

Significant Mass Transfer Factors in Optimizing Drying of Kent Mango Strips by Osmotic Dehydration

Factores Significativos de Transferencia de Masa en Optimización del Secado de Tiras de Mango Kent por Deshidratación Osmótica

Miguel Enrique Alcalá Adrianzén, Magister en Investigación y Docencia Universitaria¹, Guillermo David Evangelista Benites, Doctor en Ciencias e Ingeniería², Segundo Arístides Távora Aponte, Doctor en Ciencia de Materiales²

¹Universidad Privada del Norte, Perú, miguel.alcala@upn.edu.pe,

²Universidad Nacional de Trujillo, Perú, gevangelista@unitru.edu.pe, stavara@unitru.edu.pe

INTRODUCCIÓN

Abstract- In this work, the objective was to determine the level of optimization of drying of Kent mango strips by osmotic dehydration through significant mass transfer factors. The response variables were water loss, solids gain and mass loss. Process factors such as syrup concentration, temperature, process time, mango strip thickness, and syrup/mango mass ratio were first evaluated with the definitive screening design of experiments. The results of the stepwise analysis for the multiple linear regression model identified syrup concentration and mango strip thickness as significant factors, which were evaluated with the response surface (central composite) design of experiments. From the Optimization analysis, the Brix levels determined for the syrup Brix was 60 degrees and the thickness of the Kent mango strips was 4 mm. Although the optimum point was determined, it was more important to identify the optimum region of the process.

Keywords- Definitive screening, Central composite design, Multiple linear regression, Analysis of variance, Design of experiments.

Resumen- En este trabajo el objetivo fue determinar el nivel de optimización del secado de tiras de mango Kent por deshidratación osmótica mediante los factores significativos de transferencia de masa. Las variables respuestas fueron la pérdida de agua, ganancia de sólidos y pérdida de masa. Los factores del proceso como concentración del jarabe, temperatura, tiempo de proceso, espesor de tiras de mango y relación de masas jarabe/mango, se evaluaron primero con el diseño de experimentos de cribado definitivo. Los resultados del análisis escalonado para el modelo de regresión lineal múltiple identificaron como factores significativos la concentración del jarabe y espesor de tiras de mango, estos se evaluaron con el diseño de experimentos de superficie de respuesta (central compuesto). Del análisis de Optimización, los niveles determinados para el Brix del jarabe fue 60 grados y 4 mm el espesor de las tiras de mango Kent. Si bien se determinó el punto óptimo, resultó más importante la identificación de la región óptima del proceso.

Palabras clave- Cribado definitivo, Diseño central compuesto, regresión lineal múltiple, Análisis de varianza, Diseño de experimentos.

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.205>

ISBN: 978-628-95207-0-5 ISSN: 2414-6390

En el Perú, según [1] con información de la SUNAT, se exportó mango fresco en el año 2018, en un volumen de 181802 toneladas; a un precio de 1.244 UD\$/kg. En el 2019 los productores de mango en el norte de Perú recibieron un precio entre 0.22 UD\$/kg a 0.39 UD\$/kg, por la caída de precios en el mercado internacional [2].

Según [3] en la campaña 2019-2020 el 95% del mango exportado fue de la variedad Kent. En la ficha técnica para la variedad Kent, la composición tiene 81.8% de agua, 16.4% de carbohidratos, 0.7% de fibra [4].

Sin embargo, la fruta fresca cortada tiene una muy breve vida útil, debido a las dificultades para mantener sus características originales [5]. Se debe a que algunas operaciones durante el cortado generan cambios en las características fisicoquímicas y fisiológicas, por efecto de la mayor acción enzimática y algunos cambios fisiológicos [6, 7]. Las pérdidas por manejo post cosecha representaron entre 20% - 25% de la producción de frutas, aún en países desarrollados [8].

El secado fue uno de los métodos de conservación más antiguos que se ha utilizado para extender la vida útil de los productos agrícolas al reducir la humedad a un nivel, [9, 10]; entre los métodos de secado, se prefiere el secado solar en los países en desarrollo debido a su bajo costo de capital en la energía de secado [11].

Normalmente el secado solar de mangos requiere dos a tres días, y los mangos se consideran secos cuando han perdido aproximadamente el 80% de humedad (en peso), [12]. La tecnología de secado solar tiene la capacidad de secar en un plazo aceptable, pero puede resultar en cambios físicos, sensoriales y de nutrición no deseados [13, 14].

En el proceso de secado con bomba de calor el aire caliente y seco se extrae del condensador y pasa a través de la cámara de secado que contiene el material húmedo. El aire caliente y húmedo que sale de la cámara de secado pasa al evaporador para deshumidificar el aire de secado, [15]. Otro método empleado es el secado por ventana de refracción (RW) utiliza el principio de refracción de la superficie del agua, una ventana para el paso de la energía infrarroja (IR), el agua es

uno de los medios de transferencia de calor más eficaces, [16]. Capacidad de evaporación hasta $10 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (pulpa de mango con 2 mm, agua a 95°C) se evidenció que RW es un proceso de secado muy eficiente, [17]. Estos métodos se utilizan en combinación con el secado por deshidratación osmótica.

Una alternativa para prolongar la vida útil de los productos cortados es el secado por deshidratación osmótica (DO), la DO involucra procesos en los cuales tienen lugar la pérdida de agua y la ganancia de sólidos, simultáneamente; el requerimiento energético en la DO es menor que en otros procesos de deshidratación, puesto que no hay cambio en el estado del agua, [18]. El alimento en cuestión se reduce en tamaño, de buen sabor y olor, de fácil transportación.

Las variables que afectan la transferencia de masa durante la DO son: la temperatura de la disolución osmótica, el tiempo de inmersión, la estructura (porosidad) del material, la geometría (tamaño, forma y área superficial), la composición de la disolución (peso molecular y naturaleza del soluto), la presión (vacío o atmosférica), el nivel de agitación, la relación disolución-producto y el pretratamiento del producto, [19].

Se han desarrollado muchos modelos matemáticos que representen físicamente el fenómeno de la DO y que a la vez son reproducibles y extrapolables. Sin embargo, las correlaciones que existen están limitadas a un rango muy estrecho de condiciones y de variables y por lo tanto no reflejan adecuadamente las variaciones simultáneas de todas las variables que afectan el proceso, no tienen en cuenta la complejidad del proceso, [20].

