado de batata por Ventana Refractiva TM	80

LISTADO DE APÉNDICES

	Pág.
APÉNDICE A. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS PARA EL TIEMPO DE SECADO.....	116
APÉNDICE B. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS PARA LAS PROPIEDADES MEDIDAS.....	118
APÉNDICE C. ANÁLISIS DE REGRESIÓN NO LINEAL PARA LAS PROPIEDADES MEDIDAS.....	125
APÉNDICE D. DATOS EXPERIMENTALES DEL PROCESO DE SECADO.....	138
APÉNDICE E. TABLAS DE DATOS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS MEDIDAS.....	149

RESUMEN

La evaluación del efecto de la temperatura del proceso y el espesor de las láminas sobre la cinética de secado y propiedades físicas (encogimiento, densidad aparente y porosidad) en láminas de batata blanca (*Ipomoea batatas* L.) sometidas a secado por Ventana Refractiva ha sido estudiado con el propósito de determinar los parámetros cinéticos mediante la aplicación de la cinética de primer orden para la influencia de la temperatura, la segunda Ley de Fick para la transferencia de humedad, y el comportamiento de sus propiedades físicas mediante los modelos lineal de Ocho et al. (2007) y polinómico de cuarto grado. Las muestras de batata fueron adecuadas en forma de láminas cuadradas con 3.5 cm de lado y espesores de 1.5 y 2.5 mm, las cuales fueron sometidas a secado a temperaturas de 75, 85 y 95°C. El diseño experimental fue dirigido bajo un diseño completamente al azar con arreglo factorial 3x2 (3 temperaturas y 2 espesores) con tres repeticiones. El contenido de humedad de las muestras fue determinado por el método AOAC 931.04/2012, el encogimiento fue estimado mediante la medición de los lados y el espesor de las láminas, la densidad aparente fue determinada por la medición de la pérdida de peso y reducción del volumen aparente de las muestras durante el proceso y la porosidad fue determinada por medio del modelo empleado por Dissa et al. (2010). Con los resultados obtenidos se construyeron las curvas de secado, en las que se evidencia que este proceso tuvo lugar en el periodo decreciente, el mostró que la difusión es el mecanismo que gobierna el secado de *Ipomoea batatas* (L.). La difusividad efectiva de la humedad presentó valores entre 8.67×10^{-5} y $52.8 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, la energía de activación tuvo valores de 34.78 y 21.23 $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, para los espesores de 1.5 y 2.5 mm, de manera correspondiente; el coeficiente convectivo para la transferencia de humedad mostró una tendencia lineal en relación a la temperatura, con valores entre 1.23×10^{-6} y $3.52 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. El encogimiento, densidad aparente y porosidad fueron afectados por la temperatura significativamente, sin embargo, solo el espesor

afectó el encogimiento de las láminas. El encogimiento disminuyó con el aumento de la temperatura e incrementó con el aumento del espesor de las láminas, registrándose valores de encogimiento promedio de hasta 47.48%. Por su parte, la densidad aparente se redujo durante el secado, mostrando valores finales entre 516 y 860.6 kg.m⁻³, el modelo polinómico de cuarto grado se ajustó adecuadamente a los datos de esta propiedad arrojando valores de coeficientes $R^2 > 0.9$. La porosidad aumentó durante la deshidratación de las láminas de batata, arrojando valores al final del proceso de hasta 66.9% y el comportamiento, en función de la razón de humedad, fue descrito adecuadamente por el modelo polinómico de cuarto orden.

Palabras clave: Ventana refractiva, batata, secado, encogimiento, ley de Fick.

ABSTRACT

The evaluation of the effect of temperature and thickness on the kinetics of drying and physical properties (shrinkage, apparent density and porosity) in sheets of White Sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) subjected to drying by Refractive Window has been studied with the purpose of determine the kinetic parameters by applying first-order kinetics for the influence of temperature, Fick's second Law for moisture transfer, and the behavior of its physical properties through the linear models of Ochoa et al. (2007) and fourth degree polynomial. The sweet potato samples were suitable in the form of square sheets with 3.5 cm on each side and thicknesses of 1.5 and 2.5 mm, which were subjected to drying at temperatures of 75, 85 and 95°C. The experimental design was conducted under a completely randomized design with a 3x2 factorial arrangement (3 temperatures and 2 thicknesses) with three repetitions. The moisture content of the samples was determined by the AOAC 931.04 /2012 method, the shrinkage was estimated by measuring the sides and thickness of the sheets, the apparent density was determined by measuring of weight loss and reduction of apparent volume of samples during the process and porosity was determined by the model employed by Dissa et al. (2010). With the results obtained, the drying curves were built, in which it is evident that this process took place in the decreasing period, which shows that diffusion is the mechanism that governs the drying of *Ipomoea batatas* (L.). The effective diffusivity of moisture presented values between 8.67×10^{-5} and $52.8 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, the activation energy had values of 34.78.25 and 21.23 $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, for the thicknesses of 1.5 y 2.5 mm, in a corresponding manner; the effective coefficient for moisture transfer showed a linear trend in relation at temperature, with values between 1.23×10^{-6} and $3.52 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Shrinkage, bulk density and porosity were significantly affected by temperature; however, only thickness affected sheet shrinkage. The shrinkage increased with increasing temperature and thickness, registering average shrinkage

values of up to 47.48%. For its part, the apparent density was reduced during drying; showing final values between 516 and 860.6 kg .m³, the fourth degree polynomial model was properly adjusted to the data of this property, yielding values of coefficients $R^2 > 0.9$. The porosity increased during the dehydration of the sweet potato sheets, yielding values at the end of the process of up to 66.9% and the behavior, depending on the moisture ratio, was adequately described by the fourth order polynomial model.

Keywords: Refractive window, sweet potato, drying, shrinkage, Fick's law.

INTRODUCCIÓN

La batata (*Ipomoea batatas* L.) es una planta dicotiledónea perteneciente a la familia *Convolvulaceae* y está clasificada dentro del género *Ipomoea*, el cual abarca más de 400 especies (Lebot 2009; Atu 2013; Jiang et al. 2019). Es una planta herbácea de tallos rastreros y raíces ramificadas (Lebot 2009). Posee diversos hábitos de crecimiento como lineal, semi-lineal, extendido y muy extendido. La morfología de sus raíces se puede categorizar en: fibrosas, gruesas y reservantes, las cuales le permiten absorber nutrientes y llevar a cabo reacciones bioquímicas importantes para su desarrollo (Wilson y Lowe 1973, citado por Atu 2013; Huamán 1992; Noh et al. 2010).

La batata es cultivada en 111 países y se le ha catalogado como uno de los cinco cultivos esenciales en los países en desarrollo (Flórez et al. 2016; FAOSTAT 2018). En 2018, se produjeron a nivel mundial cerca de 91.945.358 toneladas métricas de este alimento, siendo China el mayor productor con 57.99% de la producción global, seguido de manera minoritaria por Malawi, Nigeria, Tanzania, Etiopia, Indonesia, Uganda, India, Vietnam, Angola, USA, Madagascar y Ruanda; los cuales tienen un porcentaje menor al 6.2% pero mayor al 1% en orden decreciente, en lo que respecta mundialmente a la producción de este alimento (FAOSTAT 2018). En ese mismo año, América Latina produjo aproximadamente 3.12 millones de toneladas métricas, en donde Brasil, Haití, Cuba, Argentina y Perú fueron los países de mayor representatividad (FAOSTAT 2018). En Colombia para el año 2018, se registraron alrededor de 2760 toneladas métricas de batata y de estas Córdoba fue el mayor productor con un 58.45% de la producción nacional, seguido de Magdalena (18%), Sucre (12.66%), Nariño (9.90%) y en menor proporción San Andrés y Providencia (0.99%) (Agronet 2018). Según Flórez et al. (2016), a nivel nacional esta raíz es una alternativa para la

alimentación humana, y a su vez para las industrias procesadoras de alimentos concentrados para animales y las de obtención de biocombustibles.

La batata es estacionaria y altamente perecedera debido a la humedad elevada de esta, al mismo tiempo su almacenamiento y conservación después de la cosecha se ve afectado por daños superficiales a nivel de pulpa y piel causados por prácticas industriales inadecuadas como el daño por frío, recolección manual no tecnificada, brotación de las raíces, daños mecánicos por abrasión, y al igual que ataques por agentes fitosanitarios como hongos y gorgojos, lo cual causa efectos adversos como ennegrecimiento de la pulpa, daños internos, y deshidratación de la raíces (Hong et al. 2009; Doymaz 2011; Cosme 2013; Freitas 2018; Li et al. 2018; Zaccari et al. 2018; Sugri et al. 2019; CIP 2020). Por tales razones, se presentan pérdidas postcosecha de este tubérculo durante su almacenamiento. Esto acarrea que este alimento pierda valor agregado y no se aproveche en otros productos alimenticios, lo cual dificulta su disponibilidad en el mercado en gran parte del año. De este modo, ¿Será posible obtener los parámetros cinéticos de secado y determinar las propiedades físicas de las láminas de batata empleando el secado por Ventana Refractiva™?

Desde 2012 se ha observado un crecimiento en la producción de batata a nivel mundial debido a la demanda de alimentos saludables y nutricionales que favorezcan a llevar una vida sana y que ayuden a disminuir los índices de inseguridad alimentaria en el mundo (FAOSTAT 2018; Mu y Singh 2019). La batata es una raíz con alto potencial calórico mayor al de la papa, zanahoria, calabaza e inclusive al de la remolacha (Negera et al. 2017; CIP 2020). Este alimento es una excelente fuente de carbohidratos como el almidón y azúcares totales, a su vez aporta fibra, proteínas, vitaminas y minerales; también contiene sustancias bioactivas como carotenoides, flavonoides, antocianinas (Wang et al. 2016; Vidal et al. 2018; Caetano et al. 2018; CIP 2020).

Tales características, ayudan a prevenir la formación de radicales libres, regular el nivel de glucosa en sangre, actuar como agente anti-anémico, anti-inflamatorio, anti-bacteriano, anti-obesidad; combatiendo así el riesgo de padecer enfermedades como el cáncer, diabetes, obesidad, envejecimiento prematuro y problemas de mal nutrición (inseguridad alimentaria) (Wang et al. 2016; Vidal et al. 2018).

Este alimento puede ser consumido de distintas maneras ya sea en frituras, chips deshidratados, hojuelas, enlatado, curado y congelado (Hall y Phatak 1993; Taiwo y Baik 2007; Ramos et al. 2014; Tang et al. 2015; Flórez et al. 2016; Mu et al. 2017; Hou et al. 2019; Rodriguez et al. 2019). Estas alternativas solucionan los problemas de perecibilidad y le aportan valor agregado a esta materia prima. De manera simultanea, también contribuyen a la incursión de este alimento al mercado en distintas variedades de productos.

A nivel agroindustrial el secado es uno de los procesos que se utiliza para el aprovechamiento y preservación de raíces y tubérculos. Mediante este proceso la batata es deshidratada con miras a usos alimentarios o industriales (Diamante y Munro 1991,1993; Silayo et al. 2003; Singh et al. 2006; Falade 2010; Meng et al. 2011; Singh y Pandey 2012; Zhu y Jiang 2014; Sagar y Subba 2018; Souza et al. 2019; Hariadi et al. 2020). Sin embargo, cuando las frutas y vegetales son sometidos a esta operación se presentan cambios fisicoquímicos, biológicos y bioquímicos en los mismos, lo que acarrea que la calidad de los productos deshidratados se vea reducida y además generación de altos costos energéticos en el proceso. Por lo tanto, los industriales y la ciencia han buscado crear nuevas tecnologías más eficientes con el propósito de optimizar dichos costes y mejorar la calidad de los productos terminados (Vega et al. 2001; Moses et al. 2014).

La Ventana Refractiva es una de las nuevas tecnologías emergentes de secado que se han desarrollado con el fin de obtener productos alimenticios inocuos y de mayor calidad nutritiva. Este es un novedoso método de secado que emplea temperaturas cercanas al punto de ebullición del agua y tiempos cortos de secado, lo que permite reducir los tiempos de producción y así aumentar la retención de nutrientes y disminuir de los efectos negativos en las características del producto final (Abonyi 1999; Moses et al. 2014; Sabarez 2016; Akinola y Azeorah 2017; Baeghbali y Niakousari 2018). Además, este método es económico en comparación con los secadores de aire convectivo (Cárdenas y Ayala 2016). Esta tecnología se ha aplicado en la deshidratación de alimentos líquidos, semilíquidos y sólidos tales como jugos, pulpa de frutas, ahuyama, garbanzos, rodajas de yuca, ñame y papa (Leiton 2012; Ortiz 2014; Zotarelli et al. 2015; Hernández 2017; Akinola y Azeorah 2017, 2018).

Se espera con esta investigación obtener un producto con valor agregado que beneficiará a los consumidores, debido a que este será un producto con gran presencia, saludable y de mayor vida útil. Por lo tanto, se podrá tenerlo durante todas las épocas del año en el mercado como producto deshidratado (chips deshidratados). Para los agricultores se convertirá en una mayor fuente de ingresos al ser un producto de gran interés, el cual será apetecido por el público por sus ricas propiedades para la salud y adicionalmente contribuirá a la disminución de las pérdidas postcosecha en bodegas y problemas fitosanitarios, lo cual se traduce en una mejora económica.

Finalmente, el objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la temperatura y el espesor de las muestras sobre la cinética de secado y propiedades físicas (encogimiento, densidad aparente y porosidad) de la batata blanca (*Ipomoea batatas* L.) en el secado por Ventana Refractiva™ para la determinación de los parámetros cinéticos mediante la aplicación el modelo de la solución

analítica de la segunda ley de Fick para la transferencia de humedad no estacionaria unidimensional en lámina infinita, y el comportamiento de las propiedades físicas.

CAPÍTULO 1. REVISIÓN DE LA LITERATURA

1.1. GENERALIDADES DE LA BATATA.

1.1.1. Descripción y origen

La batata es una planta perteneciente a la familia *Convolvulaceae* o “gloria de la mañana”, la cual abarca más de 1000 especies (Tindall 1983; Yamaguchi 1983a; Woolfe 1992, citado por Atu (2013); Torquato 2017). Es un cultivo de gran importancia económica en los alimentos (Zhang y Li 2004). A nivel mundial ocupa el octavo lugar en la lista de cultivos alimenticios de mayor interés después del trigo, arroz, papa, tomate, maíz, yuca y bananas (CIP 2020), y a su vez se muestra como la segunda raíz tropical de mayor relevancia en el área de producción (Morales 2017). Es conocida como boniato, papa dulce, kumara, camote, batata doce, apichu, entre otros nombres (Huamán 1992; SAC 2011). Esta crece hasta los 2500 m de altitud, y entre latitudes de 40°N y 32°S en climas tropicales y subtropicales; soporta condiciones climáticas adversas tales como sequías, suelos áridos, altas temperaturas, lluvias severas; su costo de tecnología agrícola es relativamente bajo en comparación a otros cultivares, y necesita poco uso de agentes químicos para su cosecha, lo que lo convierte en un cultivo benéfico para el medio ambiente (Tindall 1983; Lebot 2009; Nedunchezhiyan 2012; Atu 2013; Zaccari et al. 2018; CIP 2020).

Según investigaciones el origen de esta raíz estaría en las zonas tropicales y subtropicales de américa del sur y de la polinesia (Tindall 1983; Yamaguchi 1983b). Sin embargo, se han hallado restos de cultivos fósiles de esta raíz en cuevas en el cañón del Chilca en Perú de hace más de 8000ac, mucho antes del inicio de la agricultura en la Polinesia (Engel 1970; León 1976). Por su parte, Austin (1978) señala que la batata sería originaria de la zona entre la península de Yucatán en México y la desembocadura del río Orinoco en Venezuela. Un reciente estudio realizado por

Rodríguez et al. (2018) descarta por completo su origen en la Polinesia, debido a que la batata llegó a ésta por dispersión a larga distancia en tiempos pre-humanos.

1.1.2. Características nutricionales

Las raíces de la batata poseen un alto contenido de humedad en base húmeda que varía de 50 al 80% y es una alta fuente de carbohidratos (4 al 15%) (Li et al. 1994; Caetano et al. 2018). El resto de sus componentes son proteínas, lípidos, fibra dietaria, cenizas, vitaminas A, C, B, E y minerales como el hierro, fósforo y calcio (Wang et al. 2016; Caetano et al. 2018; Mu et al. 2019). Del total de la materia seca de este alimento el almidón es el mayor constituyente con un valor estimado de 50 a 80% (Zhu et al. 2011; Zhu 2014). El contenido de amilosa y de amilopectina en el almidón fluctúa en un rango de 15.3 a 28.8% y de 73.17 a 86.67%, de manera respectiva (Chen 2003; Namutebi et al. (2003); Kitahara et al. (2005); Zaidul et al. (2007); Aina et al. (2009); Noranizan 2010; Ahmed et al. 2010; Zhu et al. (2011); Abegunde et al. 2013). En un estudio realizado por Gou et al. (2019) en batatas de pulpa blanca, anaranjada y morada, con 3 tipos distintos de variedades por cada una de ellas, mostró que la batata blanca tenía un contenido de almidón de 61.5 a 67.5%, el cual fue más alto en comparación con los demás tipos de batatas. La batata tiene un contenido proteico entre un 1.73 a 9.14% en base seca. Se ha estimado que el número aminoácidos en las proteínas de la batata es de 18; de estos solo 8 son esenciales (lisina, leucina, isoleucina, metionina, valina, tripsina, fenilalanina, triptófano) (Mu et al. 2017). El contenido de fibra dietaria este alrededor de un 49.7%, de este porcentaje la pectina constituye el 39.5% y el resto es celulosa, hemicelulosa, y lignina (Takamine et al. 2000). Por otra parte, los lípidos de la batata varían de acuerdo al tipo de cultivar y generalmente se hallan en un rango de 0.72-1.44%, de los cuales son en su mayoría lípidos neutros (36.74-61.04%), seguido de glicolípidos (30.29-49.25%) y fosfolípidos (7.05-17.07%) (Mu y Singh 2019).

1.1.3. Procesamiento y usos

La batata es aprovechada para consumo humano en productos alimenticios como fideos, chips, dulces, frituras, bebidas alcohólicas, postres, harinas, panes, galletas, purés y algunos jarabes azucarados (Liu 2004; Zhao et al. 2009; Mu et al. 2017; Kitahara et al. 2017; Caetano et al. 2018; CIP 2020). En el ámbito industrial es utilizada en la obtención de almidón (Akoetey et al. 2017), plásticos biodegradables (Ganguli et al. 2003; Liu et al. 2015), pectina (CIP 2020), bioetanol como combustible (Liu 2004; Jusuf y Ginting 2014; Widodo et al. 2015; Kitahara et al. 2017; Torquato et al. 2017) y también se ha usado como emulsificante natural y agente retenedor de agua (Mu et al. 2017). Por su parte, las hojas y tallos son empleados como productos forrajeros para la alimentación de cerdos, ganado lechero, conejos, cuyes y en pollos de engorde tipo broiler (CIP 1988; Régnier et al. 2013; Beckford 2015; Akoetey et al. 2017).

A nivel agroindustrial se utilizan varios procesos para lograr el aprovechamiento y preservación de la batata. El secado es uno de estos procesos, por el cual las raíces de batata pueden ser deshidratadas para su posterior conservación en el tiempo con miras a usos alimentarios o industriales (Diamante y Munro 1991,1993; Silayo et al. 2003; Falade 2010; Meng et al. 2011; Singh y Pandey 2012; Zhu y Jiang 2014; Sagar y Subba 2018; Souza et al. 2019; Hariadi et al. 2020).

1.2. SECADO.

El secado o deshidratación es una operación unitaria de gran interés y de orígenes ancestrales que se basa en la separación de pequeñas cantidades de agua u otro líquido de un material sólido, semi-sólido o líquido por evaporación del mismo mediante la aplicación de calor, con el objetivo de

disminuir la humedad residual del producto hasta niveles aceptables (5 al 10%), prolongando así la vida útil del mismo (Vega et al. 2001; McCabe et al 2007; Sabarez 2012,2014; Kumar et al. 2015; Zhang et al. 2017; Collazo et al. 2018). Es un proceso en el cuál ocurre simultáneamente transferencia de masa, energía y momentum (Brennan 2006; Mujumdar 2007; Albright 2009; Moses et al. 2014; Zhang et al. 2017). Esta operación es ampliamente aplicacada en la conservación de bioproductos en las zonas agricultoras, debido a sus multiples beneficios tales como disminución del volumen y peso durante el almacenamiento y el transporte de los alimentos, contribuyendo de esta manera a la minimización de costos (Sagar y Suresh 2010; Ramirez 2012; Satyanarayan y Vijaya 2012; Moses et al. 2014; Collazo et al. 2018). Este proceso le confiere a los productos frutales y hortalizas valor agregado, ya que se logrará disminuir las pérdidas postcosecha en campo y aprovechar muchos productos agricolas para su posterior transformación o conservación (Pereira 2012). Otros beneficios adicionales que se obtienen cuando se realiza un secado son la disminución de la actividad microbiana y producción de reacciones bioquímicas y enzimáticas debido a la baja actividad de agua de los productos terminados, mejorando así la inocuidad y calidad final de los mismos (Geankoplis 1998; Brennan 2006; Horta et al. 2011; Ahmed et al. 2013; Kumar et al. 2015).

Sin embargo, el secado es una operación que modifica las propiedades fisicoquímicas y biológicas de los alimentos, ya que estos son sometidos a altas temperaturas y periodos largos de proceso que pueden causar daños en sus estructuras, lo que acarrea reducción de la calidad nutricional y organoléptica en el producto final (Geankoplis 1998; Foust et al. 2006; Pereira 2012). Además, es una operación que genera costes energéticos elevados, debido a esto los industriales y la ciencia han buscado crear nuevas tecnologías más económicas y eficientes con el propósito de optimizar estos costes y mejorar la calidad de los productos terminados (Vega et al. 2001; Moses et al. 2014).

1.2.1. Tipos de secado

1.2.1.1. Secado natural

El secado natural o al sol se da mediante el aprovechamiento del viento y de la energía solar, los cuales se emplean en la deshidratación de muchos productos tales como los cereales, tubérculos, leguminosas, frutas, carnes, maderas, ropa, papel entre otros (Silayo et al. 2003). Este secado suele realizarse al aire libre en patios, techos de paja o de hierro corrugado, en carpas, bandejas y en plataformas de cemento (Silayo et al. 2003; Ahmed et al. 2013; Torregrosa 2013; Kumar et al. 2015; Collazo et al. 2018). Este es un método de secado rentable y ecológico debido a que este utiliza fuentes de energía ambientales y no eléctricas ni fósiles (Collazo et al. 2018). Sin embargo, aunque es ampliamente utilizado en muchos países, este acarrea ciertas desventajas en cuanto a la calidad e inocuidad de los productos terminados, ya que estos son sometidos a tiempos largos de procesamiento, los cuales pueden tardar días o semanas y por ende esto repercute en la vulnerabilidad de los alimentos a la contaminación fitosanitaria y microbiana (Sagar y Suresh 2010; Komolafe et al. 2019). Este tipo de secado se ha usado en la deshidratación de batata para su preservación o posterior transformación en chips deshidratados (Silayo et al. 2003). Durante este secado las raíces de este alimento suelen someterse a largos tiempos de procesamiento (aproximadamente 56 h).

1.2.1.2. Secado artificial

El secado artificial es el más desarrollado e importante a nivel industrial en alimentos. Vega et al. (2001) desarrollaron una categorización de los tipos de secadores artificiales en cuatro generaciones. La primera generación incluye una gran gama de equipos como los secadores rotatorios, de túneles, bandejas, los cuales utilizan como medio de calefacción el aire o otro tipo de gas caliente, interactuando directamente con la superficie del producto. En una investigación llevada a cabo por

Meng et al. (2011), se investigaron las características del secado y modelamiento matemático de rodajas de batata secadas con aire caliente a diferentes condiciones de temperatura (60, 70 y 80°C), velocidades de aire (0.8, 1.2 y 1.6 m.s⁻¹) y espesores de muestra (0.6, 0.9 y 1.2 cm). Los resultados mostraron que los modelos matemáticos semi-empíricos de Wang y Singh arrojaron mejores valores de ajuste en comparación con los demás modelos, con R² de 0.998, chí-cuadrado de 0.000168 y RMSE de 0.0117. Además, la difusividad efectiva de la humedad aumento con el incremento de las diferentes condiciones de proceso y de muestra, y la energia de activación fue de 40.103 kJ.mol⁻¹.

En la segunda generación se destacan los secadores de aspersión (spray) ideados para líquidos y purés, así también el secador de lecho fluidizado para procesados de granos y los secadores de rodillo para la obtención de almidón de maiz (Vallous et al. 2002). Un estudio hecho por Rodrigues et al. (2020) evaluó los efectos del precalentamiento y el secado por aspersión sobre las características físicoquímicas, estructurales y térmicas del almidón de batata. Inicialmente, los gránulos de almidón se hincharon con el aumento de la temperatura de precalentamiento, pero, después que estos fueron enfriados el diámetro de los mismos disminuyo. El almidón precalentado mediante el secado por aspersioón a 69°C registró un cambio de entalpía muy reducido (80%) y una cristalinidad relativa. De acuerdo a esta investigación la mejor temperatura de precalentado fue a 67°C, bajo esta condición el almidón se puede usar en productos de mayor viscosidad que necesiten un espesor más grande y con mayor rendimiento de proceso (65%).

Dentro de la tercera generación se encuentran el secado por deshidratación osmótica y los liofilizadores, los cuales logran una mayor retención de la calidad estructural y nutricional de los productos terminados (Trivedi et al. 2017). En una investigación realizada por Clifford et al.

(2014), se evaluó el efecto de la deshidratación osmótica como pre-tratamiento en el secado al horno de batata amarilla sobre el contenido de β -carotenos. En este estudio se utilizó sal como agente ósmotico a diferentes concentraciones (10, 15, 20 y 25 %m/v) y tiempos de inmersión (20, 40, 60, 80 y 100 minutos), las muestras fueron adecuadas en espesores de 2, 3 y 4 mm y secadas a una temperatura de 60°C. Los resultados arrojaron valores de difusividad efectiva entre $3.648 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ a $1.459 \times 10^{-6} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ y las pérdidas de β -carotenos estuvieron en el rango de 47 a 87%. La deshidratación ósmotica no tuvo efecto significativo sobre la retención de β -carotenos, no obstante, el secado al horno degradó a los mismos. Además, la cantidad de agua removida por el pre-tratamiento aumentó de forma significativa cuando la concentración y el tiempo de inmersión aumentaron.

En la cuarta generación aparecen las llamadas tecnologías emergentes y en las cuales se hallan el pulso eléctrico, campo magnético, microondas, radiofrecuencia, ultrasonido, alto vacío y la Ventana Refractiva™ (Moses et al. 2014).

1.2.2. Secado por Ventana Refractiva

El secado por Ventana Refractiva es un método de secado creado por MCD Technologies, Inc. (Tacoma, Washington, DC) y patentado por Magoon (1986). Esta tecnología emplea la energía térmica del agua para remover la humedad de los alimentos, temperaturas bajas (menores a 70°C) y cercanas al punto de ebullición del agua, tiempos de residencia muy cortos y opera a presión atmosférica (Abonyi 1999; Nindo et al 2004; Nindo et al. 2007; Mejía 2011; Morales y Vélez 2014; Trivedi et al. 2017; Baeghbali y Niakousari 2018). El sistema de Ventana Refractiva usa una película o lámina plástica (Mylar®) de poco espesor (aproximadamente 0.2 mm) sobre la cual son puestos los alimentos a deshidratar, esta es colocada sobre la superficie del agua y es transparente

para permitir el paso de la energía térmica del agua caliente (infrarroja) hacia el producto húmedo (Nindo et al. 2007; Mejía 2011; Morales y Vélez 2014; Baeghbali y Niakousari 2018). La diminuta película favorece a que se alcance el equilibrio térmico entre el agua y el producto húmedo de manera instantánea, y a su vez permite que se alcancen velocidades altas de evaporación de agua (Nindo et al. 2007; Morales y Vélez 2014). Según la literatura científica en este secado coexisten los tres tipos de transferencia de energía en forma de calor (Clarke 2004; Moses et al. 2014; Ortiz 2014), sin embargo, un reciente estudio realizado por Ortiz et al. (2015) desarrolló un modelo de transferencia de masa y calor conjugado para simular el secado de rodajas de ahuyama por Ventana Refractiva, el cual indicó que la mayor cantidad de la energía térmica es transferida mediante el mecanismo de conducción (99%) a través de la película plástica.

Este sistema de secado ofrece varias ventajas tales como bajo consumo energético en comparación a los métodos tradicionales de secado convectivo, es una tecnología barata, fácil de manejar, sostener y amigable con el medio ambiente por su baja emisión de CO₂ (Abonyi et al. 1991; Morales y Vélez 2014; Baeghbali et al. 2016; Baeghbali y Niakousari 2018). En cuanto a eficiencia energética es 3 y 40 veces mayor al secado por aspersión y liofilización, de manera respectiva (Bernaert et al. 2019). Además, este secado es una alternativa de preservación de la calidad de los productos finales por su alta retención de nutrientes (Morales y Vélez 2014). Por otro lado, este equipo evita la contaminación cruzada debido a que la película actúa como una barrera de separación entre el agua caliente y el producto húmedo (Moses et al. 2014; Baeghbali y Niakousari 2018; Bernaert et al. 2019). Sin embargo, esta tecnología muestra desventajas como baja capacidad de proceso y el manejo de productos en polvo con alto contenido de azúcar (Moses et al. 2014).

1.2.2.1. Modo de operación del equipo de Ventana Refractiva

El equipo de Ventana Refractiva™ puede operar en lotes o en continuo, dependiendo de las condiciones de trabajo. La operación por lotes como se muestra en la Figura (1), se ha implementado a escala de laboratorio en diferentes estudios (Ochoa et al. 2012; Ortiz 2014; Akinola y Ezeorah 2017) mediante el uso de un baño termostato hecho en acero inoxidable (6), el cual posee un sistema integrado de regulación de temperatura (1). El baño se llena con agua del grifo y esta es calentada a través de resistencias eléctricas que permite alcanzar la temperatura de trabajo (5). La película delgada (3) se coloca sobre la superficie del agua y esta es asegurada con cintas de doble faz (2) para garantizar el acoplamiento al baño. La materia prima a secar (4) se dispone de manera cuidadosa y ordenada sobre la película y en cualquier tipo de geometría.

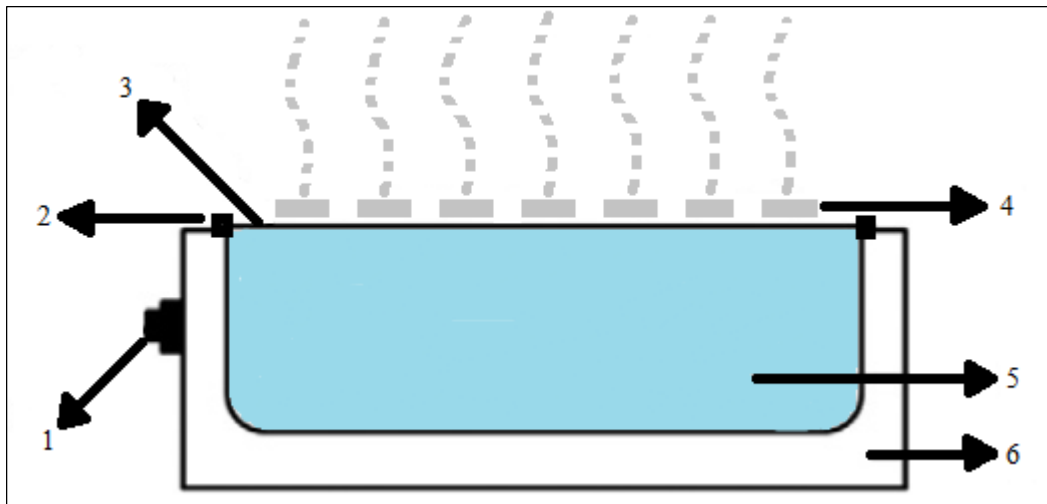


Figura 1. G

Por otra parte, la operación en continuo emplea un sistema de recirculación de agua caliente a presión atmosférica para regular la temperatura de proceso (Ortiz 2014). El producto húmedo es colocado sobre una cinta transportadora de plástico transparente, la cual se mueve a velocidades lentas durante la deshidratación (ver Figura 2) (Abonyi et al. 1991). Un sistema de escape de aire

elimina el vapor de agua formado por la evaporación de la humedad del producto (Bernaert et al. 2019). Cuando el producto es deshidratado, este se separa al final de la cinta mediante un dispositivo de separación (raspador) (Bernaert et al. 2019). Al igual que en el sistema por lotes, la energía térmica del agua caliente es transferida a través de la cinta plástica (película) hacia el producto húmedo.

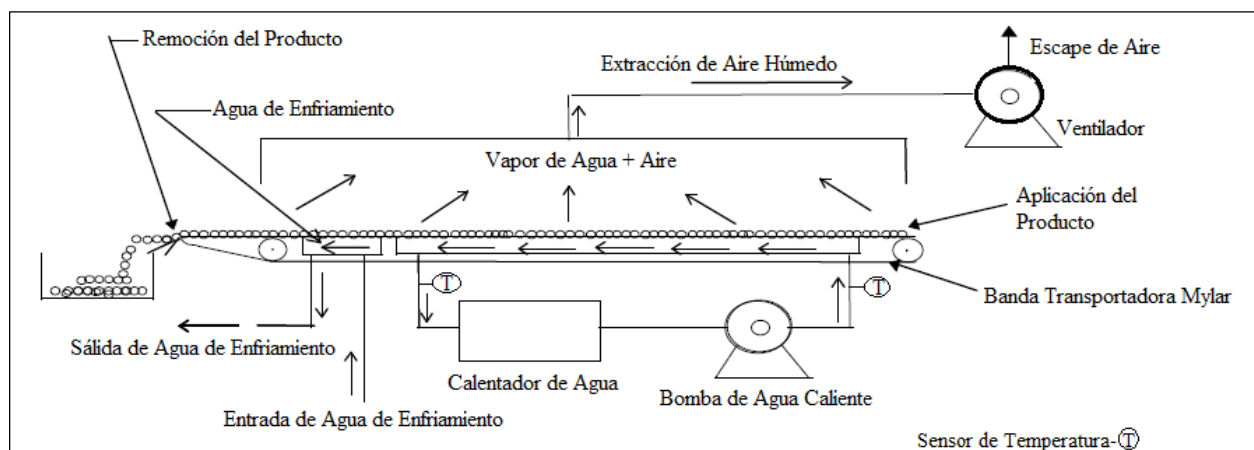


Figura 2. Esquema del Sistema Continuo (Convencional) de la Ventana Refractiva™ (Tomado de Abonyi et al. 1991).

1.2.2.2. Aplicación del secado por Ventana Refractiva en alimentos

Este método se ha empleado en el secado de frutas como fresa, guayaba, papaya, piña, mango, granada, manzana (Abonyi et al. 1991; Leiton 2012; Ocoro y Ayala 2012; Leiva 2012; Zotarrelly et al. 2015; Baeghbali et al. 2016; Rajoriya et al. 2019), en algunas hierbas comerciales como aloe vera y mentol (Mejía 2011; Hashem et al. 2019). En vegetales y tubérculos tales como espárragos, yuca, ñame y papa (Nindo et al. 2003; Akinola y Azeorah 2018).

En un estudio realizado por Akinola et al. (2017), se investigó el efecto del espesor de rodajas sobre la deshidratación y características de hidratación en ñame (*Dioscorea rotundata*) usando un secador

de Ventana Refractiva, con una temperatura de 80°C. Los resultados mostraron que el tiempo de secado disminuyó velozmente a medida que el espesor decreció. Los tiempos de secado fueron 40, 80 y 120 minutos para espesores de 1.5, 3, y 4.5 mm, de manera correspondiente. Además, el contenido de humedad final estuvo por debajo del 10% en base seca.

Además, Zotarelli et al (2015) estudiaron el efecto de las variables de proceso sobre la velocidad de secado de pulpa de mango por Ventana Refractiva, con temperaturas de 75, 85 y 95°C y espesores de muestra de 2, 3 y 5 mm. Los resultados mostraron que a medida que se aumenta la temperatura esto provoca mayores velocidades de secado. De igual manera, con la disminución del espesor de las muestras también se presenta resultados parecidos, mostrando que estos factores ejercen efectos significativos sobre la velocidad de secado. Adicionalmente, la más alta capacidad de evaporación de la Ventana Refractiva fue de $10 \text{ kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$, para un espesor de 2 mm a 95°C.

Akinola y Azeorah (2018) realizaron el secado en Ventana Refractiva para rodajas de yuca, ñame y papa, estas rodajas fueron establecidas de 3 mm de espesor y expuestas a una temperatura de 60°C, obteniendo tiempos de secado para la yuca y ñame de 100 minutos aproximadamente y para las rodajas de papa un tiempo de secado de alrededor de 150 minutos, aproximadamente. El método de Ventana Refractiva utilizado para el secado de ñame en láminas cuadradas de 2.5 mm de lado y de espesores entre 1.5 y 4.5 mm, a temperaturas entre 65 y 95°C, obtuvo tiempos de secado alrededor de los 60 minutos hasta los 40 minutos aproximadamente (Akinola y Azeorah 2019).

Por su parte, Akinola et al. (2018b) estimaron la difusividad efectiva de la humedad y la energía de activación en rodajas de pepino usando un secado de Ventana Refractiva por lote, a temperaturas

de 65, 75 y 85°C. La difusividad arrojó valores en el rango de 1.94 a 2.54×10^{-9} y la energía de activación fue de $13.55 \text{ kJ.mol}^{-1}$.

1.2.3. Terminología y definiciones fundamentales

1.2.3.1. Cinética y curvas de secado

La cinética de secado se ha utilizado para describir en conjunto los fenómenos de transporte de materia en estado dinámico a escala molecular y macromolecular, y dependiendo de las condiciones de proceso, propiedades fisicoquímicas del alimento y el tipo de equipo de secado, ésta se verá afectada (Salehi 2018). La cinética de secado muestra la variación de la pérdida del contenido de humedad de un alimento durante el secado (Omolola et al. 2015). En los productos alimenticios el estudio de las cinéticas de secado de estos, se lleva a cabo mediante la construcción de curvas de secado. Estas curvas principalmente tienen como objetivo determinar los tiempos de secado de cualquier producto (Geankoplis 1998; Zhang et al. 2017). Las curvas de secado son obtenidas bajo condiciones constantes de operación a partir de datos experimentales de pérdida del contenido de humedad en base seca en función del tiempo (Treybal 1980; Perry y Green 1997; Shafiur 2007; Albright 2007; Omolola et al. 2015).

Inicialmente, los datos obtenidos durante los experimentos de secado por lotes están expresados en base húmeda (kg de sólido por kg totales) en función del tiempo. Estos valores se convierten a base seca (kg de agua por kg de sólido seco) mediante la ecuación (1.1), para esto se hace uso del peso total ($M_{(t)}$) y la masa seca (M_{seca}) del producto húmedo. La masa seca o contenido de sólidos en el producto se logra calcular de acuerdo a la ecuación (1.2) (Zhang et al. 2017):

$$\bar{W}_{(t)} = \frac{M_{(t)} - M_{seca}}{M_{seca}} \quad (1.1)$$

$$M_{seca} = M_{pi} (1 - X_i) \quad (1.2)$$

Donde $W_{(t)}$ es el contenido de humedad promedio expresado en base seca en un tiempo dado, M_{pi} es el peso inicial del producto y X_i es el contenido humedad inicial del producto en base húmeda. Por otra parte, la razón o velocidad de secado (N) es la relación entre el peso seco (W_{seco}) y el área de secado (A) por una variación del contenido de humedad en base seca del producto:

$$N = -\frac{W_{seco}}{A} \frac{dW}{dt} \quad (1.3)$$

1.2.3.2. Velocidades de secado

Durante el proceso de secado se pueden observar tres periodos o etapas en las velocidades de secado (ver Figura 3):

- I. Periodo transitorio
- II. Periodo constante
- III. Periodo decreciente o de caída (Mujumdar 2006; Shafiur 2007)

Al inicio del proceso de secado o tiempo cero (punto A) la temperatura del producto se encuentra a una temperatura inferior a la de equilibrio, y la velocidad de evaporación va aumentándose a medida que transcurre el tiempo (Geankoplis 1998; Carrin y Crapiste 2008, citado de Onwede et al. 2016). La temperatura de la superficie es calentada de manera instantánea hasta alcanzar la temperatura de equilibrio (punto B). A este momento se le denomina periodo transitorio o estado no estacionario, el cual suele arrancar en el punto A o en el A', dependiendo si el producto está caliente o frío y generalmente es un periodo relativamente corto por lo que suele despreciarse en el análisis de tiempos de secado (Geankoplis 1998; Albright 2007; Berk 2009).

Inmediatamente al periodo transitorio se da apertura al periodo de velocidad constante (B-C), también catalogado como el primer periodo de secado, el cual se caracteriza por presentar pérdida constante en el contenido de humedad (en base húmeda) en función del tiempo (Brennan 2006; Albright 2007; Berk 2009; Hernández 2017). En este periodo se da la vaporización de la humedad en la superficie del producto (humedad libre) hacia el aire circundante, formando así la película de secado o interface agua-aire (Mujumdar 2006). Durante este lapso de tiempo se produce saturación de la humedad en la superficie del producto y mientras esta se vaporiza, se genera el transporte de la misma desde el interior del producto hacia su superficie para que la película de secado mantenga este estado saturación (Brennan 2006; Hernández 2017). Este periodo es controlado por la difusión del vapor de agua en dicha película y en la superficie del producto (Shafiur 2007). Cuando el flujo de agua interna no es suficiente para mantener saturada la superficie del producto, la velocidad de secado comienza a decrecer y el estado de saturación es interrumpido (Brennan 2006; Hernández 2017). Al acontecer esto, se llega a un contenido de humedad promedio en el producto conocido como contenido de humedad crítica (X_{cr}) y después de este se da inicio al periodo decreciente (C-E) (Perry y Green 1997; Berk 2009; Erbay y Icier 2010).

Generalmente en la deshidratación de frutas y vegetales el periodo decreciente muestra dos o más sub-periodos que son propios de los materiales higroscópicos (Shafiur 2007). En el primer sub-periodo el contenido de humedad en la superficie es muy escaso y este disminuye hasta que esta superficie se seque, debido a esto la resistencia interna a la difusión de la humedad aumenta y la velocidad de secado decrece en el tiempo linealmente o en forma de cóncavas hacia arriba o abajo (C-D) (Geankoplis 1998; McCabe et al. 2007; Zhang et al. 2017). A medida que la deshidratación continua, el producto puede presentar alteraciones en su cinética de secado, con la cual se dará paso al segundo sub-periodo decreciente (D-E) (Onwude et al. 2016). En esta parte, la velocidad de

secado se hace mucho más lenta que en el primer sub-periodo y depende completamente de los mecanismos de difusión internos, fuerzas de capilaridad, propiedades del alimento (estructura interna y composición) y el gradiente local de humedad (Perry y Green 1997; Geankoplis 1998; Shafiur 2007; Zhang et al. 2017). En este último periodo el agua evaporada es transportada a través del sólido hacia el medio circundante (aire) y el secado termina cuando el producto alcanza la humedad de equilibrio (Geankoplis 1998; Berk 2009; Erbay y Icer 2010, citado de Onwude et al. 2016).

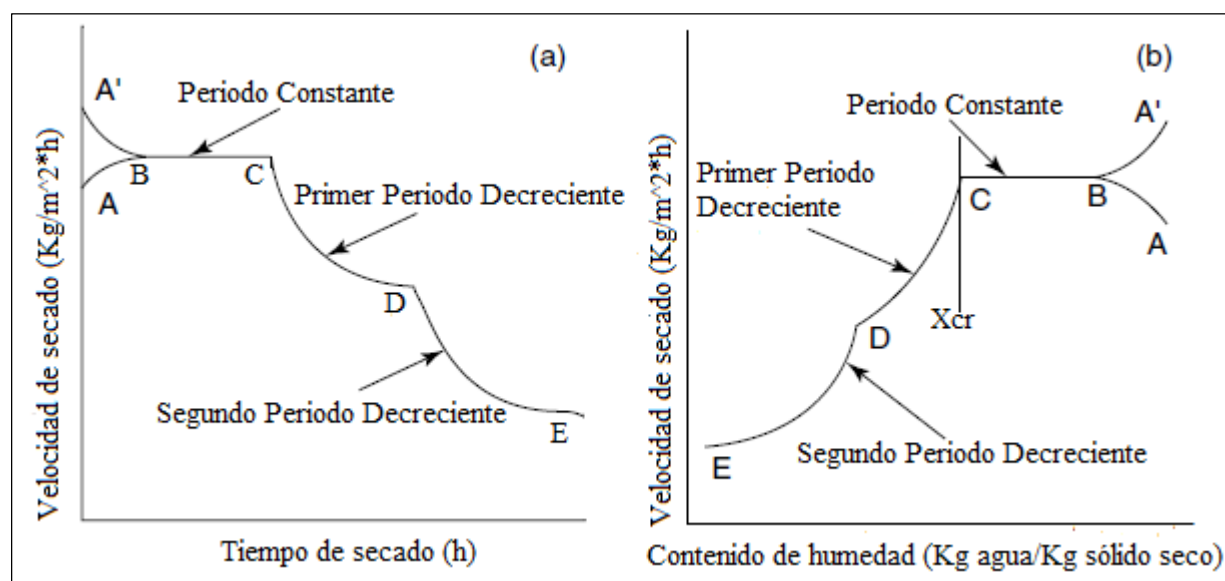


Figura 3. Curvas comunes de velocidad de secado: (a) Velocidad versus Tiempo de secado, (b) Velocidad de secado versus Contenido de humedad (Tomado de Shafiur 2007).

1.2.4. Efecto de los principales factores en la cinética de secado

Según Berk (2009) “*el conocimiento de los factores que afectan la velocidad de secado es esencial para el diseño optimo y operación de los equipos de secado*”. La cinética de secado de cualquier producto agrícola se puede ver perturbada por factores externos e internos tales como la temperatura de proceso, área de superficie de secado y espesor del producto. A continuación, se

presenta de manera resumida el efecto e importancia de estos factores sobre la cinética de secado en la deshidratación de alimentos.

1.2.4.1. Temperatura del Proceso

En el secado con aire caliente la temperatura de este influye de manera significativa en la velocidad y en los tiempos de secado, provocando que estos últimos se acorten por el incremento de esta variable (Pineda et al. 2009; Leiton 2012; Zhang et al. 2017). La temperatura del aire afecta su capacidad de arrastrar la humedad del producto (capacidad de secado), la cual es removida y transportada a través del flujo de aire hacia los alrededores (Zhang et al. 2017). De igual manera, la temperatura del producto es influenciada por la temperatura de este factor, debido a la energía transferida por convección que se produce, por lo tanto, la difusión de la humedad será afectada hasta que se alcance el equilibrio térmico (Zhang et al. 2017).

Por otra parte, la cinética de secado también se ve afectada por la temperatura de los métodos de secado alternativos como la Ventana Refractiva, la cual utiliza agua como medio calefactor. A medida que esta variable incrementa, las tasas de evaporación de agua crecen al igual que la velocidad de secado, por ende, la cinética del proceso se ve afectada (Zotarelli et al. 2015). El efecto de la temperatura de trabajo (agua) sobre la Ventana Refractiva™ ha sido evaluado en varios estudios (Leiton 2012; Zotarelli et al. 2015). Los resultados muestran que esta variable afecta significativamente a este método; cuanto mayor es su magnitud, se obtienen velocidades de deshidratación más altas y tiempos más cortos.

1.2.4.2. Área de superficie de secado del producto

Cuando se examina el área de superficie de secado de una muestra, esta suele presentar un efecto positivo en la velocidad de secado ya que, si esta crece el producto tendrá mayor capacidad de captar energía, y al mismo tiempo mayor área de contacto entre el producto y el medio circundante para que se puedan liberar las moléculas de agua de la matriz del producto, por lo tanto, se aumentará la velocidad de evaporación de agua (Zhang et al. 2017). Sin embargo, a medida que transcurre el proceso este factor disminuye a causa de la concentración de soluto y el encogimiento del producto, por lo que cual, la cinética de secado también será afectada por estos cambios (Zhang et al. 2017).

1.2.4.3. Espesor del producto

El espesor del producto es un factor que afecta la velocidad de secado ya que, según las teorías que explican los fenómenos de transferencia a medida que disminuye este factor aumenta la rapidez de los mismos. Este aumento se debe a que las distancias que recorren las moléculas de agua desde el interior hasta la superficie del producto se acortan, y también al efecto de la formación de la capa límite alrededor del mismo durante la deshidratación (Zhang et al. 2017). Adicionalmente, el aumento de la rapidez de estos fenómenos conlleva a la disminución de los tiempos de procesamiento, mejorando así la calidad del producto terminado, los rendimientos y costes de proceso (Schultz et al. 2007). Por ende, este factor es muy importante a la hora del control de calidad de los alimentos y del diseño de los equipos de proceso.

Un estudio realizado por Ocoro y Ayala (2012) evaluaron la influencia del espesor sobre el secado de puré de papaya (*Carica papaya* L) por la tecnología de Ventana Refractiva. Los resultados de esta investigación mostraron que a medida en que disminuye el espesor los tiempos de secado se

ven reducidos, y así mismo, la difusividad efectiva de la humedad. De manera similar, un estudio realizado por Hao et al. (2015) sobre la cinética de secado y evolución de la temperatura en el centro de la muestra y distribución de la humedad de rodajas de ñame (*Dioscorea alata* L.) durante el secado convectivo con aire caliente, mostró que el efecto del espesor tuvo diferencia significativa sobre la cinética y el tiempo de secado.

1.2.5. Modelo matemático de transferencia de masa para el secado por Ventana Refractiva.

Durante el periodo decreciente la transferencia de materia es dominada por la difusión del agua y/o vapor en el interior de las frutas y vegetales. Por lo tanto, para estudiar este mecanismo de transporte se utilizan soluciones analíticas de la segunda Ley de Fick para la transferencia de materia no estacionaria (Harchegani et al. 2015; Izli y Polat 2020). Estas soluciones son modelos matemáticos que tienen como prioridad determinar ciertos parámetros de relativo interés para el proceso (Ortega 2013). Unos de estos parámetros es la difusividad efectiva de la humedad, la cual representa el inverso de la relación entre la transferencia de masa por convección y difusión (Ortega 2013). Además, otro de sus propósitos es el cálculo de la energía de activación, considerada como la mínima cantidad de energía que deben contener las moléculas de agua de un producto húmedo para poder desprenderse del mismo durante la deshidratación (Ortega 2013).

Para el estudio de la difusión de la humedad en un producto Crank (1975), Erdogan (2005) y Yildiz et al. (2007), plantearon una solución analítica a la segunda ley de Fick para la transferencia de masa unidimensional no estacionaria para una lámina infinita (ecuación 1.8), la cual describe la concentración en función del tiempo en forma adimensional. Esta es obtenida por la solución matemática de la ecuación diferencial de esta ley (ecuación 1.4); teniendo en cuenta la condición inicial y las condiciones de frontera para esta misma (ecuaciones 1.5, 1.6 y 1.7). La resolución de

esta ecuación implica las siguientes hipótesis: el sólido es homogéneo e isotrópico, este está inicialmente en equilibrio térmico con los alrededores del sistema y no sufre encogimiento durante el tiempo de secado:

$$\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} = \frac{1}{D_{eff}} \frac{\partial W}{\partial t}, \quad 0 \leq x \leq L \quad \text{para } t > 0 \quad (1.4)$$

Condición inicial:

$$W(x, 0) = W_i \quad (1.5)$$

Condiciones de frontera:

$$\frac{\partial W(0, t)}{\partial x} = 0 \quad (1.6)$$

$$-D_{eff} \frac{\partial W(L, t)}{\partial x} = K_c [W(L, t) - W_i] \quad (1.7)$$

Donde D_{eff} es la difusividad efectiva de la humedad, L es el espesor de la lámina, K_c es el coeficiente convectivo de transferencia de masa en la interface producto-aire, $W(0, t)$ es el contenido de humedad (g de agua/g de sólidos) en el centro del producto en un determinado tiempo, $W(L, t)$ es el contenido de humedad (g de agua/g de sólidos) en la superficie del alimento en un determinado tiempo, W_i es el contenido de humedad (g de agua/g de sólidos) inicial en el producto y W_∞ es el contenido de humedad (g de agua/g de sólidos) en el equilibrio con el medio circundante (Erdogdu 2005; Yildiz et al. 2007; Arranz 2011).

La solución de la ecuación diferencial anteriormente descrita está representada mediante la siguiente serie infinita en términos adimensionales:

$$\frac{W(x, t) - W_\infty}{W_i - W_\infty} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \operatorname{sen}^2(\mu_n)}{\mu_n (\mu_n + \operatorname{sen}(\mu_n) \cos(\mu_n))} \exp\left(-\frac{\mu_n^2 D_{eff} t}{L^2}\right) \quad (1.8)$$

Esta ecuación es empleada para números de Fourier ($\frac{D_{eff}t}{L^2}$) mayores a 0.2. Tomando solo el primer miembro de esta ecuación y aplicando integral de volumen ($\frac{1}{V} \int_0^V W(x, t) dV$) a todo el sistema, se tiene:

$$\frac{\bar{W}(t) - W_{\infty}}{W_i - W_{\infty}} = \left(\frac{2 \operatorname{sen}^2(\mu_1)}{\mu_1 (\mu_1 + \operatorname{sen}(\mu_1) \cos(\mu_1))} \right) \cdot \exp\left(-\frac{\mu_1^2 D_{eff} t}{L^2}\right) \quad (1.9)$$

Donde $\bar{W}(t)$ es el contenido de humedad (g de agua/g de sólido) promedio del sólido para un determinado tiempo y μ_1 es la raíz positiva de la ecuación (Arranz 2011). La ecuación (1.9) también se relaciona con la pérdida de humedad adimensional o razón de humedad (MR) de la siguiente manera:

$$MR = \left(\frac{2 \operatorname{sen}^2(\mu_1)}{\mu_1 (\mu_1 + \operatorname{sen}(\mu_1) \cos(\mu_1))} \right) \cdot \exp\left(-\frac{\mu_1^2 D_{eff} t}{L^2}\right) \quad (1.10)$$

Donde:

$$MR = \frac{\bar{W}(t) - W_{\infty}}{W_i - W_{\infty}} \quad (1.11)$$

A manera experimental se obtienen datos de MR *versus* tiempo de secado (Omolola et al. 2015), los cuales se utilizan para calcular la difusividad efectiva y de forma adicional a μ_1 por ajuste de la ecuación (1.10) empleando regresión no lineal (Ortega 2013). Con el cálculo de estos parámetros también se logra determinar en forma secuencial el coeficiente convectivo de transferencia de materia (K_c), de acuerdo a la definición del número de Biot para la transferencia de masa (Bi_m) (Ortega 2013):

$$Bi_m = \mu_1 \tan(\mu_1) = \frac{K_c L}{D_{eff}} \quad (1.12)$$

Para la evaluación de la influencia de la temperatura de secado sobre la difusividad efectiva de la humedad se emplea un modelo de tendencia tipo Arrhenius:

$$D_{eff} = D_o e^{\left(\frac{-E_a}{RT}\right)} \quad (1.13)$$

Donde D_o es el factor de Arrhenius relacionado con el factor de colisión en términos de la velocidad de reacción absoluta, E_a ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$) es la energía de activación, R es la constante universal de los gases ($0.00831447 \text{ kJ}\cdot\text{kmol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) y T es la temperatura absoluta en Kelvin.

1.2.6. Efectos del secado sobre las propiedades físicas

Cuando se aplican procesos térmicos como el secado en los alimentos, se producen cambios tanto en sus propiedades químicas como físicas debido al calor aplicado y a la evaporación de la humedad en los mismos (Koç et al. 2008; Horta et al. 2011; Rahimi et al. 2013). Estos cambios o deformaciones se traducen en la reducción de su volumen (encogimiento), cambios de forma, área superficial, densidad y porosidad (Ratty 1994, citado de Llave et al. 2016). Estos cambios son de gran importancia en la calidad de los productos deshidratados ya que afectan negativamente la percepción del consumidor (Mayor y Sereno 2004; Llave et al. 2016). Además pueden influenciar en el comportamiento de los fenómenos de transferencia de masa y calor (Llave et al. 2016).

1.2.6.1. Encogimiento

El encogimiento es un fenómeno físicoquímico que ocurre a menudo en los productos alimenticios cuando estos son sometidos a procesos físicos, químicos o mecánicos tales como el secado, que conllevan al colapso de sus estructuras celulares, provocando cambios de forma y reducción en las dimensiones de los mismos (Mayor y Sereno 2004; Koç et al. 2008; Castro et al. 2018). Generalmente, en la deshidratación de frutas y vegetales el encogimiento y la deformación de estos

suelen ser los cambios más notables a nivel visual y se deben al acrecentamiento de la resistencia interna a la transferencia de la humedad (Ratti 1994; Ortiz et al. 2015; Lentzou et al. 2019). Este fenómeno es dependiente de varios factores tales como las condiciones de proceso, métodos de secado y propiedades físicas y mecánicas del alimento (Koç et al. 2008; Joardder y Karim 2019).

Cuando ocurre este tipo de cambios se hace necesario analizarlo detenidamente para poder comprenderlo de mejor manera, ya que puede afectar la calidad de los productos deshidratados y la difusión de la humedad y el calor en ellos, causando perturbación de la velocidad y la cinética de secado (Mayor y Sereno 2004; Liu et al. 2012; Saha et al. 2018; Joardder y Karim 2019).

Este factor muchas veces se desprecia en los estudios de modelamiento de las cinéticas de secado de las frutas y vegetales, no obstante, esto no es sugerible por los efectos que este puede causar sobre los fenómenos de transporte (Mayor y Sereno 2004; Hofsetz et al. 2007; Schultz et al. 2007; Liu et al. 2012; Nguyen et al. 2018; Saha et al. 2018; Joardder y Karim 2019).

A nivel macroscópico, la reducción del volumen de un producto a menudo se mide a través del coeficiente de encogimiento (S) (Koç et al. 2008; Horta et al. 2011; Torregrosa 2013; Saha et al. 2018; Kamenan et al. 2019). Normalmente, el encogimiento se puede representar en función de la cantidad de agua evaporada y la razón de humedad (MR), y esta relación en los alimentos suele mostrar una tendencia lineal (Moreira y Sereno 2003; Ochoa et al. 2007; Martynenko 2014; Khuong et al. 2018; Joardder y Karim 2019). Los autores Ochoa et al. (2007) propusieron un modelo lineal de encogimiento teórico ideal, el cual describe el comportamiento de este fenómeno en función de la razón de humedad (Martynenko 2014):

$$S = \frac{V_{(t)}}{V_0} = \alpha \cdot MR + \xi_t \quad (1.14)$$

Donde α es la pendiente del modelo, la cual representa el encogimiento promedio y ξ_t es el encogimiento máximo que puede alcanzar el producto (Martynenko 2014).

En estudios realizados por Liu et al. (2012) y Kaneman et al. (2019) en zanahoria y cocoa, respectivamente, mostraron que el encogimiento durante el secado decreció linealmente con respecto al contenido de agua evaporada. Por otra parte, Torregrosa (2013) en el secado de yuca (*Manihot esculenta* Cranz) con aire caliente, con 3 variedades de este tubérculo y condiciones diferentes de temperatura y flujo de aire, obtuvo que a valores de MR mayores a 0.4 el encogimiento es lineal y a valores menores este comportamiento es variable.

1.2.6.2. Densidad aparente

Cuando se realizan operaciones de mezclado, transporte, almacenado y empaque de materiales en forma de partículas secas tales como hojuelas, harinas, granos, leche en polvo, entre otros, la densidad de estos productos es una propiedad aparente ya que varía de acuerdo al volumen de aire sustancial que se halle inmerso en medio de estos (Lewis 1987; Lanzerstorfer 2020). Tal propiedad es conocida como densidad aparente o de bulbo, la cual es de gran interés en el diseño y control de procesos (Lewis 1987; Ramos et al. 2004; Pordesimo et al. 2009; Cuq et al. 2011; Lanzerstorfer 2020). La medición de esta propiedad física en los productos alimenticios está en función de varios factores tales como la geometría, tamaño, densidad de sólidos, condiciones de almacenamiento y superficie y métodos de medición (Lewis 1987; Lanzerstorfer 2020).

En la literatura científica existen muchos modelos de densidad aparente que han sido aplicados en frutas y vegetales (Mayor y Sereno 2004; Talla et al. 2004; Koç et al. 2008; Liu et al. 2012; Leiton 2012; Mitrevski et al. 2012; Kaneman et al. 2019). Estos modelos requieren una serie de restricciones y condiciones para su estudio. De acuerdo a Talla et al. (2004) y a Koç et al. (2008), para un determinado producto húmedo su masa total ($m_{(t)}$) esta conformada por las fases sólida (masa seca), líquida (agua) y gaseosa (aire), y despreciando esta última se obtiene:

$$m_{(t)} = m_s + m_w \quad (1.15)$$

A su vez, el volumen total del producto está dado como:

$$V_{(t)} = V_s + V_w + V_a \quad (1.16)$$

Donde V_w representa el volumen del liquido (agua) y V_a es el volumen de aire, el cual incluye los poros abiertos y cerrados (Martynenko 2014). De acuerdo a las ecuaciones (1.15) y (1.16), la densidad aparente ($\rho_{(t)}$) se define como la relación entre masa y el volumen total del producto, incluyendo solo el volumen de los poros abiertos de la fase gaseosa (aire) (Ramos et al. 2004; Koç et al. 2008; Liu et al. 2012; Martynenko 2014).

$$\rho_{(t)} = \frac{m_{(t)}}{V_{(t)}} \quad (1.17)$$

Por otro lado, diferentes autores han propuesto varios modelos empíricos o teóricos para predecir la tendencia de la densidad aparente durante el proceso de secado (Zogzas et al. 1994; Mayor y Sereno 2004; Rodríguez et al. 2015). La mayoría de estos modelos se establecen en función del contenido de humedad, sin tener en cuenta el efecto de la temperatura de secado; sin embargo, otros consideran los efectos del encogimiento, coeficiente volumétrico, colapso, porosidad inicial, entre otros (Zogzas et al. 1994; Rodríguez et al. 2015).

1.2.6.3. Porosidad

En los productos alimenticios la porosidad se define como la relación entre el volumen de poros y el volumen total del producto (ecuación 1.18) (Lewis 1987). Esta propiedad está ligada en forma directa al contenido de humedad inicial, tamaño, naturaleza estructural y composición del producto, al igual que a las condiciones y tipo de secado (Lewis 1987; Ratti 1994; Krokida et al. 1997; Ramos et al. 2004; Koç et al. 2008; Joadder et al. 2017). Los productos que son porosos poseen mayores capacidades y velocidades de rehidratación, esto conlleva al aumento de la superficie de exposición en estos, pero adversamente su vida útil se reduce (Potter y Hotchkiss 1998, citado de Ramos et al. 2004; Koç et al. 2008).

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V_s + V_w + V_a} \quad (1.18)$$

Durante el secado la porosidad de los alimentos aumenta a medida que se evapora el agua y los compuestos volátiles contenidos en el interior de los poros del mismo (Ramos et al. 2004). Asimismo, a medida que se da el proceso de deshidratación se produce formación y evolución de poros en la matriz alimenticia, lo cual incrementa su nivel de porosidad (Joadder Karim 2019). La porosidad es otra propiedad de gran relevancia para caracterizar la calidad de los productos deshidratados debido a que esta define su perfil comercial, ya que estos pueden ser rehidratados o crujientes (Leiton 2012). Además, los fenómenos de transferencia de masa y energía también se ven afectados por la variación de esta propiedad durante el secado, debido a la formación de estructuras porosas que dificultan el transcurso de tales fenómenos (Hofsetz et al. 2007; Leiton 2012).