[21] evaluaron la concentración de solución osmótica para la DO y la geometría del mango (*Mangifera indica* L.) cortado; la solución osmótica se preparó empleando azúcar sin refinar con concentraciones de 50%, 60% y 70% p/p, en una relación 1:3 fruta/solución. El mango en tajadas en la solución del 70% presentó la mayor pérdida de humedad.

[22] aplicaron DO a tajadas de mango variedad Tommy Atkins utilizando solución de sacarosa en concentraciones de 40%, 44%, 50%, 56% y 60% (p/p), con tiempos de inmersión de 60 min, 78 min, 105 min, 132 min y 150 min, temperaturas de proceso de 30°C , 34°C , 40°C , 46°C y 50°C . Las mejores condiciones en la DO (reducción del 25% de agua y ganancia de sólidos menor al 6%) fueron concentración de solución 44%, temperatura 38°C y tiempo de inmersión 80 min.

[23] en su diseño experimental para optimizar la deshidratación osmótica (DO) de láminas de mango Tommy Atkins, evaluaron el efecto de la temperatura (T) y la concentración de ácido cítrico (AC), a través del método de superficies de respuesta para optimizar los parámetros cinéticos pérdida de peso; ganancia de sólidos, pérdida de humedad y pérdida de actividad acuosa; en soluciones de sacarosa de 55°Brix con ácido cítrico en concentraciones de 1%, 2% y 3% (p/p); las muestras de mango (100 g) en una relación peso muestra/peso solución 1:5; el tiempo fue cuatro horas, temperaturas de 25°C , 35°C y 45°C controladas a través de un baño María con agitación. Los cambios más importantes en los parámetros cinéticos de la DO se presentaron en los primeros 180 minutos. Los óptimos determinados fueron

pérdida de peso 48.66%, pérdida de humedad 48.94%, pérdida de actividad acuosa 4.75% cuando la temperatura es 45°C y la concentración de ácido cítrico es 3%.

La DO de frutas y verduras, en soluciones acuosas de azúcares o sales (sólidos), el flujo de agua desde el alimento a la solución y una transferencia de sólidos de la solución al alimento, a través de la membrana celular, compuesta de células de parénquima que pueden estirarse y expandirse con el incremento de la presión de turgencia, determina que las características del alimento influyen en la pérdida de agua hasta el 50%, durante las primeras dos horas, la ganancia máxima de sólidos en 30 minutos y la temperatura depende del alimento, [24].

La DO incrementa el valor nutricional, sensorial y funcional de los alimentos, ya que es posible controlar el proceso de transferencia de masa bidireccional, esto permite reducir la actividad del agua en el alimento y extender su estabilidad y vida útil, [25].

Las propiedades fisicoquímicas de la pulpa de mango influyen en la DO, debido a las variaciones en el nivel de madurez de la fruta, [26] citado en [27]. La composición química (proteínas, grasas, carbohidratos, minerales, etc.) y propiedades físicas (orientación de la fibra, piel y porosidad) influyen en la DO de los alimentos, [28] citado en [27]. En los procesos de DO intervienen principalmente las células parenquimatosas y se considera que constan de tres partes: un volumen intracelular, un volumen extracelular y una membrana celular que separa los dos volúmenes; la membrana celular generalmente se considera sin volumen, pero agrupa al tonoplasto, la plasmalema y el citoplasma en la denominada resistencia de membrana celular, [29].

Para las diferentes variedades de mango, como Totapuri y Dashehari en estado maduro son apropiadas para deshidratación osmótica, [30] citado en [27]. Las consideraciones anteriores son importantes a tener en cuenta, debido a que el mango se cosecha en la etapa verde madura, tamaño completo, pero con diferentes características del mango maduro, [31] citado en [32].

El tamaño y la forma del producto afecta la DO debido a la variación en la relación superficie / espesor y variación de la difusión del agua y solutos involucrados en el transporte masivo [33]. Hasta cierta relación de superficie total/ espesor medio (A / L) es favorable, exceder este límite de superficie específica (como cubos) favorece el aumento de azúcar a expensas de una menor pérdida de agua, [34] citado en [33].

[35] presentó un modelo empírico para determinar los parámetros cinéticos como la pérdida de agua y la ganancia de sólidos durante la DO.

La pérdida de agua (WL) determinó con la ecuación (1).

$$WL = \frac{(M_0 - m_0) - (M - m)}{M_n} \quad (1)$$

Donde:

M_0 = masa inicial de fruta fresca

M = masa después del tiempo t en DO

m_0 = masa seca de la fruta fresca

m = masa seca después del tiempo t en DO

La ganancia de sólidos (SG) con la ecuación (2).

$$SG = \frac{m - m_0}{M_n} \quad (2)$$

Para la pérdida de masa se definió con la ecuación (3).

$$ML = \frac{(M_0 - M)}{M_n} \quad (3)$$

En este contexto se planteó como objetivo general determinar el nivel de optimización del secado de tiras de mango Kent por deshidratación osmótica mediante los factores significativos de transferencia de masa. Los objetivos específicos fueron:

- 1) Identificar los factores significativos de transferencia de masa en el secado de tiras de mango Kent por deshidratación osmótica.
- 2) Determinar los niveles en los factores significativos de transferencia de masa para la optimización del secado de tiras de mango Kent por deshidratación osmótica.

Desde el punto de vista teórico el insuficiente conocimiento de los efectos relacionados a los factores del proceso de transferencia de masa en la DO, la investigación tuvo como propósito entender sus efectos sobre la pérdida de masa, ganancia de sólidos, pérdida de agua, parámetros cinéticos en la producción de tiras de mango Kent.

II. METODOLOGÍA

La población se consideró la producción de mango del nororiente del Perú, se incluyeron las cosechas de los meses de diciembre, enero y febrero, que tuvieron los precios más bajos del mercado internacional, se excluyeron las cosechas de los meses de octubre, noviembre y marzo cuyos precios son de 20% a 40% más altos, [36]. Se excluyeron también el mango con magulladuras y muy maduro. La muestra se tomó en forma aleatoria del mercado La Hermelinda de la ciudad de Trujillo, que comercializa mango fresco con 24 horas a 48 horas de postcosecha.