Por otra parte, en la literatura científica se encuentran distintos modelos teóricos, empíricos y semi-empíricos que han sido empleados por varios autores con el objetivo de predecir el perfil de la

porosidad de los productos alimenticios durante el proceso de deshidratación, los cuales generalmente se hallan en función del contenido de humedad (Joardder y Karim 2019). Los teóricos se pueden desarrollar mediante el entendimiento de teorías físicas fundamentales y mecanismos que podrían estar involucrados en la formación de poros (Joardder y Karim 2019). Por su parte, los modelos empíricos y semi-empíricos son desarrollados sencillamente a través del ajuste de parámetros de modelo a los datos experimentales (Joardder y Karim 2019).

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Este estudio es de tipo experimental.

2.2. LOCALIZACIÓN

Este estudio se llevó a cabo en las instalaciones del laboratorio de Ingeniería Aplicada II, perteneciente al departamento de Ingeniería de Alimentos de la Universidad de Córdoba, sede Berástegui, en el municipio de Ciénaga de Oro, Córdoba, Colombia. Los experimentos fueron realizados a condiciones normales de temperatura y humedad relativa, las cuales son en promedio 30°C y 80%, respectivamente.

2.3. EQUIPOS UTILIZADOS

2.3.1. Equipo de ventana refractiva (RW)

Para el proceso de secado se utilizó un baño termostato marca MEMMERT, modelo WNB10 (Empresa MEMMERT, Alemania), el cual fue llenado con agua potable y sobre la superficie de esta se colocó una película transparente de Mylar® como fuente radiante, esta es auto-adherente y empleada para delimitar el área de contacto entre el producto y el medio de calefactor (agua caliente).

2.3.2. Equipos complementarios.

- Cámara de Calor y secado con convección forzada.
- Cortador de verduras.
- Balanza digital Ohaus® Adventurer™ con precisión de 0.001 g.

- Vernier digital.
- Bisturí metálico.
- Cuchillo de acero inoxidable.
- Molde metálico.

2.4. VARIABLES E INDICADORES

2.4.1. Variables independientes

- Temperatura de proceso (75, 85 y 95°C).
- Espesor de la muestra (1.5 y 2.5 mm).

2.4.2. Variables dependientes

- Humedad
- Encogimiento
- Densidad aparente.
- Porosidad.

2.5. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

2.5.1. Obtención de la materia prima

La batata blanca (*Ipomoea batatas* L.) se obtuvo en el mercado público del municipio de Cereté (Colombia), esta se seleccionó teniendo en cuenta el tamaño, forma, uniformidad superficial y sin daños en la piel. El tubérculo se lavó y peló manualmente; las muestras fueron cortadas en rodajas o lonjas mediante el uso de un cortador cilíndrico marca Hobart, modelo FP100 (Halde, Suecia).

Luego las muestras fueron adecuadas en láminas cuadradas de 3.5 cm de lado y espesores de 1.5 y 2.5 mm (ver Figura 4), mediante el empleo de un molde cuadrado metálico.



Figura 4. Forma de las muestras de Batata usadas en cada experimento de secado.

2.5.2. Secado de batata

Al inicio del proceso de secado, el equipo de Ventana Refractiva fue llenado con agua potable, luego se procedió a la temperatura de trabajo (75, 85 y 95°C). A las muestras de batata, previamente adecuadas, se determinó el contenido de humedad inicial, luego fueron colocadas sobre la película de Mylar® y fueron pesadas en intervalos de tiempo de 1, 2, 3, 5 y 10 minutos hasta obtener peso constante. Una vez que las muestras fueron deshidratadas, se procedió a medir su contenido de humedad final. Todos los experimentos o corridas de secado fueron realizados para obtener los parámetros cinéticos en el secado por Ventana Refractiva de batata blanca y estos se hicieron por triplicado.

2.5.3. Determinación del contenido de humedad

Para la determinación de la humedad, en la batata fresca y en las muestras deshidratadas, se utilizó el método termo-gravimétrico (AOAC N° 931.04). Para este método las muestras se trituraron,

pesaron, y sometieron a una temperatura de 105° C a presión atmosférica por 24 horas. La desecación de las muestras se llevó a cabo mediante el empleo de una cámara de secado con convección forzada marca BINDER, modelo FD-115 (BINDER GmbH, Alemania). El peso final se determinó utilizando una balanza analítica marca PIONNER® Analytical, modelo PA214 (EHAUS, USA) con una precisión de 0.0001 g. La determinación de humedad se realizó por triplicado.

2.5.4. Determinación del efecto de la temperatura del proceso y el espesor de las láminas sobre la cinética del secado por Ventana Refractiva™ en batata blanca.

2.5.4.1. Curvas de secado

A partir de los datos obtenidos se construyeron las curvas de secado para cada tratamiento, esto es, razón de humedad *versus* tiempo de secado y velocidad de secado *versus* tiempo de secado, de acuerdo a estudios hechos por Leiton (2012), Narváez y León (2017), Akinola y Azeorah (2017), Akinola et al. (2018c), Ojediran et al. (2020) y a la metodología de Geankoplis (1998). La razón de humedad y la velocidad de secado fueron calculadas mediante las ecuaciones (1.11) y (1.3), respectivamente.

2.5.5. Obtención de los parámetros cinéticos para el secado por Ventana Refractiva™ en batata blanca.

2.5.5.1. Modelo matemático de transferencia de masa en el secado por Ventana Refractiva

Para estudiar el comportamiento de la cinética de secado de batata se utilizó el modelo de la solución analítica de la ley de Fick para la transferencia de masa unidimensional en estado no estacionario para una lámina infinita, homogénea e isotrópica de espesor L (ecuación 1.10), como ya ha sido descrito en la sección (1.2.4).

A los datos de razón de humedad (MR) en función del tiempo se les realizó ajuste de curva de acuerdo al modelo de la segunda Ley de Fick mediante la aplicación Curving Fitting del software MATLAB® (R2015b, versión de prueba). A partir de este ajuste se obtuvieron los valores de las raíces positivas μ_1 y el coeficiente de difusividad efectiva de la humedad. Estos valores se emplearon para determinar el coeficiente convectivo de transferencia de masa (K_m), de acuerdo a la ecuación (1.14). La suma de cuadrados del error (SSE), suma cuadrados medios del error (RMSE) y el coeficiente de determinación (R^2) se usaron para evaluar la bondad de ajuste del modelo.

2.5.5.2. Influencia de la temperatura

Para evaluar la influencia de la temperatura de secado sobre la difusividad efectiva del agua en *Ipomoea batatas* se empleó un modelo de tendencia tipo Arrhenius (ecuación 1.13). Este modelo se transformó en una función lineal para estimar los valores de la energía de activación y el factor de Arrhenius mediante las pendiente e intercepto con el eje de las coordenadas “y”.

2.5.6. Determinación del efecto de la temperatura del proceso y el espesor de las láminas sobre las propiedades físicas

Después de obtener los parámetros cinéticos del secado de batata, se procedió con la determinación de las propiedades físicas de encogimiento, densidad aparente y porosidad en las láminas de muestras deshidratadas. Cada una de estas propiedades fueron medidas a través de distintas metodologías encontradas en la literatura. Mediante mediciones llevadas a cabo a nivel experimental se logró determinar el efecto de la temperatura y el espesor de las muestras sobre las

propiedades físicas en las láminas de batata deshidratadas a través de análisis de varianza (ANOVA), test de Tukey y ajustes de modelos matemáticos.

2.5.6.1. Encogimiento

Las mediciones del encogimiento para cada uno de los tratamientos se hicieron cada 8 minutos, midiendo los lados y el espesor de las muestras. Debido a la deformación de las muestras en sus lados, se hizo necesario la utilización de un marcador para trazar y medir sobre una de papel las dimensiones de estos. Por su parte, la medición del espesor se realizó con la ayuda de un Vernier digital de alta precisión. Cabe anotar que en cada tratamiento se tomaron al azar tres láminas de batata, sin hacer replicaciones. Finalizadas las tomas de estas mediciones, se tabularon los datos correspondientes al encogimiento de las muestras, teniendo en cuenta que por definición el volumen de una lámina cuadrada está dado por:

$$V = s^2 \times L \quad (2.1)$$

Donde s es longitud de los lados y L es el espesor de las muestras. Por último, se construyeron las curvas de coeficiente de encogimiento (S) *versus* MR. Las curvas fueron ajustadas al modelo lineal propuesto por Ochoa et al. (2007), con la ayuda de la aplicación *Curving Fitting* del software MATLAB® (versión de prueba).

2.5.6.2. Densidad aparente

Primero, se seleccionaron muestras al azar (3 láminas) con peso y contenido de humedad aproximadamente igual a las muestras iniciales utilizadas en el secado para construcción de las curvas de secado reduciendo así el error experimental. La pérdida de humedad se midió en intervalos de tiempo de 8 minutos con una balanza electrónica con precisión de 0.001 g. Los datos obtenidos en la medición de encogimiento se utilizaron para calcular la densidad aparente de las

muestras. Posteriormente, se tabularon los datos de masa y volumen aparente, con lo cuales se determinó el comportamiento de la densidad aparente mediante la ecuación (1.17), así mismo se realizó el ajuste de un modelo polinómico de cuarto orden a los datos densidad aparente *versus* la razón de humedad (ecuación 2.2).

$$\rho_{(t)} = k_0 + k_1 \cdot MR + k_2 \cdot MR^2 + k_3 \cdot MR^3 + k_4 \cdot MR^4 \quad (2.2)$$

Donde k_0 , k_1 , k_2 , k_3 y k_4 son constantes del modelo

2.5.6.3. Porosidad

En lo referente a la medición de la porosidad en las láminas de batata, esta se llevó a cabo mediante la relación empleada por Dissa et al. (2010) (Liu et al. 2012) (ecuación 2.3).

$$\varepsilon_{(t)} = 1 - \frac{\rho_{(t)}}{\rho_s} \quad (2.3)$$

Donde $\varepsilon_{(t)}$ es la porosidad en el tiempo. La densidad de los sólidos en la batata se tomó según el estudio realizado por Lozano et al. (1983) y citado por Madiouli et al. (2012), la cual tiene un valor de 1559 Kg/m³. Con el registro de los datos de la porosidad en el tiempo se realizaron las curvas de porosidad (%) *versus* razón de humedad. Además, se ajustó un modelo polinómico de cuarto orden para los datos de porosidad *versus* la razón de humedad (ecuación 2.4)

$$\varepsilon_{(t)} = d_0 + d_1 \cdot MR + d_2 \cdot MR^2 + d_3 \cdot MR^3 + d_4 \cdot MR^4 \quad (2.4)$$

Donde d_0 , d_1 , d_2 , d_3 y d_4 son constantes del modelo.

2.5.7. Diseño experimental

El experimento fue conducido bajo un diseño completamente al azar con arreglo factorial 3x2 (3 temperaturas y 2 espesores) con tres repeticiones, arrojando un número de 18 unidades

experimentales. Para cada tratamiento se realizaron mediciones de las diferentes propiedades en diferentes tiempos del intervalo de 0 a 96 minutos. Las variables de respuesta fueron: Humedad, encogimiento, densidad aparente y porosidad.

2.5.8. Análisis estadístico de datos

Los datos experimentales fueron evaluados mediante análisis de varianza (ANOVA) multifactorial, test de diferencias de medias (Tukey) y ajuste de regresiones no lineales (método de Marquardt) con significancia del 5%. Los supuestos de aleatoriedad, linealidad, normalidad y homogeneidad de varianzas fueron realizados. Estos análisis se realizaron mediante los programas STATGRAPHICS CENTURION XVI (Statistical Graphics Corp., Herndon, Virginia, USA), (versión de prueba) y MATLAB (2015b) (versión de prueba).

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA DE PROCESO Y ESPESOR DE LAS LÁMINAS SOBRE LA CINÉTICA DEL SECADO POR VENTANA REFRACTIVA EN BATATA BLANCA

En la Tabla (1) se presenta el contenido de humedad inicial de las muestras frescas para cada tratamiento respectivo.

Tabla 1. Contenido de humedad inicial en las muestras

Muestras para tratamiento	Contenido de humedad inicial (base húmeda)
75°C-1.5 mm	69.73±0.007
85°C-1.5 mm	69.73±0.007
95°C-1.5 mm	68.45±0.007
75°C-2.5 mm	62.31±0.005
85°C-2.5 mm	62.31±0.005
95°C-2.5 mm	62.31±0.005

3.1.1. Curvas de secado para la razón de humedad

El análisis de varianza ($p < 0.05$) mostró que la temperatura y el espesor afectaron de manera significativa el tiempo de secado, al igual que la interacción temperatura-espesor presentó efecto significativo sobre el mismo (Apéndice A). A medida que la temperatura aumento y el espesor de las láminas disminuyó, la razón de humedad (MR) y el tiempo de secado decrecieron. Por otra parte, el test de Tukey para el tiempo de secado mostro que las temperaturas de 75, 85 y 95°C presentaron diferencia significativa entre si y los espesores de las muestras presentaron diferencias significativas entre ellos.

En la Tabla (2) se presenta las comparaciones entre las diferencias de las medias de los espesores estudiados asociados a los respectivos niveles de la temperatura de proceso para el tiempo de secado. El efecto de la interacción del espesor de 1.5 mm en la relación a las temperaturas de 75 y 85°C presentan diferencia del efecto de la interacción entre el espesor de 2.5 mm con la relación a las mismas temperaturas. De igual manera, el efecto de la interacción del espesor de 2.5 mm con la relación a las temperaturas de 75 y 95°C, esta última presentó el mayor valor diferencia en la comparación y el efecto de la interacción del espesor de 1.5 mm en la relación a las temperaturas de 85 y 95°C presentaron diferencia del efecto de la interacción entre el espesor de 2.5 mm con la relación a las mismas temperaturas, presentando el menor valor de comparación para estas última. Los resultados de los valores de comparaciones no presentaron una tendencia clara ya que no aumentaron o disminuyeron, hecho que se debe a simple variabilidad entre los tratamientos.

Tabla 2. Resultados de las comparaciones entre las diferencias de las medias para el tiempo de secado (ψ_1 , ψ_2 y ψ_3) respecto a los espesores de las láminas de batata.

Contraste	Valor del contraste
$\Psi_1 = B_{12} A_1 - B_{12} A_2$	24
$\Psi_2 = B_{13} A_1 - B_{13} A_2$	34,3333
$\Psi_3 = B_{23} A_1 - B_{23} A_2$	10,3333

En la Figura (5) se muestran las curvas de secado para la razón de humedad en función del tiempo de secado para los diferentes tratamientos. Se observa que al aumentar la temperatura de proceso y disminuir el espesor de la muestra, el tiempo de secado disminuye. El contenido de humedad final las muestras deshidratadas fueron menor al 10% (base seca) y los menores tiempos se obtuvieron para el espesor de 1.5 mm a 75, 85 y 95°C, los cuales fueron de 75, 63 y 44 minutos,

respectivamente; mientras que para el espesor de 2.5 mm a 75, 85 y 95°C los tiempos obtenidos fueron de 96, 88 y 72 minutos, respectivamente. Estos resultados muestran acortamientos considerables en el tiempo de secado de batata en comparación a otros métodos de secado usados en este alimento tales como el solar y el aire caliente, los cuales acarrearían tiempos largos de proceso que van de 4 a 15 horas (Diamante y Munro 1991,1993; Singh et al. 2006; Doymaz 2010; Singh y Pandey 2012; Dos Santos et al. 2012). Estudios realizados por Junqueira et al. (2016) y Onwude et al. (2019) en el secado de batata, encontraron resultados similares en cuanto a tiempos de secado relativamente cortos, aplicando pretratamientos con deshidratación osmótica e infrarrojos sobre microondas y aire caliente, de manera correspondiente. Adicionalmente, Akinola et al. (2018a), Akinola et al. (2018b) y Akinola et al. (2019) también reportaron tiempos cortos mediante la aplicación de Ventana Refractiva en la deshidratación de Okra (*Abelmoschus esculentus*), pepino y ñame (*Dioscorea rotundata*), respectivamente.

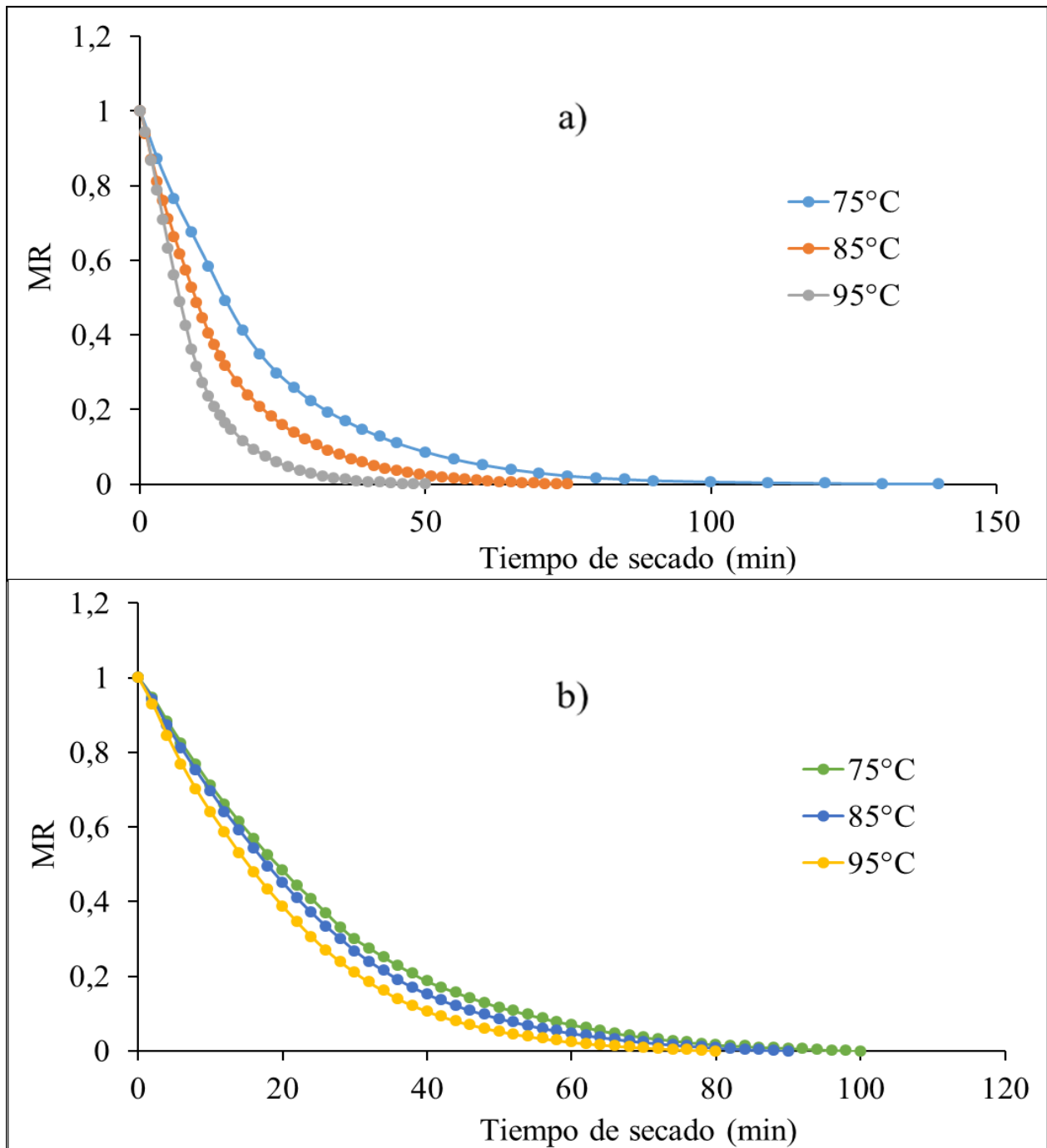


Figura 5. Curvas de razón de humedad adimensional (MR) *versus* tiempo de secado a diferentes temperaturas. a) Espesor de 1.5 mm; b) Espesor de 2.5 mm.

3.1.2. Curvas de velocidad de secado

La Figura (6) ilustra el comportamiento de la velocidad de secado en función del tiempo para cada uno de los tratamientos estudiados. Se puede observar claramente el periodo transitorio o de

adaptación, en el que se presenta un calentamiento instantáneo del alimento hasta que este alcance la temperatura de equilibrio, y mientras esto sucede, la velocidad de secado crece con altas tasas de deshidratación (Geankoplis 1998; Carrin y Crapiste 2008, citado de Onwude et al. 2016). Además, se observa que a medida que la temperatura del proceso aumenta, la velocidad de secado también lo hace; esto se debe a que cuando el gradiente de temperatura entre el medio calefactor (agua caliente) y las láminas de batata es mayor, las velocidades de transferencia de humedad y calor en el proceso se elevan, acortando los tiempos de secado (Zhu y Jiang 2014). En este caso, las mayores velocidades de secado fueron alcanzadas por la temperatura de 95°C para el espesor mayor y menor, registrando valores de 4.720 y 4.473 kg de agua.m⁻².h⁻¹, correspondiente. También a 85°C y a 2.5 mm de espesor se pudo alcanzar una velocidad muy parecida de 4.310 kg de agua.m⁻².h⁻¹.

El periodo de velocidad constante no se observó en ninguna de las corridas experimentales, sino que el secado tuvo lugar en el periodo de velocidad decreciente del proceso. Este es un hecho que ocurre generalmente en el secado de productos agrícolas y que debe a que la capa fina del alimento (película de secado) no proporciona una fuente de humedad constante para que la superficie del producto húmedo permanezca en estado de saturación, esto mientras que la humedad de esta superficie es eliminada (Diamante y Munro 1991; Singh et al. 2006; Erbay y Icier 2010; Falade et al. 2010; Rafiee et al. (2010); Singh y Pandey 2012; Zhu y Jiang 2014; Da Costa et al. 2015; Harchegani et al. 2015). Durante el periodo decreciente se aprecia que las curvas de velocidad de secado una vez que se ha eliminado la humedad superficial en el alimento, se presenta un comportamiento de decadencia asintótica, lo cual refleja que la transferencia de masa interna se rige por los fenómenos de difusión (Falade et al. 2010; Doymaz 2011; Singh y Pandey, 2012; Harchegani et al. 2015; Onwude et al. 2016; Mujaffar y Bynoe 2019). En este periodo la migración

de la humedad interna se realiza desde las zonas de alta concentración de agua hacia las que tienen menor concentración, dándose este suceso desde el interior hacia la superficie del alimento, esto se debe a que además de la difusión intervengan fuerzas de capilaridad durante la deshidratación de las láminas de batata (Meng et al. 2011; Harchegani et al. 2015).

Al final del periodo decreciente, las velocidades disminuyen de forma apreciable en todas las corridas y tienden a comportarse en forma semejante, hecho que es atribuido a los fenómenos de encogimiento y formación de costras en las láminas del alimento, los cuales aumentan la resistencia interna a la transferencia de humedad (Rafiee et al. 2010; Da Costa et al. 2015).

En cuanto al efecto del espesor sobre la velocidad de secado, hay que anotar que tuvo incidencia en la misma, ya que cuando este factor fue menor las velocidades decrecieron. Esto concuerda con lo registrado en la literatura científica, debido a que los fenómenos de transferencia son dependientes de la distancia que tienen que recorrer las moléculas de agua cuando atraviesan la matriz sólida (alimento) para poder escapar al medio circundante durante la evaporación de la humedad residual. Es decir, el aumento de este factor incrementa la resistencia interna a la transferencia de la humedad y energía en forma de calor, obteniéndose tiempos de proceso más largos (Zhu y Jiang 2014).

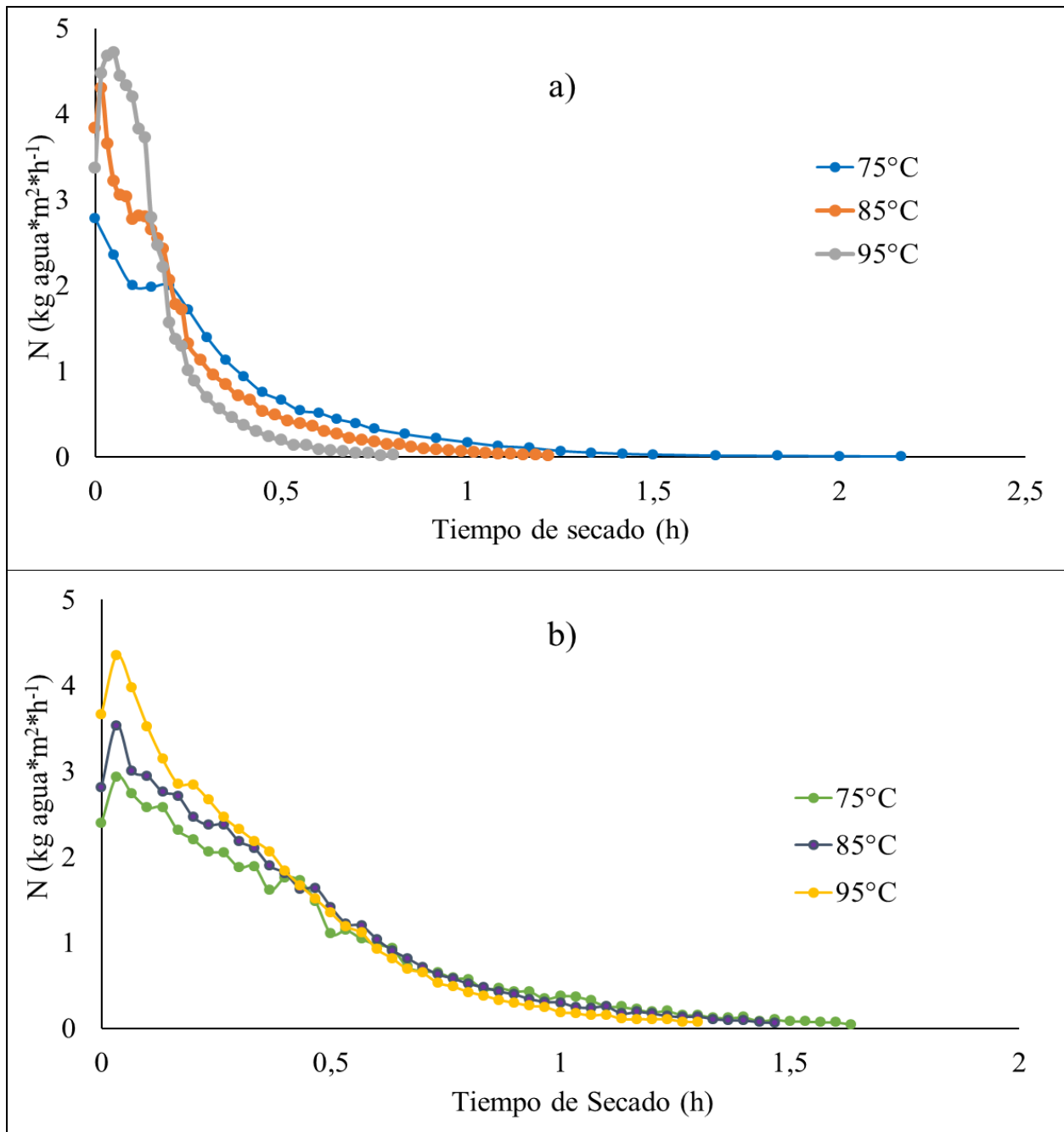


Figura 6. Curvas de velocidad de secado *versus* tiempo de secado a diferentes temperaturas. a) Espesor de 1.5 mm; b) Espesor de 2.5 mm

3.2. OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS CINÉTICOS EN EL SECADO POR VENTANA REFRACTIVA EN BATATA BLANCA

3.2.1. Modelación matemática de la transferencia de masa en el secado por Ventana Refractiva

Para modelar la cinética de secado de la batata durante el periodo decreciente se utilizó el modelo de la solución analítica de la ley de la segunda Fick para la transferencia de masa en estado dinámico truncada en el primer término, con el fin de calcular los parámetros cinéticos del coeficiente de difusividad efectiva de la humedad y la energía de activación. El análisis de varianza ($p < 0.05$) muestra que la difusividad efectiva del agua es influenciada de manera significativa por la temperatura de secado y por el espesor de las muestras (ver Apéndice B°N°2). A medida que aumentan la temperatura y el espesor de las láminas la difusividad efectiva también lo hace. Por su parte, el test de Tukey mostró que las temperaturas de 75 y 85°C difieren significativamente con respecto a la temperatura de 95°C. De igual manera, los dos espesores también presentaron diferencias significativas entre sí.

En la Tabla (3) se muestran los valores de la difusividad efectiva obtenidos para cada tratamiento, los cuales presentaron buen ajuste ($R^2 > 0.990$), con lo cual se puede afirmar que el modelo describe adecuadamente la difusión de la humedad en la batata durante el periodo decreciente. Se observa que a medida en que aumenta la temperatura, la difusividad efectiva también aumenta, esto se debe a que este parámetro es altamente dependiente de la temperatura; además cuando la matriz sólida es deshidratada a altas temperaturas esto involucra un aumento en el intercambio de energía en forma de calor, hecho que provoca que se acelere la actividad de las moléculas de agua acrecentando la difusividad efectiva (Doymaz 2010; Hao et al. 2015). Adicionalmente, se observa que también la difusividad se acrecienta con el aumento del espesor de las láminas de batata, hecho

que se atribuye a la alta concentración de moléculas de agua al ocupar mayor volumen y área de superficial para la transferencia de humedad y energía. Investigaciones hechas por Falade et al. (2010), Singh y Pandey (2012), Akinola et al. (2019) y Ojdiran et al. (2020), reportaron resultados perecidos en muestras de batata (escaldadas y frescas) y ñame secadas por aire caliente y Ventana Refractiva.

Tabla 3. Coeficientes de difusividad efectiva y coeficientes convectivos de transferencia de masa para cada tratamiento

TRATAMIENTO	$D_{\text{eff}} \times 10^5 \text{ (m}^2/\text{s)}$	$K_m \times 10^6 \text{ (m/s)}$	SSE	RMSE	R^2
75°C-1.5 mm	8.67±0.19	1.23±3.35	0.003	0.010	0.999
85°C-1.5 mm	13.1±0.06	1.93±1.09	0.005	0.011	0.999
95°C-1.5 mm	14.8±0.11	2.76±1.47	0.032	0.028	0.990
75°C-2.5 mm	39.2±2	2.77±6.14	0.031	0.025	0.992
85°C-2.5 mm	42.7±3.6	3.03±2.31	0.036	0.028	0.991
95°C-2.5 mm	52.8±6.8	3.52±1.56	0.025	0.025	0.992

Los valores de difusividad efectiva fueron altos comparados con los hallados en la literatura científica en lo que respecta al secado de batata. No obstante, estos se encuentran dentro del rango de 10^{-5} a 10^{-14} para alimentos y otros materiales no alimenticios deshidratados (Zogzas et al. 1996; Panagiotou et al. 2004; Mujumdar 2006; Heldman y Lund 2007). Estos valores altos implican que el movimiento de la humedad desde el interior de los poros estructurales de las láminas de batata hacia el exterior es más rápido al usar la Ventana Refractiva en comparación con otros secados convencionales empleados para la deshidratación de este y otros alimentos; esto se debe a que la

mayor proporción de la energía térmica del agua caliente (99%) se transfiere por conducción a través de la membrana plástica hacia el producto húmedo (Jerez et al. 2015; Akinola et al. 2019).

3.2.2. Influencia de la temperatura

Los datos de D_{eff} de la Tabla (3) fueron ajustados al modelo Arrhenius (Figura 7). El logaritmo natural de D_{eff} versus el inverso de la temperatura absoluta ($1/T$), el cual presentó un comportamiento lineal, con un coeficiente de determinación mayor a 0.8873. A partir de esta relación la energía de activación y el factor de Arrhenius fueron calculados.

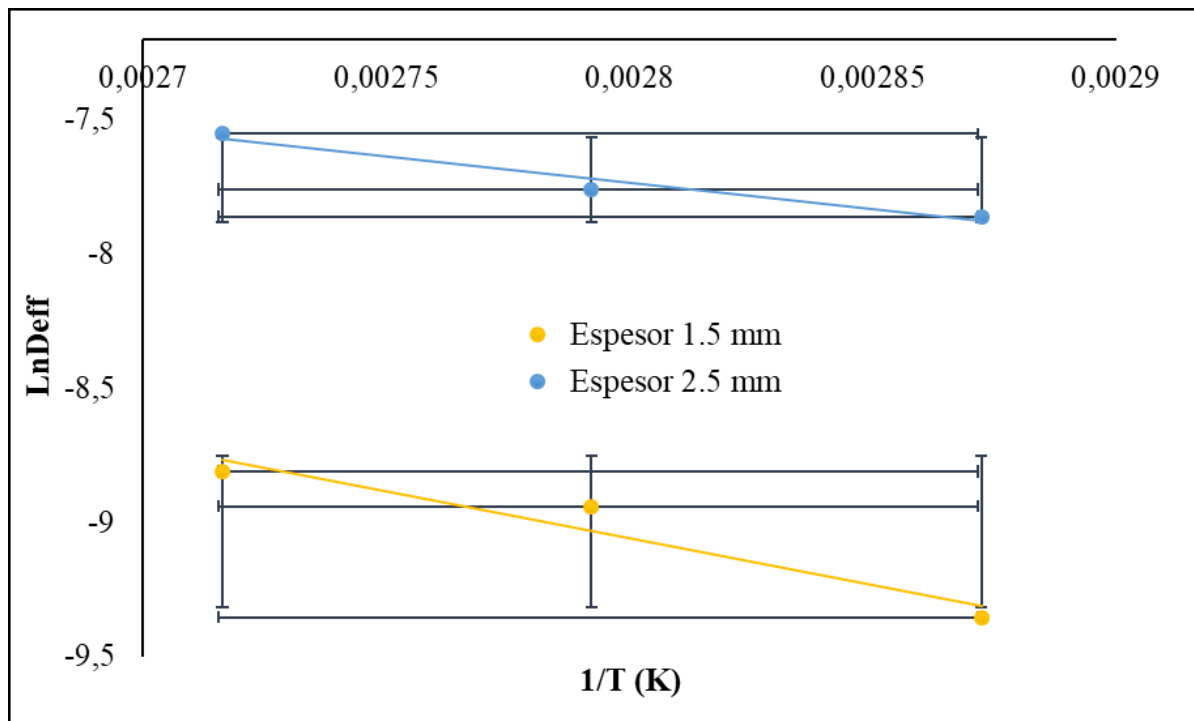


Figura 7. Efecto de la temperatura de secado sobre la difusividad efectiva.

En la Tabla (4) se muestran los valores de energía de activación y factor de Arrhenius para los espesores de 1.5 y 2.5 mm, los cuales fueron 34.78 y 21.23 kJ/mol y 1.57 y $7.35 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$,

respectivamente. Estos valores se encontraron dentro del rango reportado en la literatura científica (Zogzas et al. 1996; Maroulis et al. 2001). A nivel teórico, la energía de activación aumenta cuando se incrementa el espesor del producto debido a que las moléculas de agua encuentran más resistencia durante su migración hacia los alrededores (aire), por lo tanto, necesitarán más energía para vencer dicha resistencia. Sin embargo, los resultados obtenidos en este estudio no concuerdan con la teoría, este hecho se debe a que las muestras con espesor de 2.5 mm tenían menor contenido de humedad inicial en comparación con las de espesor de 1.5 mm (Tabla 1), ya que este parámetro depende no solo de la temperatura de secado sino también del contenido de humedad inicial en el producto. Además, se encontró que para ambos espesores el valor de la energía de activación fue más alto en comparación a otros métodos tales como aire convectivo e infrarrojo, en lo referente al secado de batata (Falade et al. 2010; Doymaz 2011; Rotimi 2012; Singh y Pandey 2012; Zhu y Jiang 2014; Fan et al. 2015; Onwude et al. 2019; Souza et al. 2019).

Tabla 4. Energía de activación (E_a) y factor de Arrhenius (D_0) para el modelo tipo Arrhenius.

TRATAMIENTO	E_a (kJ/mol) para D_{eff}	D_0 (m ² /s)	R^2
ESPESOR 1.5 mm	34.78±2.9	1.57	0.9255
ESPESOR 2.5 mm	21.23±5.5	7.35x10 ⁻²	0.955

Por otro lado, la Figura (8) muestra el comportamiento del coeficiente convectivo promedio de transferencia de masa en función de la temperatura para los espesores estudiados. Se puede observar que este parámetro incrementa linealmente a medida que aumenta la temperatura de trabajo en ambos espesores, hecho que concuerda con lo descrito por Clemente (2003), el cual menciona que este parámetro es función de la temperatura y geometría del producto, al igual que otros factores externos como humedad relativa, temperatura y velocidad del aire de secado. Para el

espesor de 2.5 mm este incremento fue menor en comparación con el espesor de 1.5 mm, debido a que los fenómenos de transferencia son dependientes de la distancia que tienen que recorrer las moléculas de agua cuando atraviesan la matriz sólida para poder escapar al medio circundante durante la evaporación de la humedad residual. Los datos del coeficiente convectivo fueron ajustados a un modelo lineal en función de la temperatura como se reporta en la Tabla (5), en donde se obtuvo buen ajuste para este modelo con R^2 de 0.9976 y 0.9688 para los espesores de 1.5 y 2.5 mm, respectivamente. Este ajuste ratifica la disminución de este parámetro está influenciado con el espesor de las láminas de batata, pues para el espesor de 2.5 mm la pendiente de este fue de $4 \times 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}.\text{°C}^{-1}$, siendo menor que la del espesor de 1.5 mm cuyo valor fue de $8 \times 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}.\text{°C}^{-1}$. Con estos resultados se demuestra que el coeficiente convectivo no solo depende de la temperatura, sino también del espesor de las láminas de batata.

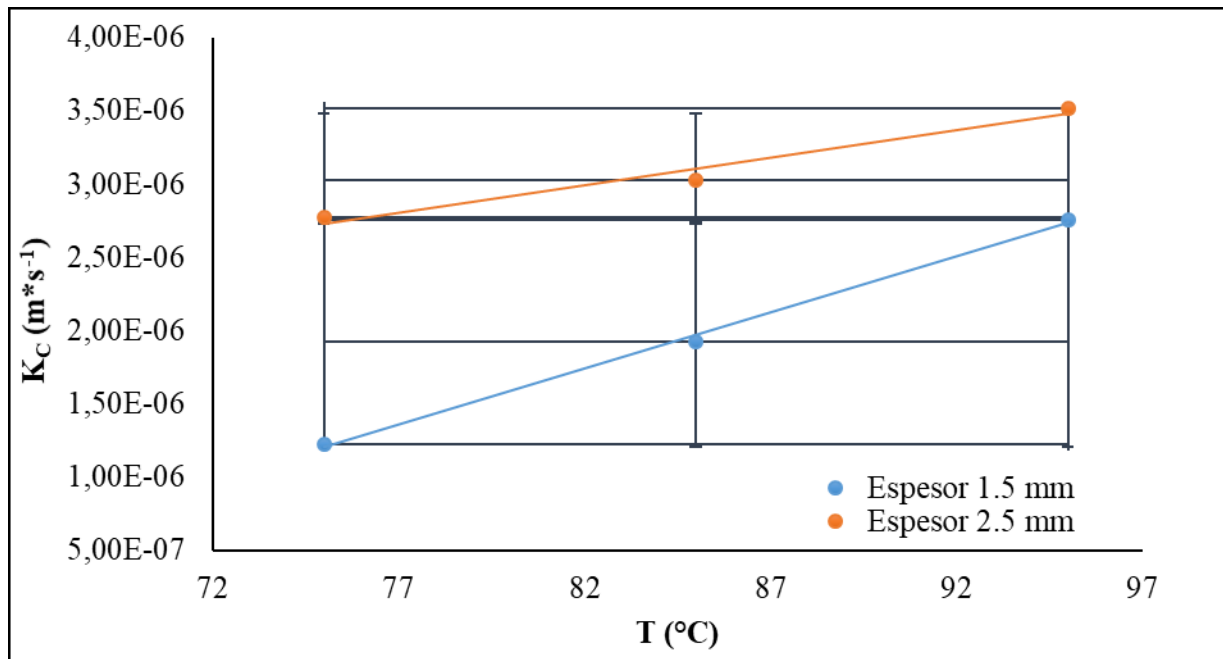


Figura 8. Coeficiente convectivo promedio para la transferencia de masa.

Tabla 5. Modelo lineal para el coeficiente convectivo de transferencia de masa en función de la temperatura de secado.

TRATAMIENTO	Modelo lineal	R ²
ESPESOR 1.5 mm	$K_C = 8 \times 10^{-8} T(^{\circ}\text{C}) - 5 \times 10^{-6}$	0.9976
ESPESOR 2.5 mm	$K_C = 4 \times 10^{-8} T(^{\circ}\text{C}) - 7 \times 10^{-8}$	0.9688

3.3. DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA DEL PROCESO Y EL ESPESOR DE LAS LÁMINAS SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS

3.3.1. Encogimiento

El análisis de varianza ($p < 0.05$) mostró que el espesor de las láminas de batata afectó significativamente el encogimiento de estas (Apéndice B, N°2). A medida que el espesor de muestra disminuyó, el encogimiento de las muestras también lo hizo. La reducción del espesor ayuda a obtener altas tasas de deshidratación, pero promueve mayormente al colapso de la estructura del producto debido al estrés celular que se genera a nivel interno en este y a la ruptura de la membrana y pared celular (Koç et al. 2008; Castro et al. 2018). Resultados parecidos fueron obtenidos por Kuruzawa et al. (2012) y Onwade et al. (2019b) en el secado convectivo de batata. Por su parte, el análisis de medias de Tukey mostró que los espesores de las láminas de batata difieren significativamente entre ellos, (Apéndice B, N°3).

En la Figura (9) se muestra el comportamiento del coeficiente de encogimiento ($S = V_t/V_i$) en función de la razón de humedad para cada uno de los tratamientos estudiados. Inicialmente se observa que el volumen de las láminas se reduce en forma lineal a medida que la razón de humedad disminuye, esto desde las primeras etapas del secado hasta los instantes finales del periodo decreciente (valores de MR de 1 a 0.2). Después, sigue disminuyendo mostrando un perfil no lineal,

el cual se debe a la aparición del estado de transición vítrea, en el cual se genera aumento en la rigidez del producto, causando reducción en la movilidad del mismo (Dissa et al. 2010; Aversa et al. 2011). Todos los tratamientos estudiados presentaron esta misma tendencia durante todo el proceso, concordando con lo reportado por varios autores (Hofsetz et al. 2010; Dissa et al. 2010; Aversa et al. 2011; Torregrosa 2013; Nguyen et al. 2018; Saha et al. 2018).

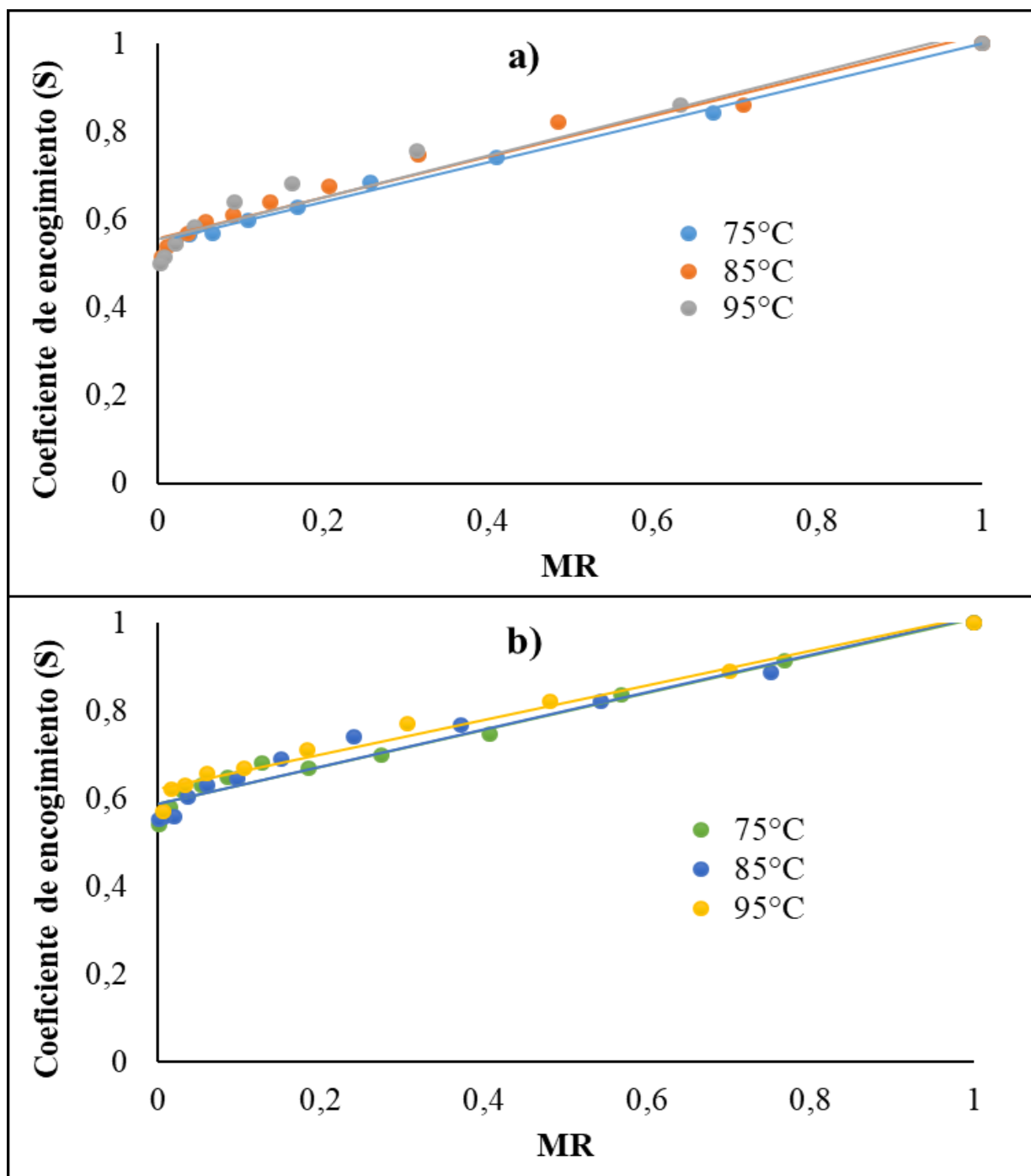


Figura 9. Coeficiente de encogimiento *versus* razón de humedad (MR) durante el secado de batata por Ventana Refractiva en batata. a) Espesor de 1.5mm; b) Espesor de 2.5mm.

Por otro lado, el modelado del encogimiento ha sido estudiado ampliamente por diferentes autores en la deshidratación de frutas y vegetales (Lozano et al. 1980,1983; Zogzas et al. 1994; Mayor y

Sereno 2004; Dissa et al. 2010; Aversa et al. 2011; Llave et al. 2016; Kaneman et al. 2019), con el fin predecir el comportamiento de este fenómeno físico. Los modelos empleados para el estudio del encogimiento a menudo son modelos lineales que son construidos de forma empírica, los cuales correlacionan la variación de las dimensiones del producto en función de la pérdida de humedad, haciendo mediciones directas sobre el mismo (Ratti 1994; Zogzas et al. 1994; Ortiz et al. 2015; Lentzou et al. 2019). En la Tabla (6) se presentan los modelos lineales para el encogimiento en función de la razón de humedad para cada tratamiento estudiado. De acuerdo al valor de las pendientes obtenidas para las curvas de encogimiento, se halló que la disminución del encogimiento es dependiente del espesor de las muestras, puesto que estas arrojaron pendientes menores cuando el espesor aumento. Por su parte, el ajuste de modelo mostró valores de R^2 en el rango de 0.9429 a 0.9958, SSE de 0.0007708 a 0.01308 y RMSE de 0.01049 a 0.04323, con los cuales se verificó que el modelo lineal describe apropiadamente un perfil aproximado de encogimiento ideal (lineal) en las láminas de batata durante su deshidratación, concordando con estudios realizados por varios autores (Mayor y Sereno 2004; Ochoa et al. 2007; Schultz et al. 2007; Aversa et al. 2011,2012; Martynenko 2014).

Tabla 6. Modelo lineal para los diferentes tratamientos con sus respectivos coeficientes de correlación (R^2), sumas del cuadrado del error (SSE) y las raíces del cuadrado medio del error (RMSE) durante el secado de batata por Ventana Refractiva.

TRATAMIENTO	Modelo lineal	R^2	SEE	RMSE
75°C-1.5 mm	$V_t/V_i = 0.4521MR + 0.548$	0.9958	0.000771	0.01049
85°C-1.5 mm	$V_t/V_i = 0.464MR + 0.5568$	0.9648	0.008841	0.02973
95°C-1.5 mm	$V_t/V_i = 0.4748MR + 0.5551$	0.9429	0.013080	0.04323
75°C-2.5 mm	$V_t/V_i = 0.4197MR + 0.589$	0.9719	0.006412	0.02414
85°C-2.5 mm	$V_t/V_i = 0.4238MR + 0.5893$	0.9591	0.009145	0.03024

95°C-2.5 mm	$V_t/V_i = 0.3945MR + 0.6206$	0.9729	0.004449	0.02358
-------------	-------------------------------	--------	----------	---------

3.3.2. Densidad aparente

El análisis de varianza ($p < 0.05$) mostró que la temperatura de secado y espesor de las láminas de batata tuvieron efecto significado sobre la densidad aparente (Apéndice B-N°3). La densidad aparente no mostró un comportamiento claro respecto a la temperatura ya que no aumento ni disminuyó durante el proceso de deshidratación, lo cual se debe a simple variabilidad entre los tratamientos. Además, esta propiedad disminuyó a medida que aumento el espesor de las láminas de batata. Por su parte, la interacción temperatura-espesor también afectó de manera significativa a esta propiedad.

En la Tabla (7) se muestran las comparaciones entre las diferencias de las medias de los espesores estudiados asociados a los respectivos niveles de la temperatura de proceso para la densidad aparente. El efecto de la interacción del espesor de 1.5 mm en la relación de las temperaturas 75 y 85°C presentan diferencia del efecto de la interacción entre el espesor de 2.5 mm con la relación a las mismas temperaturas. De igual manera, el efecto de la interacción del espesor de 2.5 mm con la relación de las temperaturas 75 y 95°C, esta última presento el mayor valor de diferencia en la comparación y, el efecto de la interacción del espesor de 1.5 mm en la relación de las temperaturas 85-95°C presentan diferencia del efecto de la interacción entre el espesor de 2.5 mm con la relación de las temperaturas 85-95°C, presentando el menor valor de comparación. Los resultados de los valores de comparación no presentaron una tendencia clara ya que no aumentaron o disminuyeron.

Tabla 7. Resultados de las comparaciones entre las diferencias de las medias para la densidad de aparente (ψ_4 , ψ_5 y ψ_6) respecto a los espesores de las láminas de batata.

Contraste	Valor del contraste
$\Psi_4 = B12 A1 - B12 A2$	168,517
$\Psi_5 = B13 A1 - B13 A2$	183,655
$\Psi_6 = B23 A1 - B23 A2$	15,138

Además, el test de Tukey mostró que la temperatura de 85°C difiere significativamente con respecto a las temperaturas de 75 y 95°C, y de igual forma los espesores de las láminas también difirieron significativamente entre estos.

En la Figura (10) se muestra la variación de la densidad aparente en función de la razón de humedad (MR) para las temperaturas y espesores de muestra estudiados. Se observa el efecto de la temperatura y el espesor sobre la densidad aparente, la cual disminuyó para todos los tratamientos. Inicialmente las muestras presentaron valores de 1010 a 1090 kg.m⁻³ a causa de la diferencia en el contenido de humedad inicial de las mismas. Las curvas de densidad aparente decrecieron a medida que el contenido de humedad decrecía, concordando con los resultados de otros autores (Lozano et al. 1980; Schultz et al. 2007; Aversa et al. 2011; Liu et al. 2012; Martynenko 2014). Normalmente se espera que esta propiedad incremente su valor durante el proceso de secado, debido a que los sólidos en el producto se concentran por la evaporación de la humedad del mismo, proporcionándole mayor cantidad de peso en relación a su volumen aparente (Ramos et al. 2004). Sin embargo, en este estudio se obtuvieron resultados contrarios. Este hecho se debe a que durante la eliminación de la humedad ocurre formación y aumento en el número de poros, los cuales se llenan de aire y una parte de estos se cierra inmediata y herméticamente, por lo tanto, no podrán ser contados dentro del volumen medido, lo cual hace que la densidad aparente disminuya por

existir más volumen del que se mide (Lozano et al. 1980,1983; Ramos et al. 2004, Martynenko 2014).

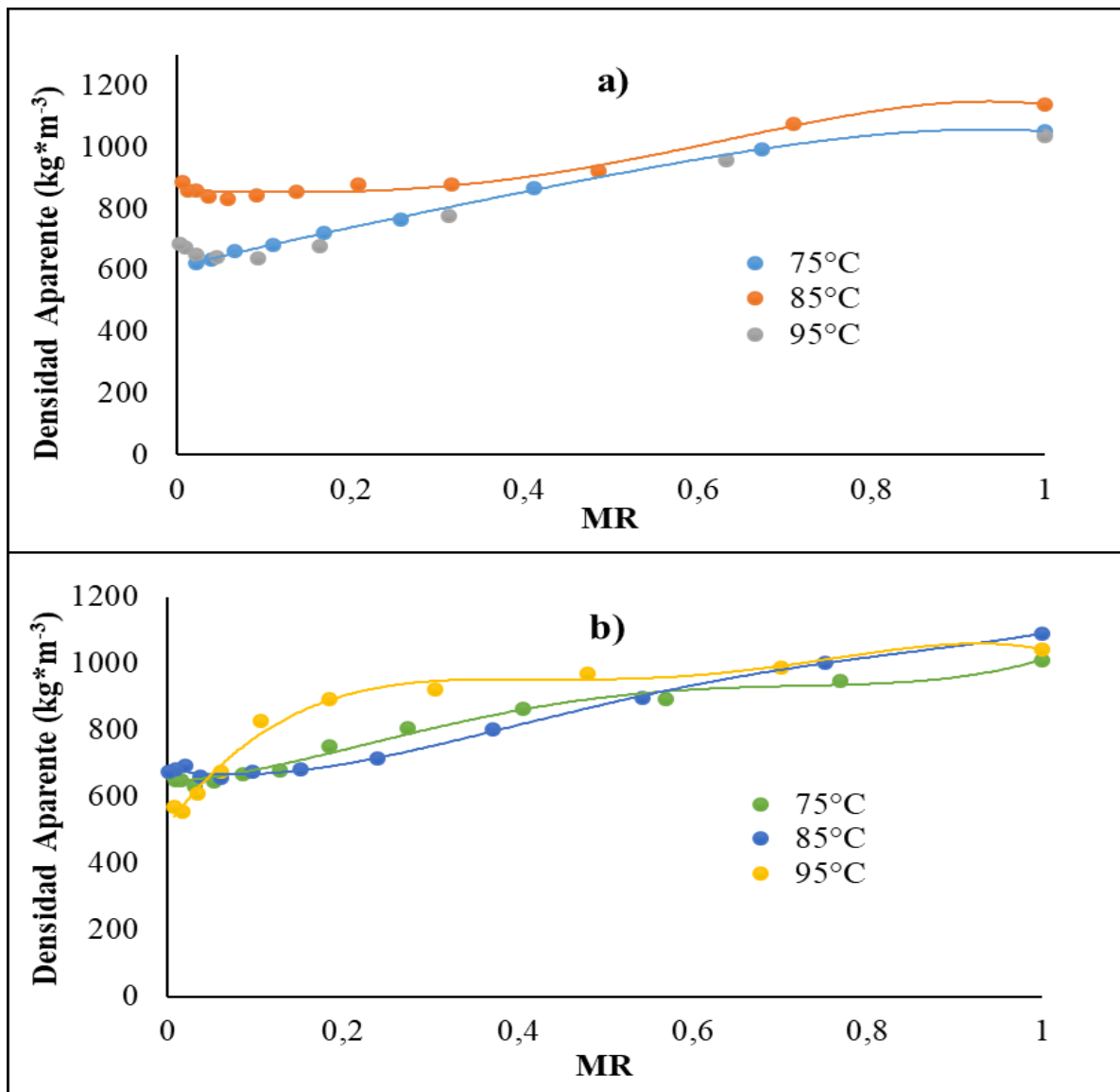


Figura 10. Densidad aparente *versus* razón de humedad (MR) durante el secado por Ventana Refractiva en batata. a) Espesor de 1.5mm; b) Espesor de 2.5mm.

Además, en la Figura (10a) también se puede resaltar un leve incremento de esta propiedad al final del secado, el cual es causado por el cambio de estado vítreo a estado rígido, produciéndose mayor

inmovilidad de la matriz alimenticia y a su vez un decrecimiento en el encogimiento de las muestras (Dissa et al. 2010; Aversa et al. 2011; Joardder et al. 2017).

Por otra parte, la Tabla (8) presenta los valores de las constantes para el modelo polinómico de cuarto grado propuesto en este estudio para cada uno de los tratamientos. Se observa que los valores de los coeficientes de determinación ajustado (R^2) estuvieron por encima de 0.9604, mostrando buen ajuste para este modelo, por lo tanto, el modelo predice adecuadamente el comportamiento de la porosidad. Resultados similares fueron obtenidos por Lozano et al. (1980), Koç et al. (2008) y Dissa et al. (2010).

Tabla 8. Modelo polinómico de cuarto grado para la densidad aparente en función de MR para los diferentes tratamientos durante el secado por Ventana Refractiva™ en batata.

TRATAMIENTO	Modelo polinómico de grado 4						
	k_0	k_1	k_2	k_3	k_4	R^2	R^2_{ajustado}
75°C-1.5 mm	610.8	700.9	-410	666.6	-516	0.9992	0.9983
85°C-1.5 mm	860.6	-76.19	-13.25	1699	-1331	0.9748	0.9604
95°C-1.5 mm	680.2	-971.3	6995	-10750	5085	0.9974	0.9947
75°C-2.5 mm	644.9	171.7	2332	-4502	2365	0.9851	0.9776
85°C-2.5 mm	681.8	-419.2	3223	-4002	1607	0.9968	0.995
95°C-2.5 mm	516	3527	-10260	12560	-5301	0.9863	0.9753

3.3.3. Porosidad

El análisis de varianza ($p < 0.05$) mostró que el espesor de las láminas de batata influyó significativamente sobre la porosidad de las muestras de batata durante el secado (Apéndice B, N°4). Esta propiedad aumento a medida que los espesores de las láminas de batata se acrecentaban.

Por otro lado, la interacción temperatura-espesor también presentó efecto significativo sobre la porosidad. En la Tabla (9) se presentan las comparaciones entre las diferencias de las medias de los espesores estudiados asociados a los respectivos niveles de la temperatura de proceso para la porosidad de las láminas de batata. El efecto de la interacción del espesor de 1.5 mm en la relación de las temperaturas 75-85°C presentan diferencia del efecto de la interacción entre el espesor de 2.5 mm con la relación de las temperaturas 75-85°C, de igual manera el efecto de la interacción del espesor de 2.5 mm con la relación de las temperaturas 75-95°C, esta última presento el mayor valor de diferencia en la comparación y el efecto de la interacción del espesor de 1.5 mm en la relación de las temperaturas 85-95°C presentan diferencia del efecto de la interacción entre el espesor de 2.5 mm con la relación de las temperaturas 85-95°C, presentando el menor valor de comparación. Los resultados de los valores de las comparaciones no presentaron una tendencia clara ya que no aumentaron o disminuyeron.

Tabla 9. Resultados de las comparaciones entre las diferencias de las medias para la porosidad (ψ_7 , ψ_8 y ψ_9) respecto a los espesores de las láminas de batata.

Contraste	Valor del contraste
$\Psi_7 = B12 A1 - B12 A2$	0,1081
$\Psi_8 = B13 A1 - B13 A2$	0,152293
$\Psi_9 = B23 A1 - B23 A2$	0,044193

Por su parte, el test de Tukey mostró que los espesores de las láminas de batata difieren significativamente entre sí.

En la Figura (11) se muestra el perfil de la porosidad en función de la razón de humedad durante la deshidratación de las láminas de batata. Como primero, se halló que la porosidad inicial de las muestras se encontró en el rango de 27 a 35% debido a las diferentes condiciones de humedad inicial en cada una de ellas. En el inicio del secado se observó un leve aumento en esta propiedad a medida que se evaporaba la humedad del producto, luego aumentó considerablemente hasta los momentos finales del periodo decreciente. Además, la porosidad final en las muestras registró valores entre 57 y 64%. Los resultados anteriores se deben a que generalmente cuando los alimentos son sometidos a procesos de deshidratación, estos suelen presentar formación y evolución de poros, hecho que causa incrementos en su porosidad debido a la remoción de la humedad y sustancias volátiles en el interior de estos poros (Zabalaga et al. 2016; Kaneman et al. 2019; Joardder y Karim 2019). Sin embargo, este incremento también podría estar relacionado con la exposición al calentamiento y a la disminución del volumen total del alimento (encogimiento), el cual es generado por la disminución del tamaño de las células, modificando así su microestructura (Koç et al. 2008; Hofsetz et al. 2010; Dissa et al. 2010). Resultados similares fueron encontrados por Hofsetz et al. (2007); Dissa et al. (2010), Liu et al. (2012) y Joardder y Karim (2019).

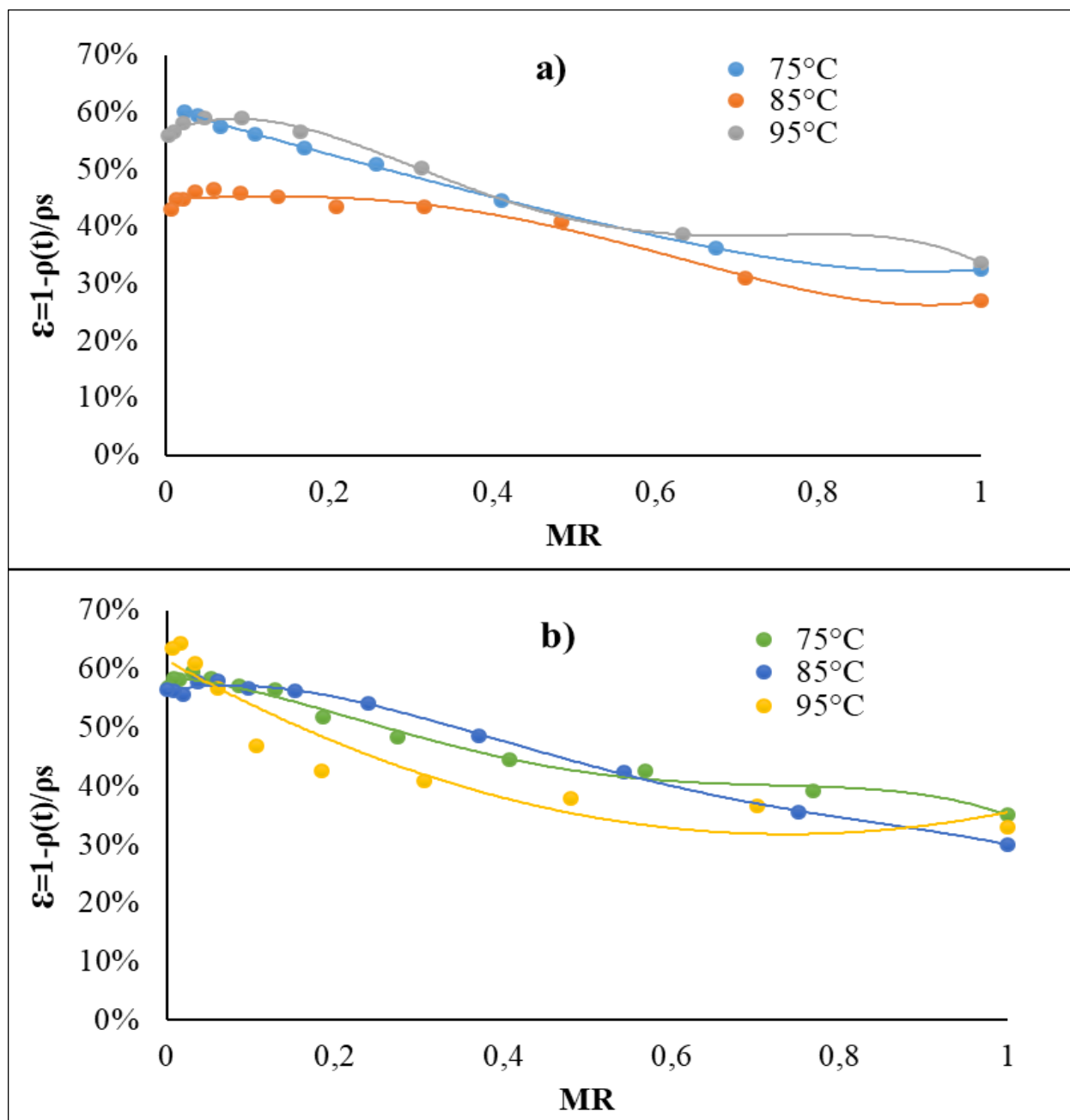


Figura 11. Porosidad versus razón de humedad (MR) durante el secado por Ventana Refractiva en batata. a) Espesor de 1.5 mm; b) Espesor de 2.5 mm.