La presente investigación tuvo un enfoque cuantitativo, experimental con diseño de superficie de respuesta (MSR) una colección de técnicas matemáticas y estadísticas útiles en la estrategia experimental y de análisis que permiten encontrar las condiciones de operación óptimas de un proceso, [37].

A. Fase de planeación del experimento

Se realizó una planeación cuidadosa para evitar dificultades durante la ejecución del plan experimental, como la disponibilidad de equipos y los aspectos mecánicos del proceso que pueden afectar la capacidad de realizar el experimento.

B. Fase de cribado

El diseño experimental de cribado definitivo considera términos lineales y cuadráticos para identificar los factores significativos, la inclusión de un punto central en el que los predictores se fijan en la mitad de la gama, permiten estimar la suma de los efectos cuadráticos y determinar la curvatura local y la necesidad de experimentos adicionales, [38]. Se utilizó el software Minitab v.19 para crear el diseño.

En el diseño se consideró cinco factores, dos réplicas, dos bloques y dos puntos centrales, un total de 26 corridas aleatorias. Los niveles -1 y 1 para los factores fueron: Temperatura del jarabe (40 y 50) °C, Brix: Concentración del jarabe (50 y 60) °Brix, Tiempo: tiempo de proceso (60 y 120) minutos, Espesor: espesor de tiras de mango Kent (2 y 4) mm, Relación Masas jarabe/mango (3 y 5) g/g, Covariable Brixmango: brix de la pulpa de mango.

C. Fase de optimización

Se utilizó la metodología del diseño de superficie de respuesta (MSR) para refinar el modelo después de identificar los factores significativos con el diseño de cribado. Hay dos tipos principales de diseños, el diseño central compuesto y el diseño de Box-Behnken. Para la investigación se seleccionó el diseño central compuesto (DCC) por que puede ajustarse a un modelo cuadrático completo, [37].

La región experimental fue delimitada por los rangos de experimentación de cada factor. La región de operabilidad fue delimitada por las condiciones donde el equipo o proceso puede ser operado, [39]. El nivel de significancia (α) es la distancia de cada punto axial desde el centro de un diseño central compuesto, un valor igual a uno los coloca en las caras del cubo y se utiliza con 3 niveles de cada factor, [37]. Se seleccionó esta metodología porque los puntos axiales fuera del "cubo" no están en la región de operabilidad, por restricciones del producto.

Para el diseño experimental MSR, diseño para $\alpha = 1$, se consideró dos factores significativos, dos réplicas, 4 bloques, con 28 corridas aleatorias. Diseño factorial completo de dos niveles, 8 Puntos del cubo, 6 Puntos centrales en el cubo, 8 Puntos axiales y 6 Puntos centrales en axial. Los niveles para los factores significativos fueron: -1, 0 y 1.

Para el análisis de datos se utilizó la estadística inferencial. En la primera etapa del análisis, en base a la información y experimentos previos, se identificó estadísticamente los factores significativos y el rango experimental a estudiar.

Análisis para el modelo de regresión lineal múltiple con k variables independientes, ecuación (4), polinomio de primer orden:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \epsilon \quad (4)$$

donde los β_j son los coeficientes de regresión y ϵ es el error aleatorio. En general es un modelo de regresión lineal para los valores β_j . [37].

Pruebas de hipótesis sobre coeficientes individuales del modelo:

$$H_0: \beta_j = 0 \quad (5)$$

$$H_1: \beta_j \neq 0 \quad (6)$$

El estadístico de prueba para examinar la hipótesis está dado por:

$$t_0 = \frac{\hat{\beta}_j}{\sqrt{C_{jj}}} \quad (7)$$

Donde $\hat{\beta}_j$ es un vector, cuya distribución es normal con media β , σ^2 es el cuadrado medio del error y C_{jj} es el elemento de la diagonal de la matriz $(X'X)^{-1}$.

$$\text{Si: } |t_0| > t_{(\alpha/2, n-k-1)} \text{ entonces } H_0 \text{ se rechaza} \quad (8)$$

El rechazo de H_0 implica que el regresor X_j contribuye de manera significativa al explicar la variable respuesta y . También si $\text{valor-p} = P(T > t_0) < \alpha$.

Pruebas de hipótesis en la regresión múltiple.

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0 \quad (9)$$

$$H_1: \beta_1 \neq \beta_2 \neq \dots \neq \beta_k \neq 0 \quad (10)$$

El estadístico de prueba para la significancia del modelo de regresión lineal múltiple está dado por:

$$F_0 = \frac{CM_R}{CM_E} \quad (11)$$

Donde CM_R es el cuadrado medio de regresión y CM_E es el cuadrado medio del error.

$$\text{Si: } F_0 > F_{(\alpha, k, n-k-1)} \text{ entonces } H_0 \text{ se rechaza} \quad (12)$$

El rechazo de H_0 implica que uno de los regresores X_1, X_2, \dots, X_k contribuye de manera significativa al explicar la variable respuesta y . También si $\text{valor-p} = P(F > F_0) < \alpha$.

Luego se optimiza con los datos experimentales recolectados se ajusta los distintos modelos posibles, para cada uno se determina la significancia de la regresión.

Los instrumentos de recolección de datos con certificado de calibración fueron: Analizador de humedad MB45, termómetro digital, balanza analítica y refractómetro.

III. RESULTADOS

A. Identificar los factores significativos de transferencia de masa en el secado de tiras de mango Kent por deshidratación osmótica.

El grado de madurez del mango determina la textura de la pulpa en el proceso de DO, [22]. Los grados brix de la pulpa es una covariable un factor no controlable. En la Fig.1 las variables respuestas no presenta valores atípicos, para el diseño cribado definitivo.

Las pruebas de hipótesis en la regresión múltiple, considerando las ecuaciones (9), (10), (11) y la relación (12) en la Tabla I para la variable respuesta WL, el Valor F = 1.06, en tablas para $F_{(0.95, 7, 18)} = 2.58$. Como el Valor F es menor que

F(Tablas) la regresión no es significativa. Los valores p en la Tabla I son mayores al valor alfa de 0.05, confirmando que los factores del proceso no fueron significativos en este modelo. Para las variables SG y ML también la regresión no fue significativa.