Por otro lado, la Tabla (10) muestra los valores de las constantes del modelo polinómico de cuarto grado para la porosidad en función de la razón de humedad. Se observa que los valores de $R^2_{ajustado}$ fueron superiores a 0.9604, mostrando una buena correlación entre los datos y el modelo; por lo

tanto, este modelo predice satisfactoriamente el comportamiento de la porosidad durante el secado.

Resultados parecidos fueron obtenidos por Lozano et al. (1980) y Disa et al. (2010).

Tabla 10. Modelo polinómico de cuarto grado para la porosidad (%) en función de MR para los diferentes tratamientos durante el secado de batata por Ventana Refractiva™.

TRATAMIENTO	Modelo polinómico de grado 4						
	d_0	d_1	d_2	d_3	d_4	R^2	R^2_{ajustado}
75°C-1.5 mm	0.6082	-0.4496	0.2630	-0.4276	0.3310	0.9992	0.9983
85°C-1.5 mm	0.4480	0.0489	0.0085	-1.0900	0.8536	0.9748	0.9604
95°C-1.5 mm	0.5637	0.6230	-4.4870	6.8970	-3.2620	0.9974	0.9947
75°C-2.5 mm	0.5863	-0.1101	-1.4960	2.8880	-1.5170	0.9851	0.9776
85°C-2.5 mm	0.5627	0.2689	-2.0680	2.5670	-1.0310	0.9968	0.995
95°C-2.5 mm	0.6690	-2.263	6.5840	-8.0600	3.4000	0.9863	0.9753

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES

- Se observó que al aumentar la temperatura del proceso y disminuir el espesor de las muestras, las velocidades de secado aumentaron y se redujo el tiempo de secado.
- Se encontró que la difusividad efectiva de la humedad en la batata se incrementó con los aumentos de la temperatura y del espesor de las láminas. Adicionalmente, el coeficiente convectivo para la transferencia de masa aumentó linealmente con la temperatura de proceso.
- Se observó que el coeficiente de encogimiento aumentó cuando aumentó cuando el espesor de las muestras y, además, aumentó linealmente con respecto a la razón de humedad.
- La temperatura y el espesor de las láminas tuvieron efecto significativo sobre la densidad aparente. Esta propiedad disminuyó cuando el espesor de las muestras también lo hizo.
- El espesor de las láminas tuvo efecto significativo sobre la porosidad las láminas de batata. Esta propiedad aumentó cuando el espesor de las muestras también lo hizo.
- Un modelo polinómico de cuarto orden fue ajustado a las propiedades de densidad aparente y la porosidad de las láminas de batata *versus* la razón de humedad.

CAPÍTULO 5. RECOMENDACIONES

- Evaluar el efecto de la temperatura de transición vítrea sobre el encogimiento y la porosidad de las láminas de batata.
- Evaluar el efecto de la temperatura de secado y el espesor del producto sobre: capacidad y velocidad de rehidratación, textura y fuerza máxima de fractura.
- Comparar el efecto de la Ventana Refractiva con otros métodos de secado.
- Realizar estudios de microscopía óptica en el tamaño y forma de los poros

BIBLIOGRAFÍA

Abegunde, O., Mu, T., Chen, J. and Deng, F. (2013). Physicochemical Characterization of sweet potato starches popularly used in Chinese starch industry. *Food Hydrocol.* 33(2): 169-177.

Abonyi, B. (1999). Evaluation of Energy Efficiency and Quality Retention for the Refractance Window™ Drying System. Washington State University, Pullman, WA 99164-6120.

AGRONET. (2018). Red de información y comunicación del sector agropecuario colombiano [CD-ROM]. Internet: <http://www.agronet.gov.co/produccion-y-agronegocios>. [20 enero 2018].

Ahmed, M., Akter, M. and Eun, J. (2010). Peeling, drying temperatures, and sulphite-treatment affect physicochemical properties and nutritional quality of sweet potato flour. *Food Chemistry.* 121: 112-118.

Ahmed, N., Singh, J., Chauhan, H., Anjum, P. and Kour, H. (2013). Different Drying Methods: Their Applications and Recent Advances. *International Journal of Food Nutrition and Safety.* 4(1): 34-42.

Aina, A., Falade, K., Akingbala, J., et al. (2009). Physicochemical properties of twenty-one Caribbean sweet potato cultivars. *Food Science and Technology.* 44: 1696-1704.

Akinola, A., Shittu, A. and Ezeorah, S. (2017). Dehydration and Rehydration Characterization of Yam (*Dioscorea Rotundata*) Tuber Slices Dehydrated Using a Refractance Window™ Dryer. 12: 75-87.

Akinola, A. and Ezeorah, S. (2017). Evaluation of the Dehydration Kinetics of Cassava (*Manihot Esculenta*) Slices Dried Using a Refractance Window™ Dryer. Journal of Engineering Research. 22(1): 1-10.

Akinola, A. and Azeorah, S. (2018). Dehydration Kinetics of Cassava, Yam and Potato Slices Using a Refractance Window™ Dryer. Fouye Journal of Engineering and Technology. 3: 88-92.

Akinola, A., Adehounand, S. and Azeorah, S. (2018a). Effect of Temperature on Okra (*Abelmoschus esculentus*) Fruit Slices Dehydrated Using a Refractance Window™ Dryer. Journal of Engineering and Computer Science. 19(1): 13-21.

Akinola, A., Talabi, O. and Azeorah, S. (2018b). Effective Moisture Diffusivity and Activation Energy Estimation of Cucumber Fruit Slices Using a Refractance Window™ Dryer. Journal of the Association of Professional Engineers of Trinidad & Tobago. 46(2): 11-16.

Akinola, A., Ayo, D. and Azeorah, S. (2018c). Temperature Dependence of the Effective Moisture Diffusivity of Yam (*Dioscorea rotundata*) Slices Dried Using a Refractance Window™ Dryer. Journal of the Association of Professional Engineers of Trinidad and Tobago. 46(1): 30-34.

Akinola, A. and Azeorah, S. (2019). Moisture Diffusivity and Activation Energy Estimation of White Yam (*Dioscorea rotundata*) Slices Using Drying Data from a Refractance WindowTM Dryer. Journal of Engineering and Technology. 4(1): 102-106.

Akoetey, W., Britain, M. and Morawicki, R. (2017). Potential use of byproducts from cultivation and processing of sweet potatoes. Food Technology. 47(5). ISSN 1678-4596.
<http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20160610>

Albright, L. [Ed.]. (2009). Albright's Chemical Engineering Handbook. CRC Press Taylor & Francis Group. Indiana, USA. Pages: 1668-1676.

AOAC (2012). Official methods of analysis 19th ed. Association of official Analytical Chemist, Washington, DC., USA.

Arranz, F., Correa, E., Jiménez, H., Diezma, B., García, J., Robla, J. y Barreiro, P. (2011). Empleo de métodos numéricos para el ajuste de los coeficientes de difusividad (D) y convectivo de transferencia de masa (hm) en el secado de alimentos. Memorias I. 6to Congreso Ibérico de Agroingeniería. Universidad de Évora, Portugal, del 5 al 7 de septiembre.

Atu, L. (2013). Studies on Propagation Materials and Growing Conditions for Sweet potato [*Ipomoea batatas* (L.) Lam] Production. Thesis submitted for the degree of Master of Philosophy at University of Queensland. Queensland, Australia.

Austin D. (1978). The taxonomy, evolution and genetic diversity of sweet potatoes and related wild species. En: Gregory P. (ed.) Exploration, maintenance, and utilization of sweet potato genetic resources. CIP, Lima, Perú. pp. 27-60.

Aversa, M., Curcio, S., Calabrò, V. and Iorio, G. (2011). Measurement of the Water-Diffusion Coefficient, Apparent Density Changes and Shrinkage during the Drying of Eggplant (*Solanum Melongena*). International Journal of Food Properties. 14:3 523-537.

Aversa, M., Curcio, S., Calabrò, C. and Iorio, G. (2012). Experimental Evaluation of Quality Parameters during Drying of Carrot Samples. Food Bioprocess Technology. 5: 118-129.

Baeghbali, V., Niakousari, M. and Farahnaky, A. (2016). Refractance Window drying of pomegranate juice: Quality retention and energy efficiency. Food Science and Technology. 66: 34-40.

Baeghbali, V. and Niakousari, M. (2018). A review on mechanism, quality preservation and energy efficiency in Refractance Window drying a conductive hydro-drying technique. Journal Nutritional Food Technology. 1(2): 50-54.

Beckford, R. and Bartlett, J. (2015). Inclusion levels of sweet potato root meal in the diet of broilers I. Effect on performance, organ weights, and carcass quality. Poultry Science. 94: 1316-1322.

Berk, Z. (2009). Food Process Engineering and Technology. First edition. Copyright © 2009 Elsevier Inc. San Diego, USA. Pages: a) 460; b) 466 and c) 470.

Bernaert, N., Van Droogenbroeck, B., Van Pamel, E. and De Ruyck, H. (2019). Innovative refractance window drying technology to keep nutrient value during processing. Trends in Food Science & Technology. 84: 22-24.

Brennan, J. [Ed.]. (2006). Food Processing Handbook. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Weinheim, Germany. Páginas: 85-88.

Briki, S., Zitouni, B., Bechaa, B. and Amiali, M. (2019). Comparison of convective and infrared heating as means of drying pomegranate arils (*Punica granatum* L.). Heat and Mass Transfer. 55(6): <https://doi.org/10.1007/s00231-019-02644-8>

Caetano, P., Mariano, F., Mendonça, V., Furlaneto, K., Daiuto, E. and Lopes, R. (2018). Physicochemical and sensory characteristics of sweet potato chips undergoing different cooking methods. Food Science and Technology, Campinas. 38(3): 434-440.

Cárdenas, J. and Ayala, A. (2016). Evaluación de temperatura de secado por Ventana de Refractancia en Aloe vera (*Aloe barbandensis* M.). Revista Agronomía Colombiana. 34(1Supl.). doi: 10.15446/agron.colomb.v34n1supl.58275

Carrin, M. and Crapiste, G. (2008). Convective drying of foods. In: Ratti, C [editor]. Advances in food dehydration. Boca Raton, FL: CRC Press. Page: 123-152.

Castro, A., Mayorga, M. and Moreno, M. (2018). Mathematical modelling of convective drying of fruits: A review. *Journal of Food Engineering*. 223: 152-167.

Centro Internacional De La Papa (CIP). (1988). Mejoramiento de la batata (*Ipomoea batatas*) en Latinoamérica. Memorias del "Seminario sobre Mejoramiento de la batata (*Ipomoea batatas*) en Latinoamérica". CIP, Lima, junio 9-12, 1987. Página: 277.

Chen, Z. (2003). Physicochemical Properties of Sweet Potato Starches and Their Application in Noodle Products. Ph.D. Thesis Wageningen University, The Netherlands.

CIP (Centro Internacional de la Papa). (2020). Figures about sweet potato. Peru. Disponible en: <http://cipotato.org/sweetpotato/facts-2/>.

Clarke, P. (2004). REFRACTANCE WINDOW™ - “DOWNUNDER”. Memories of the 14th International Drying Symposium. São Paulo, Brazil, August 2004, Vol. B: 813-820.

Clemente, G. (2003). Efecto de la contracción en la cinética de secado de músculos de jamón. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, España.

Clifford, I., Kingsley, E., Chika, C. and Chinyere, I. (2014). Effects of Osmotic Dewatering and Oven Drying on β -Carotene Content of Sliced Light Yellow-Fleshed Sweet Potato (*Ipomoea batatas* L.). *Nigerian Food Journal*. 32 (2): 25-32.

Collazo, P., Morejón, Y., Fernández, L. and Vázquez, Y. (2018). Modelos matemáticos y experimentales para el análisis del secado solar de semillas. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 27(1).

Cosme, N. (2013). Manual técnico para el cultivo de batata (Camote o Boniato) en la provincia de Tucumán (Argentina).

Crank, J. (1975). The mathematics of diffusion. Editorial Oxford University press, Inglaterra, páginas: 60-61.

Cuq, B., Rondet, E. and Abecassis, J. (2011). Food powders engineering, between knowhow and science: constraints, stakes and opportunities. *Powder Technology*. 208(2): 244-251.

Da Costa, D., De Melo, A., Feitosa, R. and Alves, E. (2015). Sun drying of residual annatto seed powder. *Acta Scientiarum. Technology*. 37(1): 161-166.

De Lima, A., Queiroz, M. and Nebra, S. (2002). Simultaneous moisture transport and shrinkage during drying of solids with ellipsoidal configuration. *Chemical Engineering Journal*. 86: 85-93.

Diamante, L. and Munro, P. (1991). Mathematical modelling of hot air drying of sweet potato slices. *International Journal of Food Science and Technology*. 26: 99-109.

Diamante, L. and Munro, P. (1993). Mathematical Modelling Of the Thin Layer Solar Drying Of Sweet Potato Slices. *Solar Energy*. 51(4): 271-276.

Dissa, A., Desmorieux, H., Savadogo, P., Segda, B. and Koulidiati, J. (2010). Shrinkage, porosity and density behavior during convective drying of spirulina. *Journal of Food Engineering*. 97: 410-418.

Dos Santos, J., Lemos, D., Matos, M., Almeida, A. and Da Silva, G. (2012). Estudo da cinética de secagem de Batata-doce (*Ipomoea batatas*). *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*. 14 (4): 323-328.

Doymaz, I. (2011). Thin-layer drying characteristics of sweet potato slices and mathematical modelling. *Journal Heat Mass Transfer*. 47: 277-285.

Doymaz, I. (2012). Infrared drying of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) slices. *Journal Food Science Technology*. 49 (6): 760-766.

Engel, F. (1970). Explorations of the Chilca Canyon, Peru. *Current Anthropol*. 11: 55-58.

Erbay, Z. and Icier, F. (2010). A Review of Thin Layer Drying of Foods: Theory, Modeling, and Experimental Results. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 50: 441-464.

Erdoğan, F. (2005). Mathematical approaches for use of analytical solutions in experimental determination of heat and mass transfer parameters. *Journal of Food Engineering*. 68: 233-238.

FAOSTAT (Statistics division of Food and Agriculture Organization of the United Nations).
(2018). Disponible en: http://faostat3.fao.org/browse/Q/*/E.

Fan, K., Chen, L., He, J. y Yan, F. (2015). Characterization of Thin Layer Hot Air Drying of Sweet Potatoes (*Ipomoea batatas* L.) Slices. Journal of Food Processing and Preservation. 39(Issue 6): 1361-1371.

Flórez, D., Contreras, C. y Uribe, C. (2016). Perspectivas Tecnológicas y Comerciales para el Cultivo de Batata en Colombia. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), Mosquera, Colombia.

Foust, A., Wenzel, L., Clamb, C., Maus, L., Andersen, L., Wiley, J. and Sons. (2006). Principios de Operaciones Unitarias. Décima Reimpresión. Compañía Editorial Continental México. Páginas 460-462.

Freitas, S. and Pareek, S. (2018). Postharvest Physiological Disorders in Fruits and Vegetables. Boca Raton: Taylor & Francis. Págs: 719-748.

Fu, Z., Tu, Z., Zhang, L., Wang, H., Wen, Q. and Huang T. (2016). Actividades antioxidantes y polifenoles de hojas de batata (*Ipomoea batatas* L.) extraídas con solventes de diversas polaridades. Biociencia de los Alimentos. 15: 11-18.

Ganguli, S., Dean, D. and Benjamin, A. (2003). Preparation of biodegradable plastics based on nanoengineered sweet potato starch/mPE blends. In: Cohen, L.J., Ong, C., Arendt, C. (Eds.),

Advancing Materials in the Global Economy - Applications. Emerging Markets and Evolving Technologies, Long Beach, CA. 2545–2558.

Geankoplis, C. (1998). Procesos de transporte y operaciones unitarias, CECSA, México, pag. 580-618.

Guo, K., Liu, T., Xu, A., Zhang, L., Bian, Z. and Wei, C. (2019). Structural and functional properties of starches from root tubers of white, yellow, and purple sweet potatoes. Food Hydrocolloids. 89: 829-836.

Hall, M. and Phatak, S. (1993). 47-Sweet Potato (*Ipomoea batatas* L.) Genetic Improvement of Vegetable Crops. Pages: 693-708.

Hao, J., Chung, L., Xiao, F., Hong, X., Yan, L. and Zhen, G. (2015): Drying Kinetics and Evolution of Sample's Core Temperature and Moisture Distribution of Yam Slices (*Dioscorea alata* L.) during Convective Hot Air Drying. Drying Technology. DOI: 10.1080/07373937.2015.1105814

Harchegani, M., Varnamkhasti, M., Ghanbarian, D., Sadeghi, M. and Tohidi, M. (2015). Dehydration characteristics and mathematical modelling of lemon slices drying undergoing oven treatment. Heat Mass Transfer. DOI 10.1007/s00231-015-1546-y

Hariadi, H., Sunyoto, M., Nurhadi, B. and Karuniawan, A. (2020). Study of Drying Method Types on the Physicochemical Characteristics of Purple-Fleshed Sweet Potato Extract Powder. *Progress in Color, Colorants y Coatings*. 13: 41-51.

Hashem, H., Tayel, S., Younes, O. and Abdel, A. (2019). Effect of Refractance Window Drying Method on Quality Characteristics of Balady Menthol. *Journal Food and Dairy Science*. 10(8): 265- 269.

Heldman, D. and Lund, D. [Ed]. (2007). Handbook of Food Engineering, Second Edition. CRC Press Taylor and Francis Group. Pages: 639-641.

Hernández, Y. (2017). Deshidratación de manzanas tipo Granny Smith en Ventana Refractiva con pretamamiento de Deshidratación Osmótica y Campo eléctrico moderado. Memoria para optar el título de ingeniero Civil Químico, Universidad Técnica de Federico Santa María, Valparaíso-Chile.

Hofsetz, K., Costa, C., Dupas, M., Mayor, L. and Sereno, A. (2007). Changes in the physical properties of bananas on applying HTST pulse during air-drying. *Journal of Food Engineering*. 83: 531-540.

Hong, X., Hai, L., Xue, Y., Zhi, D., Zheng, L. and Zhen, G. (2009). Effects of Different Pretreatments on Drying Kinetics and Quality of Sweet Potato Bars Undergoing Air Impingement Drying. *International Journal of Food Engineering*. 5: Tema 5, Artículo 5.

Horta, G., Corrêa, P., Mendes, F., Duarte, A., Afonso, P. and Carvalho, S. (2011). Modeling of the shrinkage kinetics of coffee berries during drying. *Acta Scientiarum. Agronomy*. 33(3): 423-428.

Hou, F., Mu, T., Ma, M. and Blecker, C. (2019). Optimization of processing technology using response surface methodology and physicochemical properties of roasted sweet potato. *Food Chemistry*. 278: 136-143.

Huamán, Z. (1992). Botánica sistemática y morfología de la planta de batata o camote. *Boletín de Información Técnica* 25, Centro Internacional de la Papa, Lima, Perú. Pág. 22.

Ishida, H., Suzuno, H., Sugiyama, N., Innami, S., Tadokoro, T. and Maekawa, A. (2000). Evaluación nutritiva de componentes químicos de hojas, tallos y tallos de batata (*Ipomoea batatas* poir). *Food Chemistry*. 68(3): 359-367.

İzli, N. and Polat, A. (2020). Intermittent Microwave Drying of Apple Slices: Drying Kinetics, Modeling, Rehydration Ratio and Effective Moisture Diffusivity. *Tarım Bilimleri Dergisi - Journal of Agricultural Sciences*. 26: 32-41.

Joardder, M., Kumar, C. and Karim, M. (2017). Food structure: Its formation and relationships with other properties. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 57(6): 1190-1205. DOI: 10.1080/10408398.2014.971354

Joardder, M. and Karim, M. (2019). Development of a porosity prediction model based on shrinkage velocity and glass transition temperature. *Drying Technology*. DOI: 10.1080/07373937.2018.1555540

Jiang, Q., Liang, S., Zeng, Y., Lin, W., Ding, F., Li, Z., Cao, M., Li, Y., Ma, M. and Wu, Z. (2019). Morphology, structure and in vitro digestibility of starches isolated from (*Ipomoea batatas* (L.) Lam) by alkali and ethanol methods. *International Journal of Biological Macromolecules*. 125: 1147-1155.

Junqueira, J., Mendonça, K. and Corrêa, J. (2016). Microwave Drying of Sweet Potato (*Ipomoea batatas* (L.)) Slices: Influence of the Osmotic Pretreatment. *Defect and Diffusion Forum*. 367: 167-174.

Jusuf, M. and Ginting, E. (2014). The Prospects and Challenges of Sweet Potato as Bio-Ethanol Source in Indonesia. Elsevier Ltd. 173–179.

Kamenan, B., Ekoun, P. and Gbaha, P. (2019). Evolution of shrinkage, real density, porosity, heat and mass transfer coefficients during indirect solar drying of cocoa beans. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 18: 72-82.

Kitahara, K., Fukunaga, S., Katayama, K., Takahata, Y., Nakazawa, Y., Yoshinaga, M. and Guganuma, T. (2005). Physicochemical properties of sweet potato starches with different gelatinization temperatures. *Starch/Stärke*. 57: 473-479.

Kitahara, K., Nakamura, Y., Otani, M., Hamada, T., Nakayachi, O. and Takahata, Y. (2017). Carbohydrate components in sweet potato storage roots: their diversities and genetic improvement. Breed. Sci. 67: 62-72.

Koç, B., Eren, I. and Ertekin, F. (2008). Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: effect of drying method. Journal Food Engineering. 85: 340-349.

Komolafe, C., Ojediran, J., Ajao, F., Dada, O., Afolabi, Y., Oluwaleye, I. and Alake, A. (2019). Modelling of moisture diffusivity during solar drying of locust beans with thermal storage material under forced and natural convection mode. Case Studies in Thermal Engineering. 15: 100542.

Krokida, M. and Maroulis, Z. (1997). Effect of drying method on shrinkage and porosity. Drying Technology. 15: 2441-2458.

Kudadam, J. (2017). Simulación de la transferencia de calor transitoria durante el enfriamiento y calentamiento de batatas enteras (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) En condiciones de aire forzado. Applied Thermal Engineering, 1771-1778.

Kumar, Y., Tiwari, S. and Belorkar, S. (2015). Drying: An Excellent Method for Food Preservation. International Journal of Engineering Studies and Technical Approach. 1 (8).

Kurozawa, L., Hubinger. and Park, K. (2012). Glass transition phenomenon on shrinkage of papaya during convective drying. Journal of Food Engineering. 108: 43-50.

Lanzerstorfer, C. (2020). Apparent density of compressible food powders under storage conditions. *Journal of Food Engineering*. 276: 109897.

Lebot, V. (2009). Tropical root and tuber crops cassava, sweet potato, yams and aroids. CABI, Oxfordshire, UK. pp. 91-274.

Leiton, Y. (2012). Evaluación del método de secado por ventana de refractancia en pulpa de guayaba (*Psidium guajava*), Magister, Universidad del Valle, Santiago de Cali.

Leiva, D. (2012). Evaluación Del Efecto De La Combinación De Tecnologías De Deshidratación Aplicadas En Tejido De Piña Sobre El Consumo Energético Del Proceso Y La Calidad Del Producto Terminado. Maestría en Diseño Y Gestión De Procesos. Universidad de la Sabana, Colombia.

Lentzou, D., Boudouvis, A., Karathanos, V. and Xanthopoulos, G. (2019). A moving boundary model for fruit isothermal drying and shrinkage: An optimization method for water diffusivity and peel resistance estimation. *Journal of Food Engineering*. 263: 299-310.

Leon, J. (1976). Origin, evolution, and early dispersal of root and tuber crops, in Proceedings of the Fourth Symposium of the International Society for Tropical Root Crops, Cock, J., MacIntyre, R. and Graham, M., eds., International Development Research Centre, Ottawa, Canada, 20.

Lewis, M. (1987). Physical Properties of Foods and Food Processing Systems. Chichester: Ellis Horwood Ltd. Pages: 51-68.

Li, L., Liao, C. and Chin, L. (1994). Variability in test and physio-chemical properties and its breeding implications in sweet potato (*Ipomoea batatas*). Journal of the Agricultural Association of China, New Series 165, 19.

Li, X., Yang, H. and Lu, G. (2018). Acondicionamiento a baja temperatura combinado con almacenamiento en frío que induce un endulzamiento rápido de las raíces tuberosas del camote (*Ipomoea batatas* (L.) Lam) al tiempo que inhibe la lesión por frío. Postharvest Biology And Technology. 142: 1-9.

Liu, Q. (2004). Importance of sweetpotato in the security of food and energy in China. Oil Gas Sci. Technol. 9, 19.

Liu, G., Chen, J., Liu, M. and Wan, X. (2012). International Conference on Advances in Computational Modeling and Simulation: Shrinkage, porosity and density behaviour during convective drying of bio-porous material. Procedia Engineering. 31: 634-640.

Liu, P., Sun, S., Wang, W., Hou, H. and Dong, H. (2015). Effect of glycerol plasticizer on the Properties of sweet potato starch-based films. J. Chin. Cereals Oils Ass, 30: 15-20.

Llave, Y., Takemori, K., Fukuoka, M., Takemori, T., Tomita, H. and Sakai, N. (2016). Mathematical modeling of shrinkage deformation in eggplant undergoing simultaneous heat and mass transfer during convection oven roasting. Journal of Food Engineering. 178: 124-136.

Lozano J., Rotstein, E. and Urbicain M. (1980). Total porosity and open-pore porosity in the drying of fruits. *Journal of Food Science* 45: 1403-1407.

Lozano J., Rotstein, E. and Urbicain, M. (1983). Shrinkage, porosity and bulk density of food stuffs at changing moisture contents. *Journal of Food Science* 48: 1497–1502, 1553.

Magoon, R.E. (1986). Method and Apparatus for Drying Fruit Pulp and the Like. USA. Patent 4, 631,837.

Maroulis, Z., Saravacos, G., Panagiotou, N. and Krokida, M. (2001). Moisture Diffusivity Data Compilation for Foodstuffs: Effect of Material Moisture Content and Temperature. *International Journal of Food Properties*. 4(2): 225-237.

Martynenko, A. (2014). True, Particle, and Bulk Density of Shrinkable Biomaterials: Evaluation from Drying Experiments. *Drying Technology*. 32: 1319-1325.

Mayor, L. and Sereno, A. (2004). Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering*. 61: 373-386.

McCabe, W., Smith, J. and Harriott, P. (2007). OPERACIONES UNITARIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA. Editorial Mc Graw Hill, Séptima edición, México, Página: 388.

Mejía, A. (2011). Efecto de la deshidratación por radiación infrarroja sobre algunas características fisicoquímicas de interés comercial del aloe vera (*Aloe barbadensis*). Magister en diseño y gestión de procesos, énfasis en alimentos, Universidad de la Sabana, Chia-Cundinamarca.

Meng, Y., Wang, J., Fang, S. and Chen, J. (2011). Drying characteristics and mathematical modeling of hot air drying of cooked sweet potatoes. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering. 27(7): 387-392.

Mitreviski, V., Mijakovski, V., Popovski, F. and Popovski, D. (2012). Influence of Boundary Conditions on Particle Density. Journal of Agricultural Science and Technology. ISSN 1939-1250.

Morales, J. y Vélez, J. (2014). Deshidratación de frutas y hortalizas por ventana refractiva®. Revista de Ciencias y Tecnología de Alimentos. 13(2): 35-46.

Morales, A., Morales, A., Rodríguez, D., Pastrana, I. y Méndez, C. (2017). Origen, Evolución Y Distribución Del Boniato (*Ipomoea Batatas (L.)* Lam.). Una Revisión. Agricultura Tropical. 3(1): 1-13.

Moreira, R. and Sereno, A. (2003). Evaluation of mass transfer coefficients and volumetric shrinkage during osmotic dehydration of apple using sucrose solutions in static and non-static conditions. Journal of Food Engineering. 57: 25-31.

Moses, J., Norton, T., Alagusundaram, K., Norton, T. and Tiwari, B. (2014). Novel Drying Techniques For the Food Industry. Food Ingeneering Reviews, 6: 43-55.

Mu, T., Zhang, M., Sun, H. and Wang, C. (2017). Sweet Potato Processing Technology. Copyright © Science Publishing & Media Ltd. Beijing. Páginas: 55-56.

Mu, T. and Singh, J. (2019). Sweet Potato: Chemistry, Processing, and Nutrition. (2019). © Elsevier Inc. All rights reserved. Beijing. Páginas: 1-4.

Mujaffar, S. and Bynoe, S. (2019). Investigations into Hot Air and Microwave Drying of the West Indian Bay Leaf (*Pimenta racemose*). Memories 7th European Drying Conference. Politecnico Di Torino, Torino, July 10-12, paper 023.

Mujumdar, A. [Ed.]. (2006). Handbook of Industry Drying. Third Edition. CRC Press Taylor & Francis Group. U.K. Páginas: 4-22.

Namutebi, A., Hill, S., Farhat, I., et al. (2003). Physicochemical characteristics of starches from new breeds of sweet potatoes grown in Uganda. Afr. Crop Sci. Conf. Proc. 6: 568-576.

Narváez, L. y León, R. (2017). Determinación del Efecto del Ultrasonido Como Pretratamiento del Secado por Microondas de la Ahuyama (*Cucurbita maxima*). Tesis presentada en opción al título académico de Ingeniero de Alimentos. Universidad de Córdoba, Montería, Córdoba.

Nedunchezhiyan, M., Byju, G. and Jata, S. (2012). Sweet Potato Agronomy. Fruit, Vegetable and Cereal Science and Biotechnology.

Negera, A., Takele, F. and Wondimu, T. (2017). Evaluation of Integrated Management Practices of Sweet Potato Weevil (*Cylas Puncticollis* (Boheman) (Coleoptera: Brentidae) in Bako, Western Ethiopia. Journal of Natural Sciences Research. ISSN 2225-0921 (Online). Vol.7 (8).

Nguyen, T., Mondor, M. and Ratti, C. (2018). Shrinkage of cellular food during air-drying. Journal of Food Engineering. 230: 8-17.