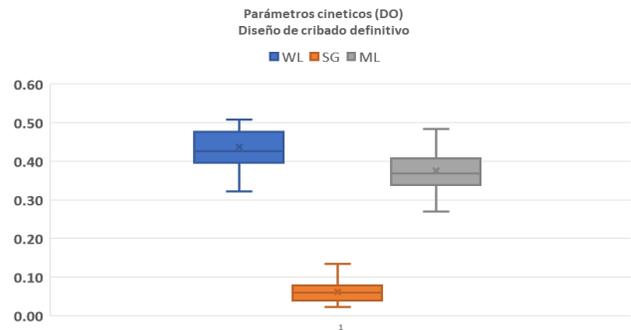


Fig.1 Gráfica con la variabilidad de los resultados del Diseño de cribado definitivo

TABLA I
ANÁLISIS DE VARIANZA DEL DISEÑO DE CRIBADO DEFINITIVO, PARA $\alpha = 0.05$

| Y | Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|----|--------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| WL | Modelo | 7 | 0.018485 | 0.002641 | 1.06 | 0.424 |
| | Error | 18 | 0.044658 | 0.002481 | | |
| | Total | 25 | 0.063143 | | | |
| SG | Modelo | 7 | 0.006169 | 0.000881 | 1.24 | 0.333 |
| | Error | 18 | 0.012798 | 0.000711 | | |
| | Total | 25 | 0.018967 | | | |
| ML | Modelo | 7 | 0.020043 | 0.002863 | 0.87 | 0.55 |
| | Error | 18 | 0.059409 | 0.0033 | | |
| | Total | 25 | 0.079451 | | | |

De la Tabla I, los resultados no permiten identificar factores significativos, el siguiente paso fue un análisis de diseño de cribado definitivo escalonado.

TABLA II
ANÁLISIS DE VARIANZA DEL DISEÑO DE CRIBADO DEFINITIVO ESCALONADO, PARA: α A ENTRAR = 0.1; α A RETIRAR = 0.1

| Y | Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|----|--------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| WL | Modelo | 2 | 0.015295 | 0.007647 | 3.68 | 0.041 |
| | Error | 23 | 0.047849 | 0.00208 | | |
| | Total | 25 | 0.063143 | | | |
| SG | Modelo | 1 | 0.003628 | 0.003628 | 5.68 | 0.025 |
| | Error | 24 | 0.015338 | 0.000639 | | |
| | Total | 25 | 0.018967 | | | |
| ML | Modelo | 1 | 0.01486 | 0.014859 | 5.52 | 0.027 |
| | Error | 24 | 0.06459 | 0.002691 | | |
| | Total | 25 | 0.07945 | | | |

Las pruebas de hipótesis en la regresión múltiple, considerando las ecuaciones (9), (10), (11) y la relación (12) en la Tabla II para la variable respuesta WL, el Valor F = 3.68, en tablas para $F_{(0.90, 2, 23)} = 2.58$. Como el Valor F es mayor que F(Tablas) la regresión es significativa. Los valores p en la Tabla II son menores al valor alfa de 0.10, confirmando que los factores del proceso fueron significativos en este modelo. Para las variables repuestas SG y ML también la regresión fue significativa. El R^2 ajustado en todos los casos fue menor a 18%.

TABLA III

COEFICIENTES CODIFICADOS SELECCIÓN DE TÉRMINOS ESCALONADA, PARA α A ENTRAR = 0.1; α A RETIRAR = 0.1

| Y | Término | Coef | EE del coef. | Valor T | Valor p |
|----|-----------|---------|--------------|---------|---------|
| WL | Constante | 0.43607 | 0.00895 | 48.75 | 0 |
| | Brix | 0.0212 | 0.0102 | 2.07 | 0.049 |
| | Espesor | 0.0178 | 0.0102 | 1.75 | 0.094 |
| SG | Constante | 0.1222 | 0.0265 | 4.62 | 0 |
| | Brixmango | 0.00459 | 0.00192 | -2.38 | 0.025 |
| ML | Constante | 0.3758 | 0.0102 | 36.94 | 0 |
| | Brix | 0.0273 | 0.0116 | 2.35 | 0.027 |

Las pruebas de hipótesis sobre coeficientes individuales del modelo, considerando las ecuaciones (5), (6), (7) y la relación (8) en la Tabla III para la variable respuesta WL el factor Brix fue [Valor T] = 2.07, el factor Espesor un [Valor T] = 1.75; en tablas para $t_{(0.90, 1, 23)} = 1.714$, Como el Valor T es mayor que $t_{(0.90, 1, 23)}$ (Tablas) el factor Brix y el factor espesor tienen efecto significativo. Los valores p en la Tabla III son menores al valor alfa de 0.10, confirmando que los factores del proceso son significativos en este modelo para la pérdida de agua en el secado de tiras de mango Kent por DO.

Para las variables repuestas SG la covariable Brixmango es significativa, para ML el factor Brix es significativo.

Se utilizó el software Minitab v.19 para la solución de optimización de respuesta método de cribado de las variables ML, SG y WL. Los resultados fueron temperatura 40 °C, tiempo 60 minutos, relación masa jarabe/mango 5, concentración de jarabe 60 °Brix, Espesor 4 mm, Covariable Brixmango 13.5 Brix, ML ajuste 0.4181, SG ajuste 0.0473, WL ajuste 0.4655, Deseabilidad compuesta 0.748084.

B. Determinar los niveles en los factores significativos de transferencia de masa para la optimización del secado de tiras de mango Kent por deshidratación osmótica.

En el diseño MSR, los niveles para los factores significativos son: -1, 0 y 1. Para Brix: Concentración del jarabe (50, 55 y 60) °Brix, Espesor: espesor de tiras de mango (3, 4 y 5) mm.

Según [21], [22], [23] y [24] y del análisis de las gráficas de contorno se fijó para los experimentos los valores Temperatura 50 °C, Tiempo 120 minutos, relación de masas jarabe/mango 3:1, [32], [25], [40] y [41].

En la Fig.2 las variables respuestas no presenta valores atípicos para el diseño MSR.

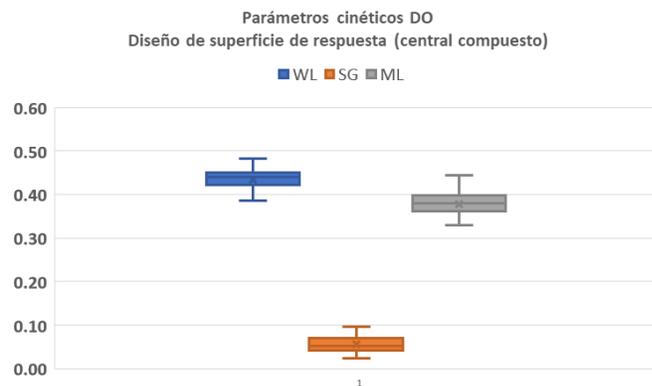


Fig.2 Gráfica con la variabilidad de los resultados del Diseño de superficie de respuesta

TABLA IV

ANÁLISIS DE VARIANZA DEL DISEÑO DE SUPERFICIE DE RESPUESTA (CENTRAL COMPUESTO), PARA $\alpha = 0.05$

| Y | Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|----|--------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| WL | Modelo | 8 | 0.010632 | 0.001329 | 7.2 | 0 |
| | Error | 19 | 0.003509 | 0.000185 | | |
| | Total | 27 | 0.014142 | | | |
| SG | Modelo | 8 | 0.005122 | 0.00064 | 2.15 | 0.081 |
| | Error | 19 | 0.005655 | 0.000298 | | |
| | Total | 27 | 0.010777 | | | |
| ML | Modelo | 8 | 0.008981 | 0.001123 | 2.4 | 0.056 |
| | Error | 19 | 0.008875 | 0.000467 | | |
| | Total | 27 | 0.017856 | | | |

Las pruebas de hipótesis en la regresión múltiple, considerando las ecuaciones (9), (10), (11) y la relación (12) en la Tabla IV para la variable respuesta WL, el Valor F = 7.2, en tablas para $F_{(0.90, 8, 19)} = 2.48$. Como el Valor F es mayor que F(Tablas) la regresión es significativa. Los valores p en la Tabla IV son menores al valor alfa de 0.05, confirmando que los factores del proceso son significativos en este modelo. Para las variables repuestas SG y ML según las pruebas de hipótesis la regresión no fue significativa. El R^2 ajustado en todos los casos es menor a 70%.

Las pruebas de hipótesis sobre coeficientes individuales del modelo, considerando las ecuaciones (5), (6), (7) y la relación (8) en la Tabla V para la variable respuesta WL el factor Brix fue [Valor T] = 4.32, el factor Espesor al cuadrado un [Valor T] = 3.24; en tablas para $t_{(0.95, 1, 19)} = 2.093$, Como el Valor T es mayor que $t_{(0.90, 1, 19)}$ (Tablas) el factor Brix y el factor espesor al cuadrado tienen efecto significativo. Los valores p en la Tabla V son menores al valor alfa de 0.05, confirmando que los factores descritos son significativos en este modelo para la pérdida de agua en el secado de tiras de mango Kent por DO.

Para las variables repuestas SG la covariable Brixmango es significativa, para ML el factor Brix es significativo.

TABLA V

COEFICIENTES CODIFICADOS SELECCIÓN DE TÉRMINOS MSR, PARA $\alpha = 0.05$

| Y | Término | Coef | EE del coef. | Valor T | Valor p |
|----|-----------------|---------|--------------|---------|---------|
| WL | Constante | 0.42377 | 0.00381 | 111.24 | 0 |
| | Brix | 0.01696 | 0.00392 | 4.32 | 0 |
| | Espesor | -0.0008 | 0.00392 | -0.2 | 0.846 |
| | Brix*Brix | 0.00709 | 0.00582 | 1.22 | 0.238 |
| | Espesor*Espesor | 0.01883 | 0.00582 | 3.24 | 0.004 |
| | Brix*Espesor | - | 0.0048 | -1.11 | 0.28 |
| SG | Constante | 0.04508 | 0.00484 | 9.32 | 0 |
| | Brix | 0.00173 | 0.00498 | 0.35 | 0.732 |
| | Espesor | -0.0094 | 0.00498 | -1.89 | 0.075 |
| | Brix*Brix | 0.00217 | 0.00739 | 0.29 | 0.773 |
| | Espesor*Espesor | 0.02317 | 0.00739 | 3.14 | 0.005 |
| | Brix*Espesor | 0.00281 | 0.0061 | 0.46 | 0.65 |
| ML | Constante | 0.37869 | 0.00606 | 62.51 | 0 |
| | Brix | 0.01523 | 0.00624 | 2.44 | 0.025 |
| | Espesor | 0.00863 | 0.00624 | 1.38 | 0.183 |
| | Brix*Brix | 0.00492 | 0.00925 | 0.53 | 0.601 |
| | Espesor*Espesor | -0.0043 | 0.00925 | -0.47 | 0.645 |
| | Brix*Espesor | -0.0082 | 0.00764 | -1.07 | 0.299 |

Se utilizó el software Minitab v.19 para la solución de optimización de respuesta método de diseño de superficie de respuesta (central compuesto), de las variables ML, SG y WL. Los resultados fueron concentración de jarabe 60 °Brix, Espesor 4 mm, ML ajuste 0.39885, SG ajuste 0.0485678, WL ajuste 0.447417, Deseabilidad compuesta 0.630822.

Las ecuaciones de regresión (13), (14) y (15) en unidades no codificadas resultó de procesar los datos en Minitab v.19.

$$WL = 1.164 - 0.0235 \text{ Brix} - 0.0927 \text{ Espesor} + 0.000283 \text{ Brix*Brix} + 0.01883 \text{ Espesor*Espesor} - 0.001069 \text{ Brix*Espesor} \quad (13)$$

$$SG = 0.820 - 0.0114 \text{ Brix} - 0.2257 \text{ Espesor} + 0.000087 \text{ Brix*Brix} + 0.02317 \text{ Espesor*Espesor} + 0.00056 \text{ Brix*Espesor} \quad (14)$$

$$ML = 0.34 - 0.0121 \text{ Brix} + 0.133 \text{ Espesor} + 0.000197 \text{ Brix*Brix} - 0.00434 \text{ Espesor*Espesor} - 0.00163 \text{ Brix*Espesor} \quad (15)$$

En la Fig.3, Fig.4 y Fig.5 Se evidencia el informe en Minitab v.19 para el intervalo de confianza de 95% las variables respuestas ML (0.3765; 0.4212), SG (0.03069; 0.06644) y WL (0.43334; 0.46150).