Nindo, C., Sun, T., Wang, S., Tang, J. and Powers, J. (2003). Evaluation of drying technologies for retention of physical quality and antioxidants in asparagus (*Asparagus officinalis*, L.). LWT-Food Science and Technology. 36(Issue 5): 507-516.

Nindo, C., Tang, J., Powers, J. and Bolland, K. (2004). Energy consumption during Refractance Window evaporation of selected berry juices. International Journal of Energy Research, 28: 1089-1100.

Nindo, C. and Tang, J. (2007). Refractance Window dehydration technology: a novel contact drying method. Drying Technology. 25(1): 37-48.

Noranizan, M., Dzulkifly, M. and Russly, A. (2010). Effect of heat treatment on the physicochemical properties of starch from different botanical sources. International Food. 17: 127-135.

Ochoa, M., Kessler, A., Pirone, B., Márquez, C. y De Michelis, A. (2007). Analysis of shrinkage phenomenon of whole sweet cherry fruits (*Prunus avium*) during convective dehydration with very simple models. Journal of Food Engineering. 79: 657-661.

Ochoa, C., Quintero, P., Ayala, A. and Ortiz, M. (2012). Drying characteristics of mango slices using the Refractance Window™ technique. *Journal of Food Engineering*. 109: 69-75.

Ocoro, M. and Ayala, A. (2012). Evaluación de la técnica de ventana de refractancia en el secado de puré de papaya (*Carica papaya* L.). *Vitae*. 19(1): 72-74.

Oh, S., Jung, E. and Pyo, G. (2018). Quality characteristics and moisture sorption isotherm of three varieties of dried sweet potato manufactured by hot air semi-drying followed by hot pressing. *LWT - Food Science and Technology*. 64: 73-78.

Ojediran, J., Okonkwo, C., Adeyi, A., Adeyi, O., Olaniran, A., George, N. and Olayanju, A. (2020). Drying characteristics of yam slices (*Dioscorea rotundata*) in a convective hot air dryer: application of ANFIS in the prediction of drying kinetics. *Journal Heliyon*.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03555>

Omolola, A., Jideani, A. and Kapila, P. (2015). Drying kinetics of banana (*Musa* spp.) *Asociación Interciencia*. 40(6): 374-380.

Onwude, D., Hashim, N., Janius, R., Nawi, N. and Abdan. K. (2016). Modeling the Thin-Layer Drying of Fruits and Vegetables: A Review. *Comprehensive Review in Food Science and Food Safety*. 15: 599-618.

Onwude, D., Hashim, N., Abdan, K., Janius, R. and Chen, G. (2019). The effectiveness of combined infrared and hot-air drying strategies for sweet potato. *Journal of Food Engineering*. 241: 75-87.

Ortega, F. (2013). Determinación de los Parámetros Cinéticos de Transferencia de Masa, Color y Fuerza Máxima de Fractura de Rodajas de Yuca (*Manihot esculenta* Crantz) Sometidas a Freído Por Inmersión. Maestría en Ciencias Agroalimentarias con Énfasis en Ingeniería, Universidad De Córdoba, Montería-Córdoba.

Ortiz, M. (2014). Modelación matemática del secado de alimentos por el método de ventana de refractancia. Doctor en Ingeniería, Énfasis en Ingeniería de Alimentos, Universidad del Valle, Cali -Valle del Cauca.

Ortiz, B., Yáñez, E., Pacheco, F., Ruiz, H., García, M., Cortés, O. and Ruiz, O. (2015). Drying of shrinkable food products: Appraisal of deformation behavior and moisture diffusivity estimation under isotropic shrinkage. *Journal of Food Engineering*. 144: 138-147.

Ortiz, M., Gulati, T., Datta, A. and Ochoa, C. (2015). Quantitative understanding of Refractance WindowTM drying. *Food and Bioproducts Processing* 95: 237-253.

Panagiotou, N., Krokida, M., Maroulis, Z. and Saravacos, G. (2004). Moisture Diffusivity: Literature Data Compilation for Foodstuffs. *International Journal of Food Properties*. 7(2): 273-299.

Pereira, Cleide. (2012). Ferramentas Analíticas E Numéricas Para A Descrição Da Secagem De Sólidos Na Forma De Cilindros E De Elipsoides. Universidade Federal de Campina Grande. Programa De Pós-Graduação Em Engenharia De Processos.

Perry, R. and Green, D. (Eds.). (1997). Perry's Chemical Engineers' Handbook, 7a. edition. Nueva York: McGraw-Hill, 1; Shapter 20.

Pineda, M., Chacón, A. y Cordero, G. (2009). Efecto de las condiciones de secado sobre la cinética de deshidratación de las hojas de morera (*Morus alba*). Revista agronomía mesoamericana. 20(2): 275-283.

Pordesimo, L., Onwulata, C. and Carvalho, C. (2009). Food powder delivery through a feeder system: effect of physicochemical properties. Int. J. Food Prop. 12(3): 556-570.

Rafiee, S., Sharifi, M., Keyhani, A., Omid, M., Jafari, A., Mohtasebi, S. and Mobli, H. (2010). Modeling Effective Moisture Diffusivity of Orange Slice (*Thompson Cv.*), International Journal of Food Properties. 13(1): 32-40.

Rahimi, J., Singh, A., Olusola, P., Adedeji, A., Ngadi, M. and Raghavan, V. (2013). Effect of Carboxymethyl Cellulose Coating and Osmotic Dehydration on Freeze Drying Kinetics of Apple Slices. Journal Food. 2: 170-182.

Rajoriya, D., Shewale, S. and Umesh, H. (2019). Refractance Window Drying of Apple Slices: Mass Transfer Phenomena and Quality Parameters. *Food and Bioprocess Technology*. 12 (Issue 10): 1646-1658.

Ramirez, D. (2012). Evaluación Del Efecto De La Combinación De Tecnologías De Deshidratación Aplicadas En Tejido De Piñas Sobre El Consumo Energético Del Proceso Y La Calidad Del Producto Terminado. Bogotá, Colombia.

Ramos, I., Brandao, T. and Silva, C. (2003). Structural Changes During Air Drying of Fruits and Vegetables. *Food Science and Technology International*. 9(3): 201-206.

Ramos, P., Paz, M., Caballero, A., Morales, B., Basurto, F. and Palacios, G. (2014). Snack's tipo Chips con base en Camote morado *Ipomoea batatas* L. (Convolvulaceae), evaluados sensorialmente. *Lacandonia*. 8(1): 31-36.

Ratti, C. (1994). Shrinkage during drying of foodstuffs. *Journal Food Engineering*. 23 (1): 91-105.

Régner, C., Bocage, B., Archimède, H., Noblet, J. and Renaudeau, D. (2013). Digestive utilization of tropical foliages of cassava, sweet potatoes, wild cocoyam and erythrina in Creole growing pigs. *Animal Feed Science and Technology*. 180 (Issues 1-4): 44-54.

Rodríguez, J., Méndez, L., López, A. and Sandoval, S. (2012). True Density and Apparent Density during the Drying Process for Vegetables and Fruits: A Review. *Journal of Food Science*. doi: 10.1111/j.1750-3841.2012.02990

Rodríguez, P., Carruthers, T., Wood, J., Williams, B., Weitemier, K., Kronmiller, B., Ellis, D., Anglin, N., Longway, L., Harris, S., Rausher, M., Kelly, S., Liston, A. and Escocia, R. (2018). Reconciling Conflicting Phylogenies in the Origin of Sweet Potato and Dispersal to Polynesia. *Current Boilogy*. 28(8): 1246-1256.

Rodríguez, T., Brito, K. and Leite, E. (2019). Sweet potato roots: Unrevealing an old food as a source of health promoting bioactive compounds – A review. *Trends in Food Science & Technology*. 85: 277-286.

Rodrigues, T., Landi, C. and Leonel, M. (2020). Gelatinized sweet potato starches obtained at different preheating temperatures in a spray dryer. *International Journal of Biological Macromolecules*. 19(15): 1339-1346.

Rotimi, R. (2012). Effects of pre-treatments on drying kinetics of sweet potato slices. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 14(3): 136-145.

Sabarez, H. (2012). Modelado computacional de los fenómenos de transporte que ocurren durante el secado convectivo de ciruelas pasas. *Journal Food Engineering*. 111(2): 279-288.

Sabarez, H. (2014). Modelado matemático de los fenómenos de transporte acoplado y desarrollo del color: acabado de secado de sultanas enrejadas. *Secado Technol*. 32: 578-589.

Sabarez, H. (2016). Drying of Food Materials. Reference Module in Food Science. SN-9780081005965. DO: 10.1016/B978-0-08-100596-5.03416-8

SAC (Sociedad de Agricultores de Colombia). (2011). El Cultivo De La Batata [Pdf]. Recuperado de: <http://www.sac.org.co/images/contenidos/Cartillas/Cartilla%20Batata.pdf>.

Sagar, V. and Suresh, P. (2010). Recent advances in drying and dehydration of fruits and Vegetables: a review. Journal Food Scientists and Technologists. 47(1): 16-25.

Sagar, N. and Subba, R. (2018). Evaluation of drying behavior of sweet potato slices in convective air dryer. International Journal of Chemical Studies. 6(3): 2813-2815.

Saha, B., Bucknall, M., Arcot, J. and Driscoll, R. (2018). Derivation of two layer drying model with shrinkage and analysis of volatile depletion during drying of banana. Journal of Food Engineering. 226: 42-52.

Salehi, F. and Kashaninejad, M. (2018). Modelado de la cinética de pérdida de humedad y cambios de color en la superficie de la rodaja de limón durante el secado combinado de vacío por infrarrojo. Information Processing In Agriculture. 5(4): 516-523.

Satyanarayan, D. and Vijaya, R. (2012). Advancements in Drying Techniques for Food, Fiber, and Fuel. Drying Technology: An International Journal. 30:11-12, 1147-1159.

Schultz, E., Mazzuco, M., Machado, R., Bolzan, A., Quadri, M.B. and Quadri, M.G. (2007). Effect of pre-treatments on drying, density and shrinkage of apple slices. *Journal of Food Engineering*. 78: 1103-1110.

Shafiur, M. [Ed]. (2007). Handbook of food preservation. Segunda edición. Indiana, USA. CRC Press Taylor & Francis Group.

Shahari, N., Jamil, N. and Rasmani, K. (2016). Comparative Study of Shrinkage and Non-Shrinkage Model of Food Drying. *Journal of Physics: Conference Series* 738 012087. doi:10.1088/1742-6596/738/1/012087

Silayo, V., Laswai, H., Mkuchu, J. and Mpagalile, J. (2003). Effect of sun drying on some quality characteristics of sweet potato chips. *Africa Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*. 3(2): 1-10.

Singh, S., Raina, C., Bawa, A. and Saxena, D. (2006). Effect of Pretreatments on Drying and Rehydration Kinetics and Color of Sweet Potato Slices. *Drying Technology: An International Journal*. 24(11): 1487-1494.

Singh, N. and Pandey, R. (2012). Convective air drying characteristics of sweet potato cube (*Ipomoea batatas* L.). *Food and Bioproducts Processing*. 90: 317-322.

Souza, D., Resende, O., Moura, L., Ferreira (Jr), W. and Andrade, J. (2019). Drying kinetics of the sliced pulp of biofortified Sweet Potato (*Ipomoea batatas* L.). Engenharia Agrícola. 39(2): 176-181.

Sugri, I., Maalekuu, B., Gaveh, E. y Kusi, F. (2019). Los índices de composición y vida de anaquel de la Batata se mejoraron significativamente con el desmantelamiento previo a la cosecha. Annals of agricultural sciences. <https://doi.org/10.1016/j.aos.2019.03.002>

Sun, H., Mu, T., Xi, L., Zhang, M. and Chen J. (2014). Sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) leaves as nutritional and functional foods. Food Chemistry. 156: 380-389.

Taira, J., Taira, K., Ohmine, W. y Nagata, J. (2013). Determinación de minerales y actividad de oxidación anti-LDL de hojas de batata (*Ipomoea batatas* L.). Composition and Food Analysis. 29(2): 117-125.

Taiwo, K. and Baik, O. (2007). Effects of pre-treatments on the shrinkage and textural properties of fried sweet potatoes. LWT - Food Science and Technology. 40(Issue 4): 661-668.

Takamine, K., Abe, J., Iwaya, A., Maseda, S. and Hizukuri, S. (2000). A new manufacturing process for dietary fiber from sweet potato residue and its physical characteristics. Journal Appl. Glycosci. 47(1): 67-72.

Tang, Y., Cai, W. and Xu, B. (2015). Profiles of phenolics, carotenoids and antioxidative capacities of thermal processed white, yellow, orange and purple sweet potatoes grown in Guilin, China. Food Science and Human Wellness. 4: 123-132.

Tindall, H. (1983). Convolvulaceae, in Vegetables in the Tropics. Macmillan Press, London. Pág 97.

Torregrosa, A. (2013). Determinación De La Influencia De La Temperatura Y Velocidad Del Aire Sobre Las Cinéticas De Secado De Tres Variedades De Yuca Procesadas En La Planta Instalada En La Vereda Los Algarrobos. Maestría en Ciencias Agroalimentarias con Énfasis en Ingeniería, Universidad De Córdoba, Montería-Córdoba.

Torquato, A., Rodrigues, I., Pascual, Irais., Rosa, W. and Da Silveira, M. (2017). Potential for sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) Single crosses to improve ethanol production. Chapingo Serie Horticultura. 23(1): 59-74.

Treybal, R. (1980). Operaciones de transferencia de masa. Editorial Mc Graw Hill chemical engineering series, segunda edición. New York. Pages:

Trivedi, M., D'costa, V., Shitut, J. and Srivastav, S. (2017). Refractance Window Technology A Promising Drying Technique for the Food Industry. International Journal of Innovative and Emerging Research in Engineering. Vol (4), issue 1.

Vallous, N., Gavrielidou, M., Karapantsios, T. and Koatoglou, M. (2002). Performance of a double drum dryer for producing pregelatinized maize starches. *Journal of Engineering*. 51: 171-183.

Vega, H., Gongora, M. and Barbosa, G. (2001). Advances in dehydration of Food. *Journal of Engineering Food*. 49: 271-289.

Vidal, A., Zaucedo, A. y Ramos, M. (2018). Propiedades nutrimentales del camote (*Ipomoea batatas* L.) y sus beneficios en la salud humana. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, vol. 19, núm. 2, 2018.

Wang, S., Nie, S. and Zhu, F. (2016). Review: Chemical constituents and health effects of sweet potato. *Food Research International*. 89: 90-116.

Widodo, Y., Wahyuningsih, S. and Ueda, A. (2015). Second Humboldt Kolleg in conjunction with International Conference on Natural Sciences, HK-ICONS 2014: Sweet Potato Production for Bio-ethanol and Food Related Industry in Indonesia: Challenges for Sustainability. *Procedia Chemistry*. 14: 493-500.

Wilson, L. & Lowe, S. (1973). Anatomy of root system in West Indian sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) Cultivars. *Annals of Botany*. 37(151): 633-&.

Woolfe, J. (1992). Sweet potato: an untapped food resource, University of Cambridge, London, U.K.

Yamaguchi, M. (1983a). Origin and evolution of vegetables, in World Vegetables, Principles, Production and Nutritive Values, AVI, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 15.

Yamaguchi, M. (1983b). Sweet potato, in World Vegetables, Principles, Production and Nutritive Values, AVI, Van Nostrand Reinhold Company, New York. Página: 123.

Yildiz, A., Palazoğlu, T. and Erdoğan, F. (2007). Determination of heat and mass transfer parameters during of potato slices. Journal of Food Engineering. 79: 11-17.

Zabalaga, R., La Fuente, C. and Tadini, C. (2016). Experimental determination of thermophysical properties of unripe banana slices (*Musa Cavendishii*) during convective drying. Journal Food Engineering. 187: 62-69.

Zaccari, F., Cabrera, M. and Saadoun, A. (2018). Sweet Potato and Squash Storage. © 2018 Elsevier Inc. All rights reserved, Uruguay. Págs: 1-9.

Zaidul, I., Norulaini, N., Mohd, A., Yamauchi, H. and Noda, T. (2007). RVA analysis of mixtures of wheat flour and potato, sweet potato, yam, and cassava starches. Carbohydrate Polym. 69: 784-791.

Zhang, D. and Li, X. (2004). Sweet potato as animal feed: the perspective of crop improvement for nutrition quality. In: Fuglie, K.O., Hermann, M. (Eds.), Sweet potato Post-Harvest Research and Development in China. International Potato Center (Press-Run 300), Bogor. 26–39.

Zhang, M., Bhandary, B. and Fang, Z. (2017). Advances in Drying Science and Technology: Handbook of Drying of Vegetables and Vegetable Products. CRC Press, Taylor & Francis Group. Páginas: a) 173-176; b) 350-373.

Zhao, L., Liu, G., You, M., et al. (2009). Study on the relationship between the properties of starch and its vermicelli quality. Science and Technology Food Industry. 30(12): 90-92.

Zhu, A. and Jiang, F. (2014). Modeling of mass transfer performance of hot air drying of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) slices. Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly. 20(2): 171-181.

Zhu, F., Yang, X., Cai, Y., Bertoft, E. and Corke, H. (2011). Physicochemical properties of sweet potato starch. Starch/Stärke. 63: 249-259.

Zhu, F. and Wang, S. (2014). Physicochemical properties, molecular structure, and uses of sweet potato starch. Trends in Food Science & Technology. 36 (issue 2): 68-78.

Zogzas, N., Maroulis, Z. and Marinos-Kouris, D. (1994). Densities, shrinkage and porosity of some vegetables during air-drying. Drying Technology. 12: 1653-1666.

Zogzas, N., Maroulis, Z. and Marinos-Kouris, D. (1996). Moisture diffusivity data compilation in food stuffs. Drying Technology-An International Journal. 14: 2225-2253.

Zotarelli, M., Mattar, B. and Borges, J. 2015. Effect of process variables on the drying rate of mango pulp by Refractance window. *Food Research International*. 69: 410–417.

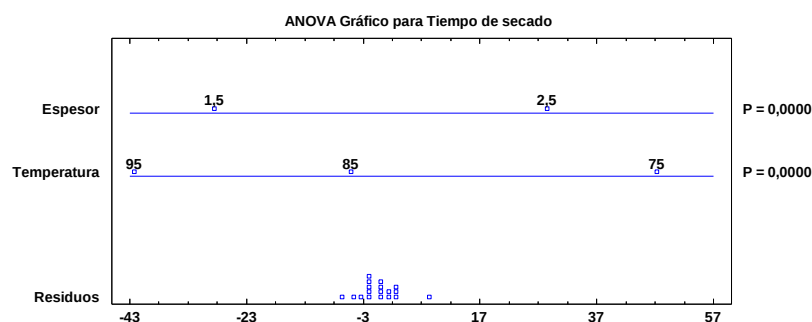
APÉNDICES

APÉNDICE A. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS PARA EL TIEMPO DE SECADO

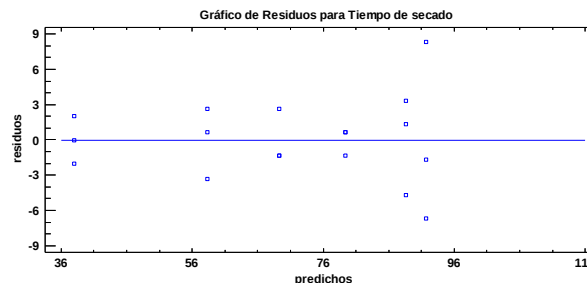
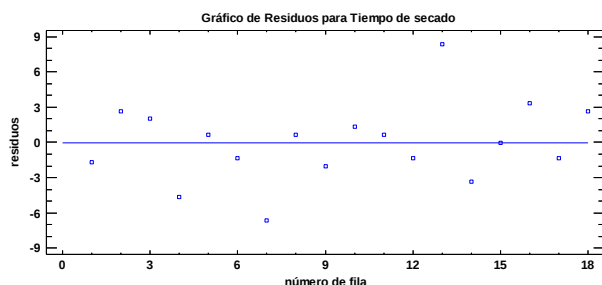
Pruebas de Normalidad para Tiempo de secado

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,936668	0,258477

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que Tiempo de secado proviene de una distribución normal con 95% de confianza.



Prueba de independencia y homocedasticidad



Análisis de Varianza para Tiempo de secado - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Temperatura	4034,78	2	2017,39	126,53	0,0000
B:Espesor	1216,89	1	1216,89	76,32	0,0000
INTERACCIONES					
AB	930,778	2	465,389	29,19	0,0000
RESIDUOS	191,333	12	15,9444		
TOTAL (CORREGIDO)	6373,78	17			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Pruebas de Múltiple Rangos para Tiempo de secado por Temperatura

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Temperatura	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
95	6	53,6667	1,63016	X
85	6	68,8333	1,63016	X
75	6	90,1667	1,63016	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
75 - 85	*	21,3333	6,16737
75 - 95	*	36,5	6,16737
85 - 95	*	15,1667	6,16737

* indica una diferencia significativa.

Pruebas de Múltiple Rangos para Tiempo de secado por Espesor

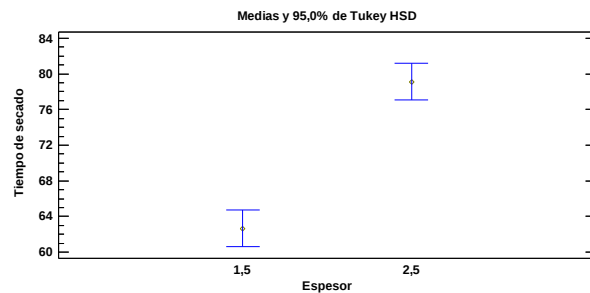
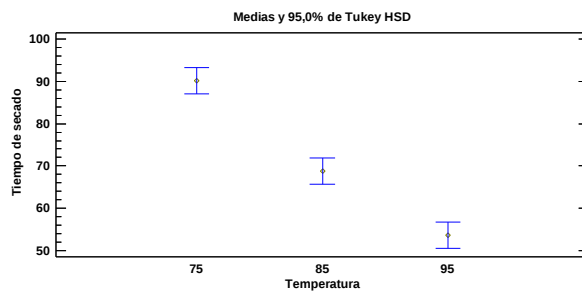
Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Espesor	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
1,5	9	62,6667	1,33102	X
2,5	9	79,1111	1,33102	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
1,5 - 2,5	*	-16,4444	4,10128

* indica una diferencia significativa.

Análisis de medias por tratamiento



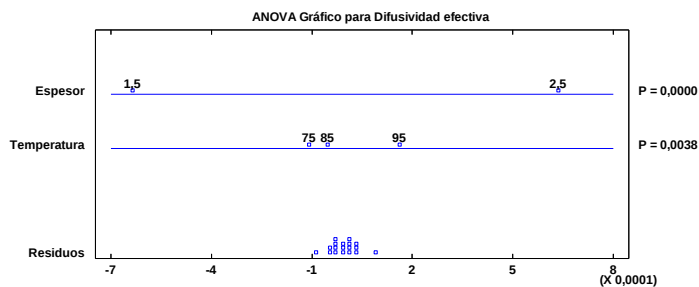
APÉNDICE B. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS PARA LAS PROPIEDADES MEDIDAS

1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA DIFUSIVIDAD EFECTIVA DE LA HUMEDAD

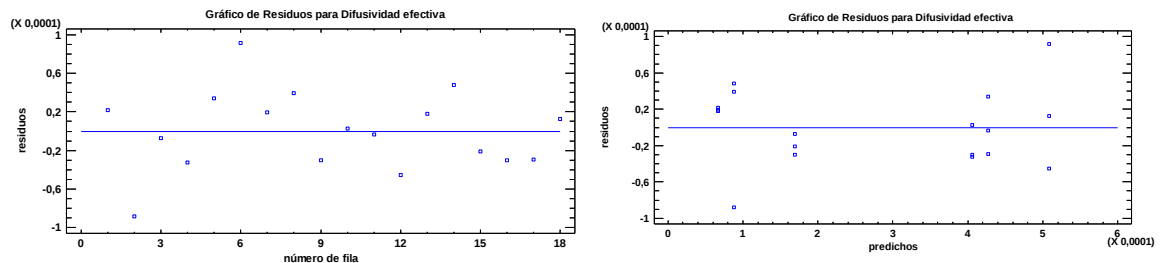
Pruebas de Normalidad para Difusividad efectiva

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,898607	0,0545212

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que Difusividad efectiva proviene de una distribución normal con 95% de confianza.



Prueba de independencia y homocedasticidad



Análisis de Varianza para Difusividad efectiva - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Temperatura	3,49996E-8	2	1,74998E-8	8,72	0,0046
B:Espesor	5,18092E-7	1	5,18092E-7	258,20	0,0000
INTERACCIONES					
AB	4,65027E-9	2	2,32513E-9	1,16	0,3466
RESIDUOS	2,4079E-8	12	2,00659E-9		
TOTAL (CORREGIDO)	5,8182E-7	17			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Pruebas de Múltiple Rangos para Difusividad efectiva por Temperatura

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Temperatura	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
75	6	0,000236533	0,0000182875	X
85	6	0,000257668	0,0000182875	X
95	6	0,000338833	0,0000182875	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
75 - 85		-0,0000211346	0,0000691869
75 - 95	*	-0,0001023	0,0000691869
85 - 95	*	-0,0000811654	0,0000691869

* indica una diferencia significativa.

Pruebas de Múltiple Rangos para Difusividad efectiva por Espesor

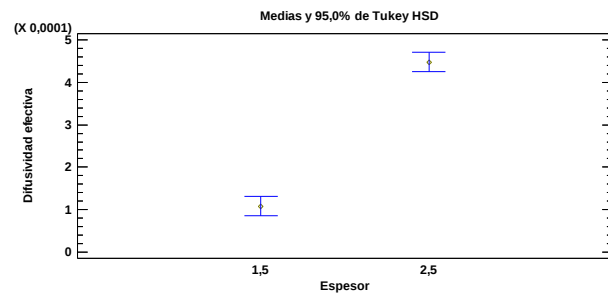
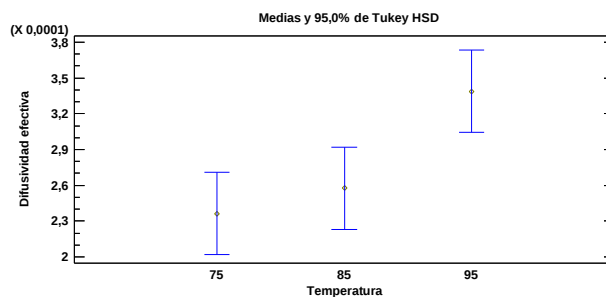
Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Espesor	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
1,5	9	0,000108023	0,0000149316	X
2,5	9	0,000447333	0,0000149316	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
1,5 - 2,5	*	-0,00033931	0,0000460091

* indica una diferencia significativa.

Análisis de medias por tratamiento

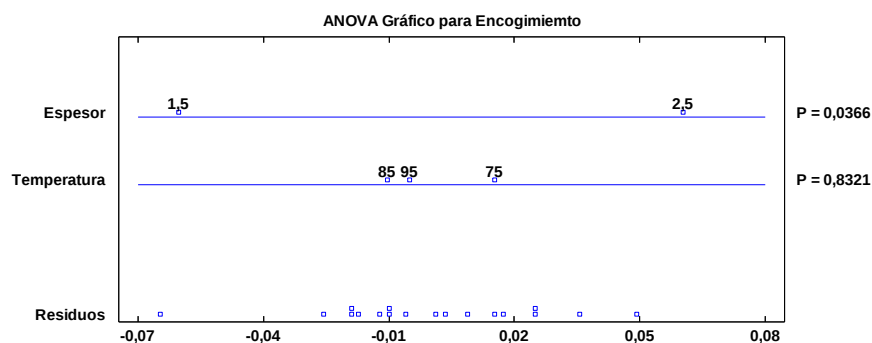


2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA EL ENCOGIMIENTO

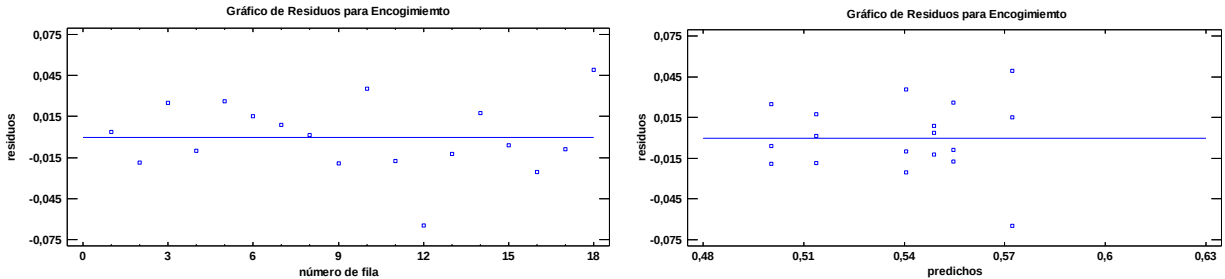
Pruebas de Normalidad para Encogimiento

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,969877	0,777407

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que Encogimiento proviene de una distribución normal con 95% de confianza.



Prueba de independencia y homocedasticidad



Análisis de Varianza para Encogimiento - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Temperatura	0,000367967	2	0,000183984	0,19	0,8321
B:Espesor	0,00544786	1	0,00544786	5,53	0,0366
INTERACCIONES					
AB	0,00491558	2	0,00245779	2,49	0,1242
RESIDUOS	0,0118262	12	0,00098552		
TOTAL (CORREGIDO)	0,0225576	17			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Pruebas de Múltiple Rangos para Encogimiento por Espesor

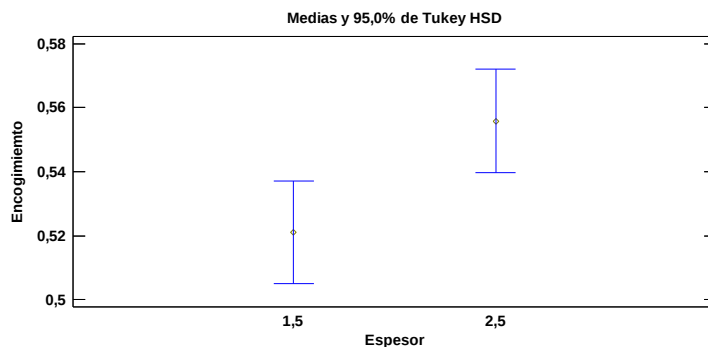
Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Espesor	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
1,5	9	0,521004	0,0104643	X
2,5	9	0,555798	0,0104643	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
1,5 - 2,5	*	-0,0347942	0,0322439

* indica una diferencia significativa.

Análisis de medias por tratamiento

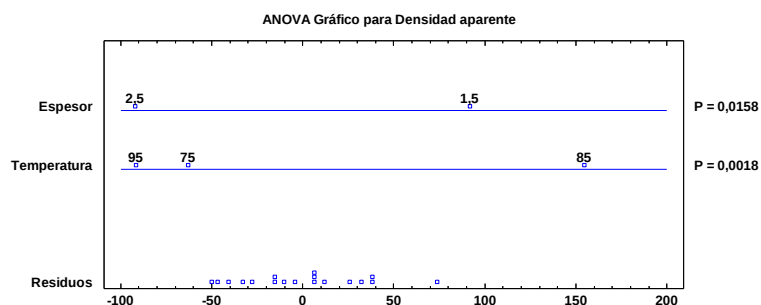


3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA DENSIDAD APARENTE

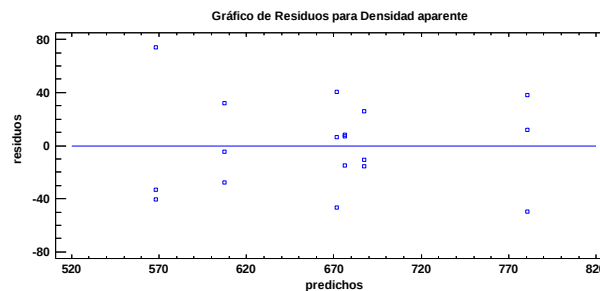
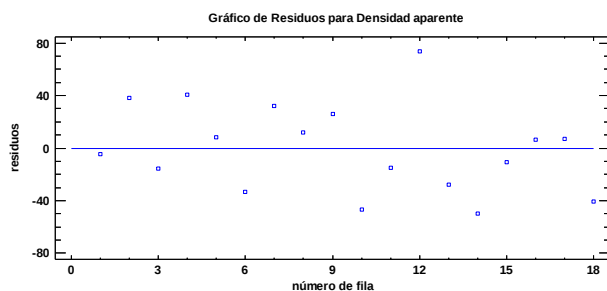
Pruebas de Normalidad para Densidad aparente

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,967911	0,741419

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que Densidad aparente proviene de una distribución normal con 95% de confianza.