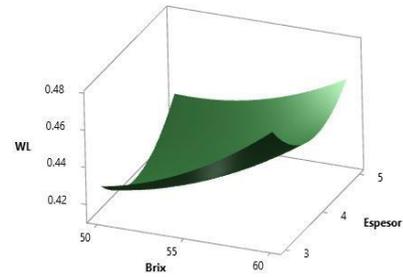


Fig.3 Gráfica de Optimización para WL, los factores Brix y espesor

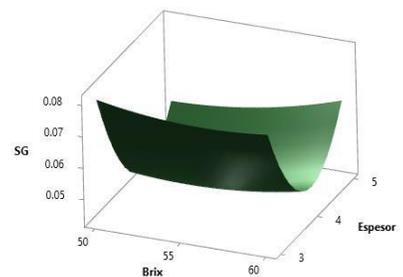


Fig.4 Gráfica de Optimización para SG, los factores Brix y espesor

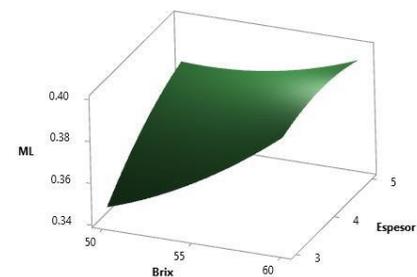


Fig.5 Gráfica de Optimización para ML, los factores Brix y espesor

IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

A. Discusión

Se identificó como factores significativos el Brix del jarabe y el espesor de las tiras de mango Kent en el proceso de transferencia de masa en el secado por DO. El análisis del diseño de cribado escalonado se realizó a un nivel de significancia de 0.10. [38] coinciden con la metodología

utilizada afirmando que un estudio de cribado se utiliza para reducir el número de predictores en diseños optimizados para resolver el comportamiento de primer orden y se combina con modelos de superficie de respuesta cuando la curvatura se vuelve crítica. Según [21] para condiciones similares en el proceso de DO, el factor significativo fue la concentración del jarabe a 70 °Brix, pero este valor difiere debido a que la región de operabilidad de esta investigación es de menor rango, una restricción muy importante. [20] también observaron que el rango muy estrecho de condiciones y de variables no permite reflejar las variaciones simultáneas de todas las variables que afectan el proceso, Fig.1 y Fig.2.

En la aplicación del modelo diseño de superficie de respuesta (central compuesto), se fijaron los niveles de temperatura a 50 °C, el tiempo a 120 minutos y la relación de masas jarabe/pulpa a la proporción 3:1. [42] aplicaron similar metodología en su investigación para el mango cv. Tommy Atkins, pero utilizaron como factores significativos a la temperatura y la concentración de ácido cítrico del jarabe.

El nivel de optimización del secado de tiras de mango Kent por DO, se determinó como resultado del Diseño de superficie de respuesta (central compuesto). Los niveles son para el Brix del jarabe un valor de 60 grados y un valor de 4 mm el espesor de las tiras de mango Kent, el intervalo de confianza de 95% para la variable respuesta WL calculada entre 0.43334 y 0.46150; de la variable respuesta GS entre 0.03069 y 0.06644; de la variable respuesta ML entre 0.3765 y 0.4212. [43] utilizó mangos (variedad Kent de Brasil) para DO con tiempos de inmersión de 0,5h a 5h en solución de sacarosa de 50 °Brix, una proporción de 1:25 de rodaja de mango a jarabe (p/p), discos de mango con 38 mm de diámetro y 8 mm de espesor. La pérdida de agua WL, después de 120 minutos fue de 0,35 (35%). [44] utilizó mango (cv Kent de Brasil) para la DO en cubos de 12mm x 12mm x 12mm; (250 g) sumergidos en 1 L de solución OD de sacarosa de 60 °Brix, 2% de lactato de calcio y 0,48% de pectina metilesterasa a 50 °C durante 0h a 29h; bajo agitación continua. La pérdida de agua WL, después de 120 minutos fue de 0,37 (37%). Se evidencia que la pérdida de agua WL es mayor a 4 mm.

El análisis de varianza para el modelo de regresión de superficie de respuesta a un nivel de significancia de 0.05, confirmó que el factor Brix y el término cuadrado del factor espesor son significativos para la pérdida de agua (WL). [45] en su investigación coincide con el procedimiento utilizado afirmando en que una interpretación estadística satisfactoria requiere siempre un conocimiento de la materia.

Limitaciones

La coyuntura por la Pandemia del Covid 19 influyeron en la realización de los experimentos, se incluyó bloques en el diseño. La estabilidad de la temperatura del proceso se vio limitada por la tecnología (rango de variación de +/- 10 °C). El grado de madurez del mango Kent es un factor que no se tuvo control y tiene influencia en el proceso de DO. La precisión en el corte de las tiras de mango limita a valores enteros para mayor aproximación en la región óptima.

B. Conclusiones

Se concluyó que la determinación del nivel de optimización del secado de tiras de mango Kent por DO utilizando el diseño de cribado definitivo y luego el diseño de superficie de respuesta (central compuesto) fue una metodología cuyos resultados estadísticamente fueron significativos. Si bien se determinó el punto óptimo, resultó más importante la identificación de la región óptima con las gráficas de contorno.

Se concluyó que la identificación de los factores significativos en la transferencia de masa del secado de tiras de mango Kent por DO, mediante el análisis de varianza el cribado paso a paso (escalonado) fue una metodología con resultados muy importantes, a pesar de rangos estrechos entre niveles para el Brix del jarabe, temperatura del jarabe, tiempo de proceso, el espesor de tiras de mango y la relación de masas jarabe/mango, factores del proceso. Si bien los coeficientes de determinación R^2 ajustados son bajos, el análisis de varianza evidencia una relación significativa entre los factores sobre la variable respuesta.

Se concluyó que la determinación de los niveles de los factores significativos para la optimización del secado por DO, utilizando el diseño de superficie de respuesta (central compuesto), fue una metodología con resultados estadísticamente significativos, según se observó en la deseabilidad compuesta. Los niveles determinados para el Brix del jarabe y el espesor de tiras de mango, en la transferencia de masa, optimizan las variables respuestas como la pérdida de agua, ganancia de sólidos y pérdida de masa en el proceso de DO. En el análisis de regresión los coeficientes de determinación R^2 ajustados son bajos, sin embargo, lo que recomendamos es poner el proceso a correr en la mejor condición encontrada con el análisis y ver cómo mejora el secado por DO.

Implicancias

La optimización del secado de mango Kent por DO, se da en rangos estrechos para los diferentes factores de transferencia de masa, esto implica utilizar la metodología del paso a paso (escalonado) en el análisis del modelo de regresión. Por tanto, se requiere control estable de la temperatura y capacidad de respuesta con la precisión del circuito de detección, siendo crítico para el control. En la teoría de la optimización los factores tienen valores continuos, pero existe dificultad para su ejecución lo que implica teóricamente determinar la región óptima de trabajo en lugar del óptimo para el secado por DO.

Para futuros trabajos de investigación se recomienda profundizar en la relación del espesor, la concentración de sólidos solubles (°Brix) de la pulpa de mango Kent y la concentración de la solución osmótica, a fin de conocer mejor el comportamiento de la DO en la pérdida de agua WL, evidenciado en las gráficas de contorno del presente estudio.

REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Agricultura y Riego. (2019). Mango reporte diario de precios y mercado en Piura. Enero 19, 2020, de Dirección general de seguimiento y evaluación de políticas. Sitio web: http://siea.minagri.gob.pe/siea/sites/default/files/Reporte%20Mango_0702_19.pdf
- [2] G. Gargurevich, (2017). Los reyes del mango. Febrero 14, 2020, de Red agrícola Sitio web: <http://www.redagricola.com.pe/los-reyes-del-mango/>
- [3] Á. Gamara, (2019). Mangos Perú inicio temporada y proyecta exportar 210 mil toneladas. Febrero 14, 2020, de Portalfruticola.com Sitio web: <https://www.portalfruticola.com/noticias/2019/10/11/mangos-peru-inicio-temporada-y-proyecta-exportar-210-mil-toneladas/>
- [4] Navarro Fruits. (2020). Ficha técnica mango Kent. Febrero 14, 2020, de Navarro Fruits S.A.C. Sitio web: <https://navarrofuits.com.pe/wp-content/uploads/2016/09/navarrofuits-ficha-tecnica-mango-kent.pdf>
- [5] R. Soliva-Fortuny, & O. Martín-Belloso, New advances in extending the shelf-life of fresh-cut fruits: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 14(9), 341-353, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(03\)00054-2](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(03)00054-2)
- [6] P. Toivonen, & D. Brummell, Biochemical bases of appearance and texture changes in fresh-cut fruit and vegetables. Postharvest biology and technology, 48(1), 1-14, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.09.004>
- [7] J. Torres, P. Talens, J. Carot, A. Chiralt, and I. Escriche, Volatile profile of mango (*Mangifera indica* L.), as affected by osmotic dehydration. *Food Chemistry*, 101 (1), 219-228, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.01.020>
- [8] R. Sharma, D. Singh, y R. Singh, Control biológico de enfermedades poscosecha de frutas y verduras por antagonistas microbianos: una revisión. *Control biológico*, 50 (3), 205-221, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2009.05.001>
- [9] X. Duan, X. Yang, G. Ren, Y. Pang, L. Liu, y Y. Liu, Aspectos técnicos en liofilización de alimentos. *Tecnología de secado*, 34 (11), 1271-1285, 2016. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1099545>
- [10] C. Niamnuy, S. Devahastin, y S. Soponronnarit, Algunos avances recientes en la modificación microestructural y el monitoreo de alimentos durante el secado: una revisión. *Revista de Ingeniería de Alimentos*, 123, 148-156, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.08.026>
- [11] T. Tunde-Akintunde, Mathematical modeling of sun and solar drying of chilli pepper. *Renewable energy*, 36(8), 2139-2145, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.01.017>
- [12] X. Zheng, L. Ye, T. Jiang, G. Jing, & J. Li, "Limiting the deterioration of mango fruit during storage at room temperature by oxalate treatment," *Food Chemistry*, 130(2), 279-285, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.07.035>
- [13] R. Ouaabou, B. Nabil, N. Hidar, L. Lahnine, A. Idlimam, A. Lamharar, ... & M. Mahrouz, "Valorization of solar drying process in the production of dried Moroccan sweet cherries," *Solar Energy*, 172, 158-164, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.05.079>
- [14] J. Pott, M. Marx, S. Neidhart, W. Mühlbauer, & R. Carle, "Quantitative determination of β -carotene stereoisomers in fresh, dried, and solar-dried mangoes (*Mangifera indica* L.)," *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(16), 4527-4531, 2003. [http://refhub.elsevier.com/S0023-6438\(19\)30543-2/sref25](http://refhub.elsevier.com/S0023-6438(19)30543-2/sref25)
- [15] K. K. Patel, & A. Kar, "Heat pump assisted drying of agricultural produce—an overview," *Journal of food science and technology*, 49(2), 142-160, 2012. DOI 10.1007/s13197-011-0334-z, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3550864/>
- [16] H. T. Sabarez, "Thermal drying of foods. In Fruit Preservation," (pp. 181-210). Springer, New York, NY, 2018 https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3311-2_7
- [17] M. F. Zotarelli, B. A. M. Carciofi, & J. B. Laurindo, "Effect of process variables on the drying rate of mango pulp by Refractance Window," *Food Research International*, 69, 410-417, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2015.01.013>
- [18] J. Zuluaga, M. Cortes, & E. Rodríguez, "Evaluación de las características físicas de mango deshidratado aplicando secado por aire caliente y deshidratación osmótica," *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 25(4), 127-135, 2010. https://www.researchgate.net/profile/Eduardo_Rodriguez-Sandoval/publication/287695425_Evaluation_of_physical_characteristics_of_dried_mango_applying_hot_air_drying_and_osmotic_dehydration/files/57c7917308ae9d64047ea19e/Evaluation-of-physical-characteristics-of-dried-mango-applying-hot-air-drying-and-osmotic-dehydration.pdf
- [19] S. Sablani, & M. Rahman, "Effect of syrup concentration, temperature and sample geometry on equilibrium distribution coefficients during osmotic dehydration of mango," *Food Research International*, 36(1), 65-71, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(02\)00109-6](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(02)00109-6)
- [20] C. Ochoa, & A. Ayala, "Mathematical models of mass transfer in osmotic dehydration," *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 4(5), 330-342, 2009. <https://doi.org/10.1080/11358120509487660>
- [21] J. Oviedo, A. Franco, A. Quintero, "Estudio preliminar de la deshidratación osmótica de mango (*Mangifera indica* L.), como pretratamiento para su conservación," XXI Congreso Interamericano de Ingeniería Química. Lima, Perú, 24 al 27 de Abril, 2005. [Consultado en diciembre 18, 2009]. URL disponible en: <http://www.ciiq.org/variop/pe/2005/esp/posters.htm>
- [22] P.M. Azoubel, y F.O. Da Silva, "Optimización de la deshidratación osmótica de la fruta de mango 'Tommy Atkins'," *Revista internacional de ciencia y tecnología de alimentos*, 43 (7), 1276-1280, 2008. http://www.cpatsa.embrapa.br/public_electronica/downloads/OPB1803.pdf [23] J. Montoya, & A. Rodas, "Deshidratación osmótica de láminas de mango cv. Tommy Atkins aplicando metodología de superficies de respuesta," *Revista Facultad Nacional de Agronomía-Medellín*, 65(1), 6507-6518, 2012. <https://www.redalyc.org/pdf/1799/179924340021.pdf>
- [24] D. Torreggiani, "Osmotic dehydration in fruit and vegetable processing," *Food Research International*, 26(1), 59-68, 1993. [https://doi.org/10.1016/0963-9969\(93\)90106-S](https://doi.org/10.1016/0963-9969(93)90106-S)
- [25] A. Czurzyńska, H. Kowalska, K. Czajkowska, & A. Lenart, "Osmotic dehydration in production of sustainable and healthy food," *Trends in Food Science & Technology*, 50, 186-192, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.01.017>
- [26] H.N. Lazarides, "Reasons and possibilities to control solids uptake during osmotic treatment of fruits and vegetables," pp. 33-42, In P. Fito, A. Chiralt, J.M. Barat, W.E.L. Spiess, & D. Behnilian, (Eds.), *Osmotic dehydration and vacuum impregnation: Applications in food industries*, USA, Technomic Publication Corporation, 2002.
- [27] J. Ahmed, I. Qazi, & S. Jamal, "Developments in osmotic dehydration technique for the preservation of fruits and vegetables," *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 34, 29-43, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.01.003>
- [28] M.S. Rahman, "Drying and food preservation," In M.S. Rahman, *Handbook of Food Preservation*. 2nd Ed, CRC press, 412, 2007.
- [29] J. Flourey, A. Le Bail, & Q. Pham, "A three-dimensional numerical simulation of the osmotic dehydration of mango and effect of freezing on the mass transfer rates," *Journal of Food Engineering*, 85(1), 1-11, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.06.011>
- [30] R.B. Tiwari, & S. Jalali, Studies on osmotic dehydration of different varieties of mango. In *proceeding of First Indian Horticulture congress-2004*, New Delhi, 2004.
- [31] J. K. Brecht, & E. M. Yahia, "Postharvest Physiology," In R. E. Litz (Ed.), *The mango: botany, production and uses*. (pp. 484-528), Wallington, UK: CABI Publishing, 2009.
- [32] I. Sulistyawati, M. Dekker, V. Fogliano, & R. Verkerk, "Osmotic dehydration of mango: Effect of vacuum impregnation, high pressure, pectin methyltransferase and ripeness on quality," *LWT Food Science and Technology*, 98, 179-186, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.08.032>
- [33] C. Tortoe, "A review of osmodehydration for food industry," *African Journal of Food*, 2010. <http://www.academicjournals.org/ajfs>, ISSN 1996-0794 ©2010 Academic Journals, https://academicjournals.org/article/article1380724248_Tortoe.pdf
- [34] C. R. Lerici, D. Mastracola, M. C. Nicola, "Use of direct osmosis as fruit and vegetables dehydration," *Acta Alimentaria* 2XV, 35-40, 1988.
- [35] N. M. Panagiotou, V. T. Karathanos, & Z. B. Maroulis, "Mass transfer modelling of the osmotic dehydration of some fruits," *International journal of food science & technology*, 33(3), 267-284, 1988. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2621.1998.00167.x>
- [36] SIICEX. (2022). Producto / Mango. febrero, 2022, de Ministerio de Comercio Exterior y Turismo Sitio web: http://www.siicex.gob.pe/siicex/portal5ES.asp?_page_=172.17100&_port