Prueba de independencia y homocedasticidad



Análisis de Varianza para Densidad aparente - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Temperatura	36296,9	2	18148,4	11,28	0,0018
B:Espesor	12688,9	1	12688,9	7,89	0,0158
INTERACCIONES					
AB	31177,7	2	15588,9	9,69	0,0031
RESIDUOS	19308,5	12	1609,04		
TOTAL (CORREGIDO)	99472,0	17			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Pruebas de Múltiple Rangos para Densidad aparente por Temperatura

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Temperatura	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
95	6	627,822	16,376	X
75	6	639,431	16,376	X
85	6	728,353	16,376	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
75 - 85	*	-88,9223	61,9553
75 - 95		11,6088	61,9553
85 - 95	*	100,531	61,9553

* indica una diferencia significativa.

Pruebas de Múltiple Rangos para Densidad aparente por Espesor

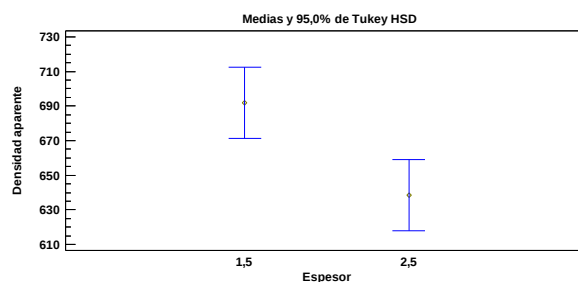
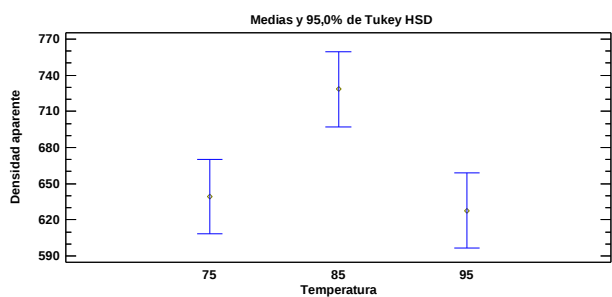
Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Espesor	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
2,5	9	638,651	13,371	X
1,5	9	691,753	13,371	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
1,5 - 2,5	*	53,1013	41,2001

* indica una diferencia significativa.

Análisis de medias por tratamiento

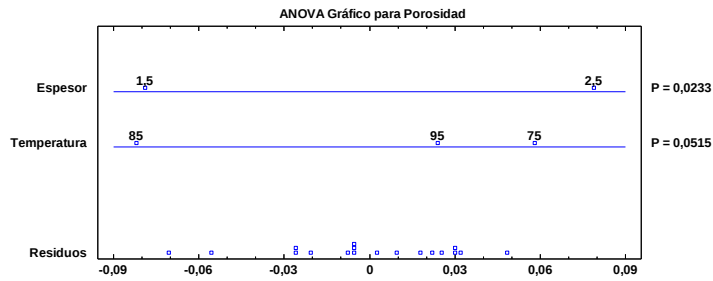


4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA POROSIDAD

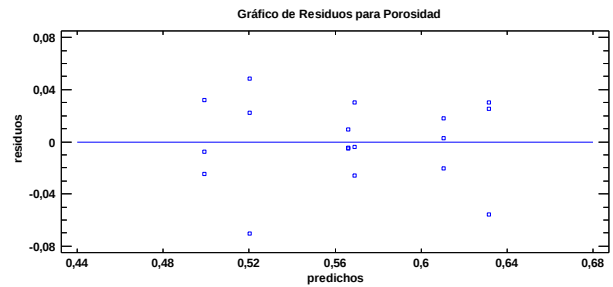
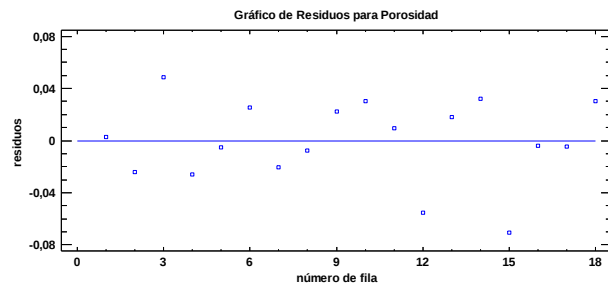
Pruebas de Normalidad para Porosidad

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,967006	0,724609

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que Porosidad proviene de una distribución normal con 95% de confianza.



Prueba de independencia y homocedasticidad



Análisis de Varianza para Porosidad - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Temperatura	0,0106159	2	0,00530794	3,84	0,0515
B:Espesor	0,009341	1	0,009341	6,75	0,0233
INTERACCIONES					
AB	0,0184159	2	0,00920794	6,66	0,0113
RESIDUOS	0,0165963	12	0,00138303		
TOTAL (CORREGIDO)	0,0549691	17			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Pruebas de Múltiple Rangos para Porosidad por Espesor

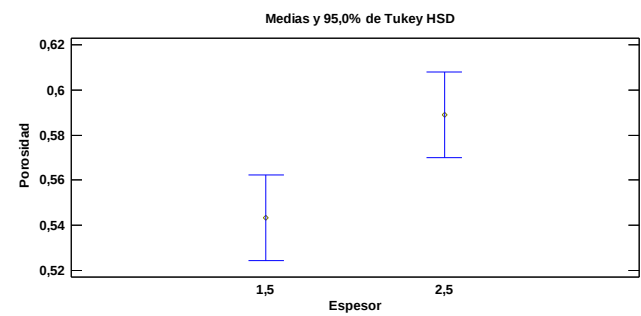
Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

Espesor	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
1,5	9	0,543416	0,0123964	X
2,5	9	0,588977	0,0123964	X

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
1,5 - 2,5	*	-0,0455607	0,0381971

* indica una diferencia significativa.

Análisis de medias por tratamiento



APÉNDICE C. ANÁLISIS DE REGRESIÓN NO LINEAL PARA LAS PROPIEDADES MEDIDAS.

1. ANÁLISIS DE REGRESIÓN DE LA CINÉTICA DE PÉRDIDA DE HUMEDAD.

I. TRATAMIENTO N°1 (75°C-1.5 mm)

Resultados de la Estimación

			Intervalo Confianza α		95,0%
		Error Estándar	Asintótico		
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior	
a	1,01851	0,00579775	1,00664	1,03039	
b	2,98009	0,02674	2,92531	3,03486	

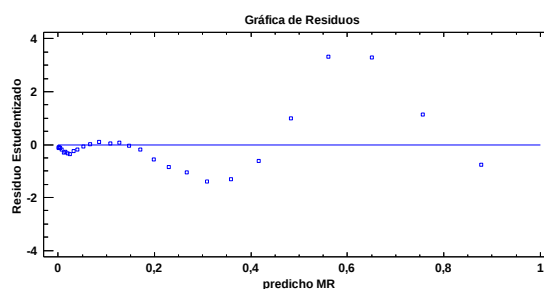
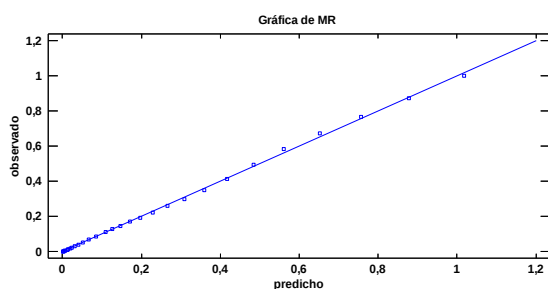
Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	4,00953	2	2,00476
Residuo	0,0020443	28	0,0000730106
Total	4,01157	30	
Total (Corr.)	2,37271	29	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
N	30	
CME	0,0000730106	
MAE	0,00530472	
MAPE		
ME	-0,00097155	
MPE		

R-Cuadrada = 99,9138 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,9108 por ciento; Error estándar del est. = 0,00854463; Error medio absoluto = 0,00530472; Estadístico Durbin-Watson = 0,508947; Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,661474



II. TRATAMIENTO N°2 (85°C-1.5 mm)

Resultados de la Estimación

			Intervalo Confianza α		95,0%
		Error Estándar	Asintótico		
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior	
a	1,01551	0,00371851	1,00801	1,023	
b	-4,48365	0,0281978	-4,54048	-4,42682	

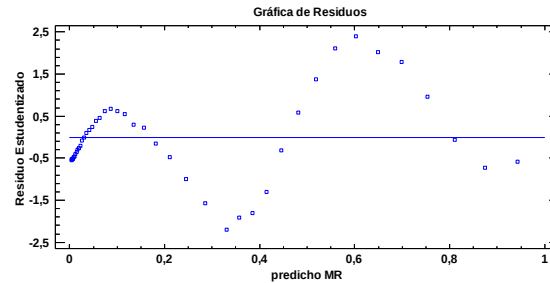
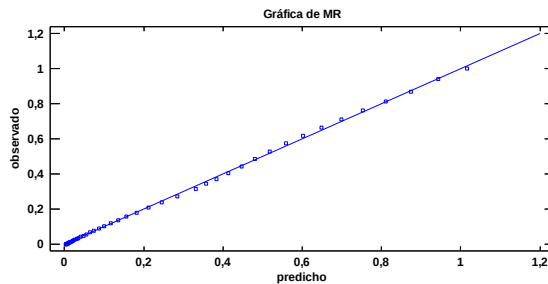
Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	7,0632	2	3,5316
Residuo	0,00216547	44	0,0000492151
Total	7,06537	46	
Total (Corr.)	4,02003	45	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
N	46	
CME	0,0000492151	
MAE	0,00523761	
MAPE		
ME	-0,00068823	
MPE		

R-Cuadrada = 99,9461 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,9449 por ciento; Error estándar del est. = 0,00701535; Error medio absoluto = 0,00523761; Estadístico Durbin-Watson = 0,208979. Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,836773.



III. TRATAMIENTO N°3 (95°C-1.5 mm)

Resultados de la Estimación

			Intervalo Confianza a	95,0%
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
a	1,07131	0,013492	1,04383	1,09879
b	7,08414	0,143122	6,79261	7,37567

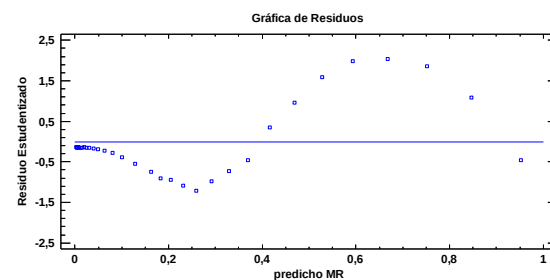
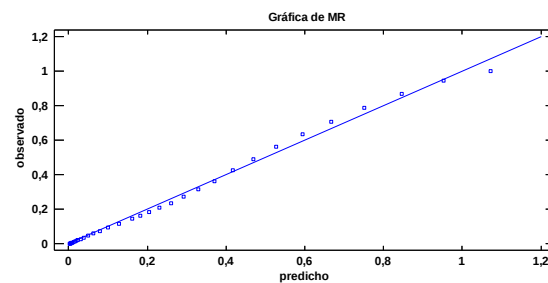
Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	5,40168	2	2,70084
Residuo	0,0147725	32	0,000461639
Total	5,41645	34	
Total (Corr.)	3,12784	33	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
N	34	
CME	0,000461639	
MAE	0,0145675	
MAPE		
ME	-0,00303655	
MPE		

R-Cuadrada = 99,5277 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,513 por ciento; Error estándar del est. = 0,0214858; Error medio absoluto = 0,0145675; Estadístico Durbin-Watson = 0,394725; Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,630227.



IV. TRATAMIENTO N°4 (75°C-2.5 mm)

Resultados de la Estimación

			Intervalo Confianza a	95,0%
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
a	1,05702	0,0100814	1,03676	1,07728
b	-2,52309	0,0356254	-2,59469	-2,4515

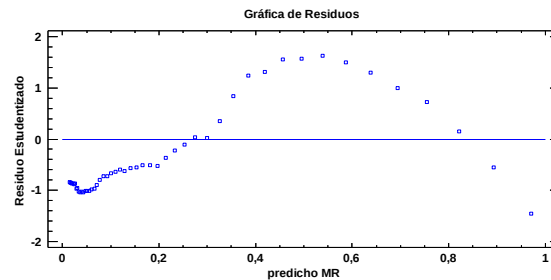
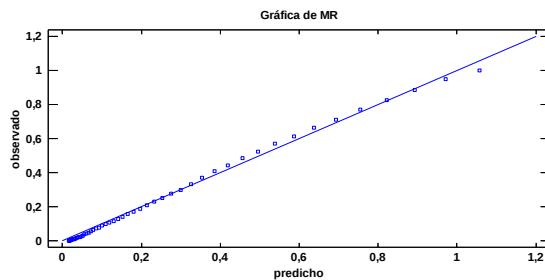
Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	7,21529	2	3,60765
Residuo	0,0173488	49	0,000354057
Total	7,23264	51	
Total (Corr.)	4,12733	50	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
N	51	
CME	0,000354057	
MAE	0,0161093	
MAPE		
ME	-0,00666198	
MPE		

R-Cuadrada = 99,5797 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,5711 por ciento; Error estándar del est. = 0,0188164; Error medio absoluto = 0,0161093; Estadístico Durbin-Watson = 0,107184; Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,845548.



V. TRATAMIENTO N°5 (85°C-2.5 mm)

Resultados de la Estimación

			Intervalo Confianza a	95,0%
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
a	1,06162	0,0122184	1,03699	1,08624
b	2,7623	0,0472879	2,667	2,85761

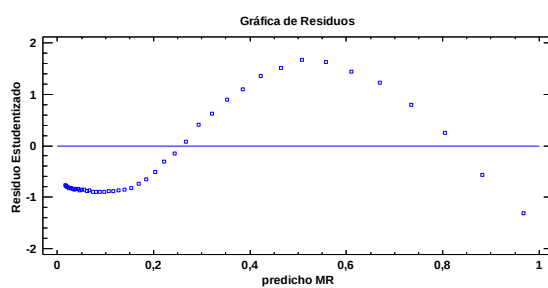
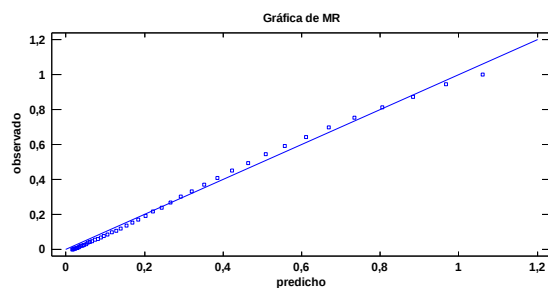
Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	6,69947	2	3,34973
Residuo	0,0212085	44	0,000482011
Total	6,72068	46	
Total (Corr.)	3,81849	45	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
N	46	
CME	0,000482011	
MAE	0,0193465	
MAPE		
ME	-0,00738611	
MPE		

R-Cuadrada = 99,4446 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,432 por ciento; Error estándar del est. = 0,0219548; Error medio absoluto = 0,0193465; Estadístico Durbin-Watson = 0,107884; Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,849858.



VI. TRATAMIENTO N°6 (95°C-2.5 mm)

Resultados de la Estimación

			Intervalo Confianza a 95,0%	
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
a	1,05118	0,0121064	1,0267	1,07567
b	3,18289	0,0548519	3,07195	3,29384

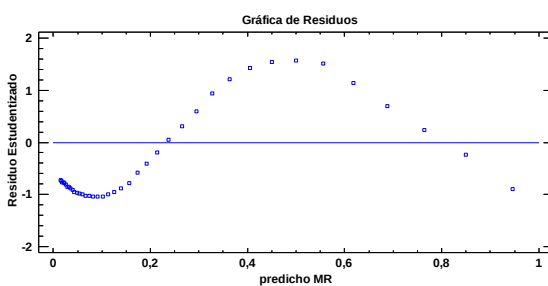
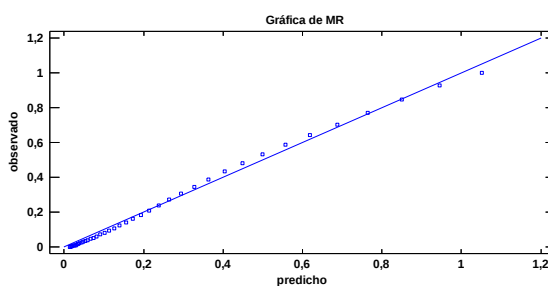
Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	5,77852	2	2,88926
Residuo	0,0164562	39	0,000421955
Total	5,79498	41	
Total (Corr.)	3,35156	40	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
N	41	
CME	0,000421955	
MAE	0,0181255	
MAPE		
ME	-0,00729011	
MPE		

R-Cuadrada = 99,509 porciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,4964 porciento; Error estándar del est. = 0,0205415; Error medio absoluto = 0,0181255; Estadístico Durbin-Watson = 0,115482; Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,855745.



2. ANÁLISIS DE REGRESIÓN DEL ENCOGIMIENTO

I. TRATAMIENTO N°1 (75°C-1.5 mm)

Resultados de la Estimación

			Intervalo Confianza a 95,0%	
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
a	0,452144	0,0110742	0,425957	0,47833
b	0,547997	0,00486548	0,536492	0,559502

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	4,41994	2	2,20997
Residuo	0,000770794	7	0,000110113
Total	4,42071	9	
Total (Corr.)	0,184313	8	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	9	
CME	0,000110113	
MAE	0,0069863	
MAPE	1,05346	
ME	0,00000320815	
MPE	-0,0376414	

R-Cuadrada = 99,5818 porciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,5221 porciento; Error estándar del est. = 0,0104935; Error medio absoluto = 0,0069863; Estadístico Durbin-Watson = 1,61461; Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,141408

II. TRATAMIENTO N°2 (85°C-1.5 mm)**Resultados de la Estimación**

			Intervalo Confianza a	95,0%
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
a	0,46406	0,028031	0,401603	0,526517
b	0,55683	0,0112012	0,531872	0,581788

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	5,72565	2	2,86283
Residuo	0,00884058	10	0,000884058
Total	5,73449	12	
Total (Corr.)	0,251126	11	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	12	
CME	0,000884058	
MAE	0,0242475	
MAPE	3,67353	
ME	0,00000302614	
MPE	-0,264399	

R-Cuadrada = 96,4796 porciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 96,1276 porciento; Error estándar del est. = 0,0297331; Error medio absoluto = 0,0242475; Estadístico Durbin-Watson = 0,691376; Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,511149

III. TRATAMIENTO N°3 (95°C-1.5 mm)**Resultados de la Estimación**

			Intervalo Confianza a	95,0%
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
a	0,474783	0,0441559	0,37037	0,579195
b	0,555073	0,0182465	0,511927	0,598219

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	4,32183	2	2,16091
Residuo	0,0130827	7	0,00186896
Total	4,33491	9	
Total (Corr.)	0,229152	8	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	9	
CME	0,00186896	
MAE	0,0334293	
MAPE	5,36273	
ME	0,000002829	
MPE	-0,529546	

R-Cuadrada = 94,2908 porciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 93,4752 porciento; Error estándar del est. = 0,0432315; Error medio absoluto = 0,0334293; Estadístico Durbin-Watson = 0,456277; Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,618025

IV. TRATAMIENTO N°4 (75°C-2.5 mm)

Resultados de la Estimación

			Intervalo Confianza a	95,0%
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
a	0,419689	0,0215132	0,372338	0,467039
b	0,589013	0,00888367	0,56946	0,608566

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	6,64481	2	3,3224
Residuo	0,00641183	11	0,000582894
Total	6,65122	13	
Total (Corr.)	0,228231	12	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	13	
CME	0,000582894	
MAE	0,0174592	
MAPE	2,77796	
ME	0,00000345685	
MPE	-0,155627	

R-Cuadrada = 97,1906 porciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 96,9352 porciento; Error estándar del est. = 0,0241432; Error medio absoluto = 0,0174592; Estadístico Durbin-Watson = 0,635087; Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,486184

V. TRATAMIENTO N°5 (85°C-2.5 mm)

Resultados de la Estimación

			Intervalo Confianza a	95,0%
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
a	0,423777	0,0276612	0,362144	0,48541
b	0,589269	0,0115525	0,563529	0,61501

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	6,18216	2	3,09108
Residuo	0,00914521	10	0,000914521
Total	6,19131	12	
Total (Corr.)	0,223777	11	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	12	
CME	0,000914521	
MAE	0,023543	
MAPE	3,57841	
ME	0,00000342688	
MPE	-0,246549	

R-Cuadrada = 95,9132 porciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 95,5046 porciento; Error estándar del est. = 0,030241; Error medio absoluto = 0,023543; Estadístico Durbin-Watson = 0,426638; Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,709687

VI. TRATAMIENTO N°6 (95°C-2.5 mm)

Resultados de la Estimación

			Intervalo Confianza a	95,0%
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
a	0,394531	0,0232671	0,340877	0,448185
b	0,620637	0,0100528	0,597455	0,643819

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	5,56142	2	2,78071
Residuo	0,00444911	8	0,000556139
Total	5,56587	10	
Total (Corr.)	0,164339	9	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	10	
CME	0,000556139	
MAE	0,0160115	
MAPE	2,33031	
ME	0,00000385678	
MPE	-0,144674	

R-Cuadrada = 97,2927 porciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 96,9543 porciento; Error estándar del est. = 0,0235826; Error medio absoluto = 0,0160115; Estadístico Durbin-Watson = 0,719575; Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,321417

3. ANÁLISIS DE REGRESIÓN PARA LA DENSIDAD APARENTE**I. TRATAMIENTO N°1 (75°C-1.5 mm)****Resultados de la Estimación**

			Intervalo Confianza a	95,0%
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
a	-528,145	606,726	-2212,69	1156,4
b	689,825	1176,22	-2575,89	3955,54
c	-425,551	707,791	-2390,7	1539,6
d	705,117	143,476	306,762	1103,47
e	610,655	7,20779	590,643	630,667

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	5,65146E6	5	1,13029E6
Residuo	174,078	4	43,5196
Total	5,65163E6	9	
Total (Corr.)	199406,	8	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	9	
CME	43,5196	
MAE	3,36642	
MAPE	0,469124	
ME	1,03581E-12	
MPE	-0,00402525	

R-Cuadrada = 99,9127 porciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,8254 porciento; Error estándar del est. = 6,59694; Error medio absoluto = 3,36642; Estadístico Durbin-Watson = 3,02474; Autocorrelación residual de retardo 1 = -0,520408

II. TRATAMIENTO N°2 (85°C-1.5 mm)**Resultados de la Estimación**

			Intervalo Confianza a	95,0%
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
a	-1325,11	1325,13	-4458,55	1808,32
b	1691,42	2538,76	-4311,81	7694,64
c	-10,7171	1498,8	-3554,83	3533,4
d	-76,4539	290,5	-763,378	610,47
e	860,787	12,4922	831,247	890,327

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	9,97982E6	5	1,99596E6
Residuo	2667,75	7	381,107
Total	9,98248E6	12	
Total (Corr.)	105252,	11	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	12	
CME	381,107	
MAE	11,2358	
MAPE	1,2764	
ME	-9,75812E-13	
MPE	-0,0280808	

R-Cuadrada = 97,4654 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 96,017 por ciento; Error estándar del est. = 19,522; Error medio absoluto = 11,2358; Estadístico Durbin-Watson = 1,28146; Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,205216

III. TRATAMIENTO N°3 (85°C-1.5 mm)**Resultados de la Estimación**

			Intervalo Confianza a	95,0%
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
a	5163,92	1225,24	1762,09	8565,76
b	-10904,2	2273,33	-17216,0	-4592,43
c	7081,45	1253,92	3600,01	10562,9
d	-985,483	211,267	-1572,06	-398,91
e	680,405	7,2314	660,327	700,483

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	5,22594E6	5	1,04519E6
Residuo	455,961	4	113,99
Total	5,22639E6	9	
Total (Corr.)	174386,	8	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	9	
CME	113,99	
MAE	5,76435	
MAPE	0,853206	
ME	-2,44806E-11	
MPE	-0,012178	

R-Cuadrada = 99,7385 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,4771 por ciento; Error estándar del est. = 10,6766; Error medio absoluto = 5,76435; Estadístico Durbin-Watson = 1,66823; Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,0500929

IV. TRATAMIENTO N°4 (75°C-2.5 mm)**Resultados de la Estimación**

			Intervalo Confianza a	95,0%
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
a	2395,34	1098,33	-137,413	4928,09
b	-4558,95	2125,86	-9461,2	343,304
c	2365,23	1279,92	-586,284	5316,74
d	165,697	255,16	-422,703	754,098
e	645,108	11,407	618,803	671,413

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	7,69477E6	5	1,53895E6
Residuo	3082,42	8	385,302
Total	7,69786E6	13	
Total (Corr.)	205766,	12	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	13	
CME	385,302	
MAE	12,9684	
MAPE	1,76803	
ME	7,39756E-9	
MPE	-0,0501574	

R-Cuadrada = 98,502 porciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 97,753 porciento; Error estándar del est. = 19,6291; Error medio absoluto = 12,9684; Estadístico Durbin-Watson = 1,7162; Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,0267351

V. TRATAMIENTO N°5 (85°C-2.5 mm)**Resultados de la Estimación**

			Intervalo Confianza a	95,0%
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
a	1601,26	618,762	138,116	3064,4
b	-3997,42	1197,92	-6830,06	-1164,78
c	3224,26	720,43	1520,71	4927,81
d	-419,588	143,245	-758,308	-80,8678
e	681,854	6,27439	667,018	696,691

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	7,33993E6	5	1,46799E6
Residuo	750,438	7	107,205
Total	7,34068E6	12	
Total (Corr.)	242809,	11	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	12	
CME	107,205	
MAE	6,43707	
MAPE	0,908685	
ME	9,02359E-9	
MPE	-0,0137845	

R-Cuadrada = 99,6909 porciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,5143 porciento; Error estándar del est. = 10,354; Error medio absoluto = 6,43707; Estadístico Durbin-Watson = 2,42735; Autocorrelación residual de retardo 1 = -0,232782

VI. TRATAMIENTO N°6 (95°C-2.5 mm)**Resultados de la Estimación**

			Intervalo Confianza a	95,0%
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
a	-5292,47	2191,56	-10926,1	341,139
b	12557,2	4223,27	1700,88	23413,5
c	-10266,6	2518,86	-16741,6	-3791,69
d	3529,65	498,181	2249,03	4810,27
e	515,787	21,9201	459,439	572,134

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	6,78931E6	5	1,35786E6
Residuo	4354,44	5	870,889
Total	6,79367E6	10	
Total (Corr.)	315027,	9	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	10	
CME	870,889	
MAE	17,5571	
MAPE	2,44826	
ME	-4,9005E-8	
MPE	-0,0830017	

R-Cuadrada = 98,6178 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 97,512 por ciento; Error estándar del est. = 29,5108; Error medio absoluto = 17,5571; Estadístico Durbin-Watson = 2,36335; Autocorrelación residual de retardo 1 = -0,273798

4. ANÁLISIS DE REGRESIÓN PARA LA POROSIDAD**I. TRATAMIENTO N°1 (75°C-1.5 mm)****Resultados de la Estimación**

			Intervalo Confianza a	95,0%
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
a	0,331005	0,381389	-0,727905	1,38991
b	-0,42756	0,739373	-2,48039	1,62527
c	0,262988	0,444919	-0,972309	1,49829
d	-0,44956	0,0901896	-0,699967	-0,199153
e	0,608182	0,00453084	0,595603	0,620762

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	2,33906	5	0,467812
Residuo	0,0000687855	4	0,0000171964
Total	2,33913	9	
Total (Corr.)	0,0820654	8	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	9	
CME	0,0000171964	
MAE	0,00214884	
MAPE	0,409077	
ME	1,08555E-15	
MPE	-0,00244765	

R-Cuadrada = 99,9162 por ciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,8324 por ciento; Error estándar del est. = 0,00414685; Error medio absoluto = 0,00214884; Estadístico Durbin-Watson = 3,06707; Autocorrelación residual de retardo 1 = -0,542773

II. TRATAMIENTO N°2 (85°C-1.5 mm)**Resultados de la Estimación**

			Intervalo Confianza a	95,0%
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
a	0,853554	0,847644	-1,15081	2,85792
b	-1,08976	1,62397	-4,92985	2,75032
c	0,00849608	0,95874	-2,25857	2,27556
d	0,0488734	0,185824	-0,390531	0,488278
e	0,447976	0,00799091	0,42908	0,466871

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	2,14059	5	0,428119
Residuo	0,00109158	7	0,000155941
Total	2,14169	12	
Total (Corr.)	0,0432629	11	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	12	
CME	0,000155941	
MAE	0,00719027	
MAPE	1,67449	
ME	2,68304E-16	
MPE	-0,0522302	

R-Cuadrada = 97,4769 porciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 96,0351 porciento; Error estándar del est. = 0,0124876; Error medio absoluto = 0,00719027; Estadístico Durbin-Watson = 1,2655; Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,212792

III. TRATAMIENTO N°3 (85°C-1.5 mm)**Resultados de la Estimación**

			Intervalo Confianza a	95,0%
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
a	-3,2615	0,788855	-5,45172	-1,07128
b	6,89684	1,46365	2,83309	10,9606
c	-4,48653	0,807316	-6,72801	-2,24505
d	0,623028	0,136021	0,245372	1,00068
e	0,563703	0,00465582	0,550776	0,57663

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio
Modelo	2,49954	5	0,499907
Residuo	0,000189006	4	0,0000472515
Total	2,49972	9	
Total (Corr.)	0,0715835	8	

Análisis de Residuos

	Estimación	Validación
n	9	
CME	0,0000472515	
MAE	0,00373389	
MAPE	0,663524	
ME	-1,09049E-14	
MPE	-0,00635001	

R-Cuadrada = 99,736 porciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,4719 porciento; Error estándar del est. = 0,00687397; Error medio absoluto = 0,00373389; Estadístico Durbin-Watson = 1,68219; Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,0509341

IV. TRATAMIENTO N°4 (75°C-2.5 mm)**Resultados de la Estimación**

			Intervalo Confianza a	95,0%
		Error Estándar	Asintótico	
Parámetro	Estimado	Asintótico	Inferior	Superior
a	-1,51716	0,703081	-3,13847	0,104153
b	2,88748	1,36085	-0,250647	6,0256
c	-1,49583	0,819328	-3,38521	0,393547
d	-0,110124	0,163338	-0,486782	0,266534
e	0,586332	0,00730207	0,569493	0,60317

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>
Modelo	3,50551	5	0,701101
Residuo	0,00126311	8	0,000157888
Total	3,50677	13	
Total (Corr.)	0,0846596	12	

Análisis de Residuos

	<i>Estimación</i>	<i>Validación</i>
n	13	
CME	0,000157888	
MAE	0,00833025	
MAPE	1,6356	
ME	-5,16251E-12	
MPE	-0,0315006	

R-Cuadrada = 98,508 porciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 97,762 porciento; Error estándar del est. = 0,0125654; Error medio absoluto = 0,00833025; Estadístico Durbin-Watson = 1,71501; Autocorrelación residual de retardo 1 = 0,0289159

V. TRATAMIENTO N°5 (85°C-2.5 mm)**Resultados de la Estimación**

			<i>Intervalo Confianza a</i>	<i>95,0%</i>
		<i>Error Estándar</i>	<i>Asintótico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Asintótico</i>	<i>Inferior</i>	<i>Superior</i>
a	-1,03062	0,401803	-1,98073	-0,0805029
b	2,5671	0,777889	0,727679	4,40652
c	-2,0676	0,467822	-3,17383	-0,961375
d	0,268866	0,0930181	0,0489131	0,48882
e	0,562669	0,00407438	0,553035	0,572303

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>
Modelo	3,18093	5	0,636187
Residuo	0,000316442	7	0,000045206
Total	3,18125	12	
Total (Corr.)	0,0998772	11	

Análisis de Residuos

	<i>Estimación</i>	<i>Validación</i>
n	12	
CME	0,000045206	
MAE	0,00412282	
MAPE	0,774595	
ME	-5,95219E-12	
MPE	-0,00842347	

R-Cuadrada = 99,6832 porciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 99,5021 porciento; Error estándar del est. = 0,00672354; Error medio absoluto = 0,00412282; Estadístico Durbin-Watson = 2,42415; Autocorrelación residual de retardo 1 = -0,228733

VI. TRATAMIENTO N°6 (95°C-2.5 mm)**Resultados de la Estimación**

			<i>Intervalo Confianza a</i>	<i>95,0%</i>
		<i>Error Estándar</i>	<i>Asintótico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Asintótico</i>	<i>Inferior</i>	<i>Superior</i>
a	3,39982	1,39888	-0,196126	6,99576
b	-8,05914	2,69572	-14,9887	-1,12955
c	6,58366	1,60779	2,45069	10,7166
d	-2,26254	0,31799	-3,07996	-1,44512
e	0,669045	0,0139916	0,633079	0,705012

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>
Modelo	2,46733	5	0,493467
Residuo	0,00177413	5	0,000354826
Total	2,46911	10	
Total (Corr.)	0,129496	9	

Análisis de Residuos

	<i>Estimación</i>	<i>Validación</i>
n	10	
CME	0,000354826	
MAE	0,0112206	
MAPE	2,25043	
ME	3,7032E-11	
MPE	-0,0644269	

R-Cuadrada = 98,63 porciento; R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 97,5339 porciento; Error estándar del est. = 0,0188368
 Error medio absoluto = 0,0112206; Estadístico Durbin-Watson = 2,35179; Autocorrelación residual de retardo 1 = -0,268818

APÉNDICE D. DATOS EXPERIMENTALES DEL PROCESO DE SECADO.

Tabla D.1. Datos de tiempo, humedad en base seca (BS), razón de humedad (MR) y velocidad de secado (N) con sus respectivas desviaciones estándar (SD) para el tratamiento N°1 (75°C-1.5 mm).

Tiempo (h)	Humedad (BS)	SD	CV (%)	MR	SD	N(kg*m ⁻² *h ⁻¹)	SD
0,000	2,3036	0,000	0,00%	1,000	0,000	-	-
0,050	2,0145	0,036	1,77%	0,872	0,013	2825,506	247,301
0,100	1,7734	0,032	1,78%	0,765	0,011	2355,181	133,924
0,150	1,5691	0,041	2,61%	0,674	0,015	1997,201	42,083
0,200	1,3665	0,058	4,28%	0,584	0,022	1979,816	101,808
0,250	1,1570	0,068	5,92%	0,492	0,023	2047,238	35,836
0,300	0,9762	0,075	7,65%	0,411	0,023	1766,889	83,940
0,350	0,8336	0,067	8,07%	0,348	0,020	1392,909	120,859
0,400	0,7201	0,058	8,07%	0,298	0,016	1109,300	141,580
0,450	0,6293	0,049	7,84%	0,258	0,014	887,399	154,427
0,500	0,5496	0,048	8,81%	0,222	0,012	778,613	41,164
0,550	0,4834	0,047	9,63%	0,193	0,011	647,356	44,769
0,600	0,4288	0,045	10,56%	0,169	0,010	533,121	42,983
0,650	0,3782	0,043	11,38%	0,146	0,010	494,972	54,132
0,700	0,3344	0,044	13,08%	0,127	0,010	427,936	41,017
0,750	0,2946	0,039	13,16%	0,109	0,009	388,621	63,709
0,833	0,2415	0,037	15,37%	0,086	0,008	311,382	34,448
0,917	0,1977	0,038	19,21%	0,066	0,008	256,764	17,378
1,000	0,1631	0,035	21,49%	0,051	0,007	202,603	41,555
1,083	0,1356	0,035	26,02%	0,039	0,006	161,767	30,952
1,167	0,1142	0,036	31,73%	0,029	0,005	125,308	17,764
1,250	0,0966	0,038	39,27%	0,022	0,004	103,197	17,830

1,333	0,0847	0,039	46,10%	0,016	0,003	69,752	16,168
1,417	0,0763	0,039	50,95%	0,013	0,003	49,468	9,720
1,500	0,0682	0,040	59,25%	0,009	0,003	47,010	8,488
1,667	0,0603	0,040	65,69%	0,005	0,002	23,137	5,055
1,833	0,0554	0,039	70,01%	0,003	0,002	14,621	3,431
2,000	0,0518	0,038	73,69%	0,002	0,001	10,341	5,156
2,167	0,0493	0,037	76,04%	0,001	0,000	7,436	3,692
2,333	0,0480	0,037	77,02%	0,000	0,000	3,852	2,579

Tabla D.2. Datos de tiempo, humedad en base seca (BS), razón de humedad (MR) y velocidad de secado (N) con sus respectivas desviaciones estándar (SD) para el tratamiento N°2 (85°C-1.5 mm).

Tiempo (h)	Humedad (BS)	SD	CV (%)	MR	SD	N(kg*m ⁻² *h ⁻¹)	SD
0,000	1,675	0,000	0,00%	1,000	0,000	-	-
0,017	1,576	0,006	0,37%	0,939	0,006	3833,186	245,392
0,033	1,466	0,020	1,39%	0,870	0,020	4310,567	547,937
0,050	1,372	0,032	2,32%	0,811	0,032	3666,516	385,918
0,067	1,289	0,033	2,56%	0,760	0,033	3226,430	92,597
0,083	1,211	0,033	2,69%	0,711	0,033	3060,146	229,610
0,100	1,133	0,044	3,87%	0,662	0,044	3055,630	514,139
0,117	1,061	0,049	4,59%	0,617	0,049	2777,498	165,300
0,133	0,989	0,054	5,49%	0,572	0,054	2819,624	88,892
0,150	0,917	0,061	6,70%	0,528	0,061	2807,069	148,556
0,167	0,849	0,069	8,08%	0,485	0,069	2663,495	151,444
0,183	0,784	0,072	9,17%	0,444	0,072	2550,441	35,414
0,200	0,722	0,075	10,35%	0,405	0,075	2427,168	10,663
0,217	0,669	0,072	10,71%	0,372	0,072	2060,976	233,346

0,233	0,623	0,070	11,22%	0,344	0,070	1772,338	162,866
0,250	0,580	0,061	10,55%	0,317	0,061	1707,588	449,189
0,283	0,512	0,056	10,90%	0,275	0,056	1313,637	235,586
0,317	0,455	0,052	11,48%	0,239	0,052	1123,038	165,012
0,350	0,406	0,048	11,72%	0,208	0,048	953,954	157,262
0,383	0,363	0,043	11,87%	0,181	0,043	844,405	138,300
0,417	0,326	0,042	12,93%	0,158	0,042	709,773	68,175
0,450	0,292	0,040	13,62%	0,137	0,040	665,217	96,401
0,483	0,265	0,040	14,95%	0,120	0,040	530,747	36,164
0,517	0,240	0,038	15,71%	0,105	0,038	486,944	66,721
0,550	0,218	0,036	16,61%	0,091	0,036	422,002	49,015
0,583	0,199	0,034	17,15%	0,079	0,034	387,192	63,266
0,617	0,180	0,033	18,17%	0,067	0,033	356,871	46,690
0,650	0,165	0,031	18,89%	0,058	0,031	292,910	47,188
0,683	0,151	0,030	19,93%	0,049	0,030	270,378	44,428
0,717	0,140	0,028	20,34%	0,042	0,028	220,932	44,346
0,750	0,130	0,028	21,43%	0,036	0,028	192,195	26,925
0,783	0,121	0,027	22,22%	0,030	0,027	177,342	31,353
0,817	0,114	0,026	22,75%	0,026	0,026	146,278	30,537
0,850	0,106	0,025	23,51%	0,021	0,025	141,391	34,303
0,883	0,101	0,025	24,69%	0,018	0,025	110,915	11,203
0,917	0,096	0,024	25,17%	0,015	0,024	90,830	20,486
0,950	0,092	0,024	25,85%	0,012	0,024	84,440	39,209
0,983	0,088	0,023	26,51%	0,009	0,023	76,379	15,726
1,017	0,084	0,023	27,13%	0,007	0,023	64,978	18,502
1,050	0,082	0,022	26,90%	0,006	0,022	49,738	35,428
1,083	0,080	0,022	28,19%	0,004	0,022	45,938	5,673
1,117	0,078	0,022	28,69%	0,003	0,022	35,660	14,965

1,150	0,076	0,023	29,74%	0,002	0,023	31,198	7,482
1,183	0,075	0,023	30,70%	0,001	0,023	29,492	8,532
1,217	0,073	0,023	31,11%	0,000	0,023	25,934	10,129
1,250	0,073	0,022	30,75%	0,000	0,022	12,695	12,324

Tabla D.3. Datos de tiempo, humedad en base seca (BS), razón de humedad (MR) y velocidad de secado (N) con sus respectivas desviaciones estándar (SD) para el tratamiento N°3 (95°C-1.5 mm).

Tiempo (h)	Humedad (BS)	SD	CV (%)	MR	SD	N(kg*m ⁻² *h ⁻¹)	SD
0,000	2,065	0,056	2,70%	1,000	0,000	-	-
0,017	1,951	0,053	2,69%	0,943	0,010	3368,133	594,940
0,033	1,799	0,078	4,35%	0,867	0,024	4486,152	908,381
0,050	1,641	0,104	6,37%	0,788	0,038	4684,016	778,196
0,067	1,481	0,123	8,30%	0,708	0,048	4720,232	503,884
0,083	1,331	0,116	8,74%	0,633	0,046	4444,939	397,647
0,100	1,184	0,117	9,88%	0,560	0,049	4328,272	489,106
0,117	1,042	0,107	10,31%	0,489	0,046	4193,339	559,611
0,133	0,912	0,107	11,77%	0,424	0,044	3828,812	219,605
0,150	0,787	0,093	11,85%	0,361	0,038	3717,255	523,875
0,167	0,692	0,088	12,67%	0,314	0,036	2788,605	373,901
0,183	0,609	0,074	12,19%	0,272	0,032	2457,205	704,170
0,200	0,534	0,056	10,41%	0,235	0,025	2201,590	775,450
0,217	0,482	0,054	11,18%	0,209	0,024	1561,993	69,469
0,233	0,435	0,055	12,60%	0,185	0,024	1369,414	26,096
0,250	0,392	0,053	13,60%	0,164	0,022	1287,285	61,843
0,267	0,358	0,047	13,27%	0,146	0,020	1007,302	229,249
0,300	0,298	0,043	14,51%	0,116	0,017	885,351	73,335

0,333	0,251	0,042	16,61%	0,093	0,016	692,407	30,729
0,367	0,213	0,040	18,72%	0,074	0,015	563,739	33,239
0,400	0,182	0,037	20,53%	0,058	0,013	457,121	53,423
0,433	0,157	0,034	21,83%	0,046	0,013	367,031	67,800
0,467	0,136	0,032	23,17%	0,036	0,011	300,425	41,700
0,500	0,120	0,028	23,18%	0,028	0,010	236,439	63,591
0,533	0,107	0,024	22,45%	0,021	0,008	192,775	63,004
0,567	0,098	0,021	21,82%	0,016	0,006	135,656	47,410
0,600	0,089	0,020	22,35%	0,012	0,005	133,972	27,741
0,633	0,083	0,018	21,66%	0,009	0,004	89,981	44,114
0,667	0,069	0,017	24,73%	0,006	0,003	200,489	15,706
0,700	0,065	0,016	25,06%	0,004	0,002	66,838	31,869
0,733	0,062	0,016	25,61%	0,003	0,001	47,136	22,095
0,767	0,059	0,015	26,15%	0,001	0,001	42,128	17,197
0,800	0,058	0,015	25,85%	0,001	0,001	14,860	7,462
0,833	0,055	0,016	28,51%	0,000	0,000	34,682	15,021

Tabla D.4. Datos de tiempo, humedad en base seca (BS), razón de humedad (MR) y velocidad de secado (N) con sus respectivas desviaciones estándar (SD) para el tratamiento N°4 (75°C-2.5 mm).

Tiempo (h)	Humedad (BS)	SD	CV (%)	MR	SD	N(kg*m ⁻² *h ⁻¹)	SD
0,000	1,833	0,000	0,00%	1,000	0,000	-	-
0,033	1,738	0,011	0,65%	0,948	0,006	2404,017	174,275
0,067	1,623	0,018	1,13%	0,884	0,009	2929,379	467,725
0,100	1,515	0,013	0,84%	0,824	0,006	2729,973	397,678
0,133	1,414	0,015	1,03%	0,768	0,008	2573,923	221,125
0,167	1,313	0,023	1,72%	0,712	0,011	2574,241	261,846

0,200	1,221	0,020	1,67%	0,662	0,010	2315,613	55,391
0,233	1,134	0,028	2,45%	0,614	0,013	2209,497	194,727
0,267	1,053	0,032	3,00%	0,569	0,015	2065,770	115,717
0,300	0,973	0,032	3,30%	0,524	0,015	2047,904	37,525
0,333	0,898	0,034	3,81%	0,484	0,017	1885,553	39,177
0,367	0,824	0,036	4,41%	0,443	0,018	1890,530	129,762
0,400	0,760	0,033	4,33%	0,408	0,016	1616,104	159,066
0,433	0,691	0,033	4,81%	0,370	0,016	1761,506	57,950
0,467	0,623	0,043	6,88%	0,332	0,022	1732,289	196,190
0,500	0,564	0,045	7,94%	0,300	0,023	1486,731	233,423
0,533	0,521	0,036	6,90%	0,276	0,018	1094,716	313,189
0,567	0,476	0,035	7,28%	0,251	0,017	1144,058	95,146
0,600	0,435	0,034	7,75%	0,228	0,017	1047,570	117,618
0,633	0,396	0,033	8,34%	0,207	0,017	977,261	132,229
0,667	0,360	0,030	8,36%	0,187	0,016	931,585	150,278
0,700	0,331	0,032	9,57%	0,171	0,017	719,768	22,643
0,733	0,305	0,031	10,21%	0,157	0,016	668,927	61,252
0,767	0,279	0,031	11,04%	0,143	0,016	652,864	51,001
0,800	0,256	0,029	11,46%	0,130	0,015	584,487	72,108
0,833	0,234	0,026	11,13%	0,117	0,014	571,383	124,592
0,867	0,216	0,024	11,22%	0,108	0,013	453,562	73,238
0,900	0,197	0,024	12,28%	0,097	0,013	471,984	29,770
0,933	0,180	0,024	13,18%	0,088	0,012	432,084	39,646
0,967	0,163	0,022	13,36%	0,079	0,011	427,543	73,733
1,000	0,150	0,022	14,94%	0,071	0,012	343,495	19,581
1,033	0,135	0,023	17,31%	0,063	0,012	379,741	20,372
1,067	0,120	0,024	19,61%	0,055	0,013	371,021	44,158
1,100	0,107	0,023	21,22%	0,048	0,012	324,202	39,096

1,133	0,097	0,022	22,15%	0,042	0,011	256,792	46,199
1,167	0,088	0,019	22,03%	0,037	0,010	249,097	71,440
1,200	0,079	0,016	20,53%	0,032	0,009	217,234	96,267
1,233	0,072	0,014	19,85%	0,028	0,008	188,947	61,160
1,267	0,064	0,011	17,28%	0,024	0,006	197,459	101,174
1,300	0,058	0,009	15,18%	0,020	0,006	152,766	66,839
1,333	0,052	0,008	14,83%	0,017	0,005	154,063	37,054
1,367	0,047	0,006	12,85%	0,014	0,004	125,766	51,831
1,400	0,042	0,006	13,43%	0,013	0,004	120,467	22,044
1,433	0,037	0,004	10,44%	0,010	0,003	127,083	57,201
1,467	0,034	0,002	5,50%	0,010	0,004	84,543	54,694
1,500	0,030	0,001	4,57%	0,007	0,003	100,524	31,856
1,533	0,027	0,001	2,02%	0,006	0,002	81,725	44,040
1,567	0,023	0,002	8,01%	0,004	0,001	80,140	44,171
1,600	0,021	0,003	16,43%	0,002	0,000	71,932	41,868
1,633	0,018	0,003	18,90%	0,001	0,001	72,020	20,442
1,667	0,016	0,004	25,09%	0,000	0,000	44,878	29,532

Tabla D.5. Datos de tiempo, humedad en base seca (BS), razón de humedad (MR) y velocidad de secado (N) con sus respectivas desviaciones estándar (SD) para el tratamiento N°5 (85°C-2.5 mm).

Tiempo (h)	Humedad (BS)	SD	CV (%)	MR	SD	N(kg*m ⁻² *h ⁻¹)	SD
0,000	2,129	0,111	5,20%	1,000	0,000	-	-
0,033	2,012	0,119	5,91%	0,943	0,007	2812,338	166,140
0,067	1,866	0,115	6,17%	0,871	0,013	3519,806	607,170
0,100	1,742	0,114	6,53%	0,811	0,018	2997,153	374,703
0,133	1,620	0,117	7,24%	0,751	0,026	2933,181	507,064

0,167	1,506	0,112	7,42%	0,696	0,027	2750,398	313,423
0,200	1,394	0,109	7,80%	0,641	0,029	2701,273	314,162
0,233	1,291	0,108	8,34%	0,591	0,030	2464,356	118,231
0,267	1,193	0,106	8,89%	0,543	0,030	2371,363	126,154
0,300	1,095	0,101	9,19%	0,496	0,030	2366,437	239,843
0,333	1,004	0,099	9,82%	0,451	0,030	2179,111	134,431
0,367	0,917	0,095	10,38%	0,409	0,030	2096,687	178,519
0,400	0,839	0,092	10,92%	0,371	0,030	1890,311	180,737
0,433	0,763	0,089	11,72%	0,334	0,030	1811,893	122,581
0,467	0,696	0,086	12,31%	0,301	0,028	1630,712	186,301
0,500	0,628	0,080	12,73%	0,268	0,025	1636,854	263,215
0,533	0,569	0,077	13,59%	0,240	0,025	1411,416	128,568
0,567	0,519	0,076	14,56%	0,215	0,024	1220,187	112,985
0,600	0,469	0,071	15,15%	0,191	0,023	1192,387	165,298
0,633	0,426	0,067	15,77%	0,170	0,021	1035,949	173,909
0,667	0,388	0,066	16,90%	0,152	0,021	905,905	90,255
0,700	0,355	0,064	17,93%	0,136	0,021	813,369	94,666
0,733	0,325	0,059	18,12%	0,122	0,020	709,665	166,281
0,767	0,299	0,056	18,79%	0,109	0,019	625,631	105,913
0,800	0,275	0,053	19,43%	0,097	0,018	577,112	96,996
0,833	0,254	0,051	19,99%	0,087	0,017	515,764	103,803
0,867	0,234	0,048	20,36%	0,077	0,016	474,135	99,925
0,900	0,216	0,046	21,09%	0,069	0,015	426,362	78,688
0,933	0,200	0,043	21,55%	0,061	0,014	391,487	86,173
0,967	0,186	0,043	22,96%	0,054	0,013	339,882	68,721
1,000	0,173	0,040	23,19%	0,048	0,012	306,398	84,788
1,033	0,161	0,039	24,01%	0,042	0,011	297,610	83,655

1,067	0,151	0,038	25,00%	0,037	0,010	245,759	75,926
1,100	0,141	0,036	25,44%	0,032	0,008	238,151	93,013
1,133	0,131	0,035	27,07%	0,027	0,007	250,628	80,868
1,167	0,123	0,035	28,10%	0,024	0,006	170,336	64,175
1,200	0,116	0,035	29,92%	0,020	0,005	190,233	68,559
1,233	0,109	0,035	32,21%	0,017	0,003	170,803	78,812
1,267	0,103	0,035	34,14%	0,014	0,003	141,641	32,095
1,300	0,097	0,034	35,47%	0,011	0,002	130,808	55,598
1,333	0,092	0,036	38,79%	0,008	0,002	135,531	53,731
1,367	0,087	0,035	39,90%	0,006	0,001	104,887	38,000
1,400	0,083	0,035	41,64%	0,004	0,001	90,756	28,724
1,433	0,080	0,035	43,41%	0,003	0,001	89,255	22,563
1,467	0,077	0,035	44,91%	0,001	0,001	70,069	7,452
1,500	0,074	0,033	45,01%	0,000	0,000	60,922	31,510

Tabla D.6. Datos de tiempo, humedad en base seca (BS), razón de humedad (MR) y velocidad de secado (N) con sus respectivas desviaciones estándar (SD) para el tratamiento N°6 (95°C- 2.5 mm).

Tiempo (h)	Humedad (BS)	SD	CV (%)	MR	SD	N(kg*m ⁻² *h ⁻¹)	SD
0,000	2,107	0,109	5,18%	1,000	0,000	-	-
0,033	1,961	0,116	5,91%	0,929	0,014	3766,048	659,380
0,067	1,788	0,110	6,17%	0,846	0,026	4473,475	780,493
0,100	1,629	0,100	6,13%	0,769	0,023	4090,719	271,357
0,133	1,489	0,089	6,01%	0,701	0,021	3625,315	265,965
0,167	1,364	0,081	5,92%	0,641	0,018	3234,417	249,244
0,200	1,250	0,075	6,03%	0,586	0,015	2939,000	251,983
0,233	1,137	0,081	7,08%	0,531	0,021	2921,413	144,169

0,267	1,031	0,066	6,41%	0,480	0,017	2743,085	373,566
0,300	0,933	0,057	6,09%	0,433	0,015	2533,366	235,508
0,333	0,840	0,053	6,31%	0,388	0,016	2389,478	114,878
0,367	0,753	0,047	6,26%	0,346	0,017	2250,267	227,685
0,400	0,671	0,042	6,24%	0,306	0,017	2123,076	193,847
0,433	0,598	0,039	6,59%	0,271	0,017	1890,313	63,853
0,467	0,532	0,032	6,01%	0,239	0,015	1711,693	200,017
0,500	0,472	0,026	5,61%	0,210	0,014	1554,119	142,255
0,533	0,418	0,023	5,45%	0,184	0,013	1386,465	93,498
0,567	0,371	0,018	4,80%	0,161	0,012	1221,158	127,040
0,600	0,326	0,015	4,60%	0,140	0,011	1146,950	125,672
0,633	0,290	0,012	4,20%	0,122	0,011	948,605	88,684
0,667	0,257	0,011	4,32%	0,107	0,010	840,974	101,509
0,700	0,229	0,011	4,95%	0,093	0,011	711,805	9,547
0,733	0,204	0,009	4,38%	0,081	0,010	665,316	81,901
0,767	0,183	0,010	5,32%	0,071	0,008	544,239	112,923
0,800	0,163	0,010	6,31%	0,061	0,008	501,123	54,201
0,833	0,146	0,012	8,47%	0,053	0,007	434,887	74,170
0,867	0,131	0,013	9,71%	0,046	0,007	392,442	47,906
0,900	0,118	0,014	12,22%	0,040	0,005	340,231	86,135
0,933	0,106	0,015	13,84%	0,034	0,005	306,184	40,522
0,967	0,096	0,016	17,16%	0,029	0,004	269,474	54,310
1,000	0,086	0,018	20,45%	0,024	0,004	255,436	30,172
1,033	0,078	0,019	24,54%	0,020	0,003	194,647	55,319
1,067	0,071	0,020	27,54%	0,017	0,003	180,357	31,985
1,100	0,065	0,021	31,43%	0,014	0,002	153,846	32,031
1,133	0,059	0,021	35,61%	0,011	0,002	163,926	28,780
1,167	0,055	0,021	38,19%	0,009	0,002	112,998	13,241

1,200	0,050	0,022	44,11%	0,007	0,002	109,233	34,699
1,233	0,046	0,023	48,92%	0,005	0,001	108,056	15,340
1,267	0,042	0,024	56,52%	0,003	0,001	108,131	33,222
1,300	0,039	0,024	62,76%	0,001	0,001	79,777	17,443
1,333	0,036	0,026	71,01%	0,000	0,000	75,584	34,450

APÉNDICE E. TABLAS DE DATOS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS MEDIDAS.

Tabla E.1. Datos de tiempo, densidad aparente, porosidad (ε) y volumen aparente (V_t) con sus respectivas desviaciones estándar para el tratamiento N°1 (75°C-1.5 mm).

Tiempo (h)	Dens. Aparente (kg/m ³)	SD	ε (%)	SD	V_t (m ³)	SD
0,000	1052,336	28,437	32,499%	0,018	1,84E-06	0,0E+00
0,150	993,789	96,556	36,255%	0,062	1,55E-06	3,3E-08
0,300	865,701	90,352	44,471%	0,058	1,36E-06	3,9E-08
0,450	765,861	91,927	50,875%	0,059	1,26E-06	1,0E-07
0,600	723,070	26,933	53,620%	0,017	1,15E-06	1,4E-08
0,750	682,568	42,961	56,218%	0,028	1,10E-06	3,8E-08
0,917	663,738	45,848	57,425%	0,029	1,04E-06	2,9E-08
1,083	633,415	52,508	59,370%	0,034	1,04E-06	6,0E-08
1,250	624,019	18,819	59,973%	0,012	1,01E-06	2,0E-08

Tabla E.2. Datos de tiempo, densidad aparente, porosidad (ε) y volumen aparente (V_t) con sus respectivas desviaciones estándar para el tratamiento N°2 (85°C-1.5 mm).

Tiempo (h)	Dens. Aparente (kg/m ³)	SD	ε (%)	SD	V_t (m ³)	SD
0,000	1138,503	15,839	26,972	0,010	1,84E-06	0,0E+00
0,083	1076,958	7,158	30,920	0,005	1,58E-06	1,6E-08
0,167	924,032	33,357	40,729	0,021	1,51E-06	3,4E-08
0,250	880,760	61,193	43,505	0,039	1,37E-06	5,9E-08
0,350	880,558	84,641	43,518	0,054	1,24E-06	7,5E-08
0,450	855,975	66,738	45,095	0,043	1,18E-06	5,8E-08

0,550	845,224	54,836	45,784	0,035	1,12E-06	4,2E-08
0,650	832,768	90,256	46,583	0,058	1,09E-06	9,9E-08
0,750	841,506	24,041	46,023	0,015	1,04E-06	5,4E-08
0,850	859,573	92,864	44,864	0,060	1,00E-06	8,1E-08
0,950	860,185	60,251	44,825	0,039	9,87E-07	5,9E-08
1,05	888,779	49,967	42,990%	0,032	9,44E-07	3,3E-08

Tabla E.3. Datos de tiempo, densidad aparente, porosidad (ε) y volumen aparente (V_t) con sus respectivas desviaciones estándar para el tratamiento N°3 (95°C-1.5 mm).

Tiempo (h)	Dens. Aparente (kg/m ³)	SD	ε (%)	SD	V_t (m ³)	SD
0,000	1035,827	6,650	33,558	0,004	1,84E-06	0,0E+00
0,083	957,767	79,842	38,565	0,051	1,58E-06	5,7E-08
0,167	776,564	35,493	50,188	0,023	1,39E-06	4,1E-08
0,250	676,481	22,620	56,608	0,015	1,25E-06	3,7E-08
0,333	639,472	69,192	58,982	0,044	1,17E-06	1,1E-07
0,433	641,016	23,546	58,883	0,015	1,07E-06	3,3E-08
0,533	652,064	47,547	58,174	0,030	1,00E-06	5,3E-08
0,633	676,368	36,481	56,615	0,023	9,45E-07	2,7E-08
0,733	687,504	22,468	55,901	0,014	9,20E-07	4,2E-08

Tabla E.4. Datos de tiempo, densidad aparente, porosidad (ε) y volumen aparente (V_t) con sus respectivas desviaciones estándar para el tratamiento N°4 (75°C-2.5 mm).

Tiempo (h)	Dens. Aparente (kg/m ³)	SD	ε (%)	SD	V_t (m ³)	SD
0,000	1009,850	2,317	35,224%	0,001	3,06E-06	0,0E+00
0,133	949,312	15,535	39,108%	0,010	2,80E-06	5,7E-08
0,267	892,870	44,013	42,728%	0,028	2,56E-06	8,6E-08
0,400	865,868	26,134	44,460%	0,017	2,29E-06	2,4E-08
0,533	804,628	31,706	48,388%	0,020	2,14E-06	1,7E-08
0,667	750,487	37,701	51,861%	0,024	2,05E-06	5,3E-08
0,800	678,164	47,354	56,500%	0,030	2,09E-06	7,8E-08
0,933	666,922	52,709	57,221%	0,034	1,99E-06	1,5E-07
1,067	647,718	25,780	58,453%	0,017	1,94E-06	1,4E-07
1,200	631,293	36,359	59,507%	0,023	1,90E-06	7,7E-08
1,333	650,942	48,562	58,246%	0,031	1,78E-06	7,7E-08
1,467	649,009	11,009	58,370%	0,007	1,74E-06	6,3E-08
1,600	671,575	43,978	56,923%	0,028	1,66E-06	9,7E-08

Tabla E.5. Datos de tiempo, densidad aparente, porosidad (ε) y volumen aparente (V_t) con sus respectivas desviaciones estándar para el tratamiento N°5 (85°C-2.5 mm).

Tiempo (h)	Dens. Aparente (kg/m ³)	SD	ε (%)	SD	V_t (m ³)	SD
0,000	1090,285	0,566	30,065%	0,000	3,06E-06	0,0E+0
0,133	1003,547	35,459	35,629%	0,023	2,72E-06	6,9E-08
0,267	897,677	38,800	42,420%	0,025	2,52E-06	5,6E-08
0,400	802,604	43,921	48,518%	0,028	2,35E-06	6,2E-08

0,533	713,348	41,537	54,243%	0,027	2,27E-06	3,2E-08
0,667	681,771	40,170	56,269%	0,026	2,12E-06	3,6E-08
0,800	674,297	33,702	56,748%	0,022	1,98E-06	1,3E-07
0,933	655,505	72,398	57,953%	0,046	1,93E-06	1,7E-07
1,067	658,757	47,224	57,745%	0,030	1,85E-06	5,0E-08
1,200	692,290	66,667	55,594%	0,043	1,72E-06	5,9E-08
1,333	681,661	63,847	56,276%	0,041	1,71E-06	6,0E-08
1,467	676,239	13,089	56,624%	0,008	1,70E-06	7,0E-08

Tabla E.6. Datos de tiempo, densidad aparente, porosidad (ε) y volumen aparente (V_t) con sus respectivas desviaciones estándar para el tratamiento N°6 (95°C-2.5 mm).

Tiempo (h)	Dens. Aparente (kg/m ³)	SD	ε (%)	SD	V_t (m ³)	SD
0,000	1043,70068	15,701	33,053%	0,018	3,06E-06	0,0E+00
0,133	988,392032	4,776	36,601%	0,011	2,73E-06	2,7E-08
0,267	968,977416	49,751	37,846%	0,038	2,52E-06	1,6E-07
0,400	921,897572	29,250	40,866%	0,014	2,36E-06	2,8E-08
0,533	893,923841	31,445	42,660%	0,034	2,18E-06	7,7E-08
0,667	827,645774	62,215	46,912%	0,040	2,05E-06	1,1E-07
0,800	675,483886	19,207	56,672%	0,009	2,01E-06	8,9E-08
0,933	607,788655	36,493	61,014%	0,017	1,94E-06	1,4E-07
1,067	553,241237	8,137	64,513%	0,008	1,90E-06	6,8E-08
1,200	568,139379	75,579	63,557%	0,041	1,75E-06	1,8E-07