letid =sfichaproductoinit&scriptdo=cc fp init&pproducto=118&pnompr
oducto=Mango

- [37]D. Montgomery, *Diseño y análisis de experimentos*. Limusa Wiley, 2005.
- [38]R. Lee, “Statistical design of experiments for screening and optimization,” *Chemie Ingenieur Technik*, 91(3), 191-200, 2019. <https://doi.org/10.1002/cite.201800100>
- [39]G. Humberto, & R. De La Vara, *Análisis y diseño de experimentos*, Editorial Mc Graw Hill, 2008.
- [40]G. Giraldo, P. Talens, P. Fito, and A. Chiralt, “Influence of sucrose solution concentration on kinetics and yield during osmotic dehydration of mango,” *Revista de ingeniería de alimentos*, 58 (1), 33-43, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(02\)00331-X](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00331-X)
- [41]K. Zou, J. Teng, L. Huang, X. Dai, and B. Wei, “Effect of osmotic pretreatment on quality of mango chips by explosion puffing drying,” *LWT-Ciencia y tecnología de los alimentos*, 51 (1), 253-259, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.11.005>
- [42]J. Montoya, & A. Rodas, “Deshidratación osmótica de láminas de mango cv. Tommy Atkins aplicando metodología de superficies de respuesta,” *Revista Facultad Nacional de Agronomía-Medellín*, 65(1), 6507-6518, 2012. <https://www.redalyc.org/pdf/1799/179924340021.pdf>
- [43]W. Tedjo, K. A. Taiwo, M. N. Eshtiaghi, & D. Knorr, “Comparison of pretreatment methods on water and solid diffusion kinetics of osmotically dehydrated mangos,” *Journal of Food Engineering*, 53(2), 133-142, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00149-2](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00149-2)
- [44]I. Sulistyawati, R. Verkerk, V. Fogliano, & M. Dekker, “Modelling the kinetics of osmotic dehydration of mango: Optimizing process conditions and pre-treatment for health aspects,” *Journal of Food Engineering*, 280, 109985, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.109985>
- [45]M. Mäkelä, “Experimental design and response surface methodology in energy applications: A tutorial review,” *Energy Conversion and Management*, 151, 630-640, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.09.021>