

RECYT

Año 23 / N° 35 / 2021 / 54–60

Secado y estimación de coeficientes efectivos de difusión de recubrimientos con contenido reducido de azúcar

Drying and effective diffusion coefficient estimation of confectionery coatings with low-sugar content

Bárbara E. Meza^{1,*}, Daiana A. Beuter², Luis A. Brumovsky² y Juan Manuel Peralta¹

1- Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química (INTEC), Universidad Nacional del Litoral (UNL) – Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Predio CONICET Santa Fe, Colectora Ruta Nacional 168, Km 0, Paraje El Pozo S/N. (3000). Santa Fe, Argentina.

2- Facultad de Ciencias Exactas, Química y Naturales, Universidad Nacional de Misiones. Félix de Azara 1552. (N3300LQH). Posadas, Misiones, Argentina.

*E-mail: bmeza@intec.unl.edu.ar

Recibido: 16/02/2021; Aprobado 27/04/2021

Resumen

Se estudió la cinética de secado y se estimaron los coeficientes efectivos de difusión de recubrimientos con contenido reducido de azúcar elaborados con un edulcorante comercial a base de stevia. Las formulaciones se elaboraron por triplicado utilizando cacao amargo, azúcar impalpable, una solución comercial con 7% p/p de glucósidos de steviol como sustitutivo del azúcar y aceite de soja. Se evaluaron diferentes porcentajes de stevia (75% y 50%) como edulcorante en reemplazo del azúcar, tomando como control la muestra con 100% de azúcar. El proceso de secado se llevó a cabo en una estufa con convección natural a 50 (± 1)°C y humedad relativa ambiente de 17 (± 2)%. La pérdida de humedad con el tiempo fue analizada aplicando el modelo matemático de capa fina logarítmico. Para la estimación de los coeficientes efectivos de difusión, se usó un modelo matemático simplificado derivado de la segunda ley de difusión de Fick. El cálculo de las humedades de equilibrio se realizó determinando las isotermas de desorción de agua a 50°C. A partir de los resultados obtenidos, se pudieron obtener satisfactoriamente parámetros de secado y coeficientes efectivos de difusión útiles para el estudio de la transferencia de materia que pueda ocurrir durante un proceso de recubrimiento.

Palabras clave: Baños de repostería; Desorción de agua, Stevia; Edulcorantes naturales.

Abstract

The drying kinetics and the estimation of the effective diffusion coefficients of confectionery coatings with low-sugar content were studied, made with a commercial stevia-based sweetener. Formulations were prepared in triplicate using defatted cocoa powder, icing sugar, commercial steviol glycosides solution (7% w/w) as sugar substitute, and soybean oil. Different contents of stevia (75% and 50%) were evaluated as sugar replacement, considering the formulation with 100% sugar as control sample. The drying process was carried out in an oven with natural convection at 50 (± 1)°C and relative ambient humidity of 17 (± 2)%. The loss of moisture over time was analysed by applying the logarithmic thin layer mathematical model. For the estimation of the effective diffusion coefficients, a simplified mathematical model derived from Fick's second diffusion law was used. The calculation of equilibrium moisture contents was performed by determining the water desorption isotherms at 50°C. The obtained results indicated that drying parameters and effective diffusion coefficients could be obtained, being useful information for further studies about mass transfer that may occur during a coating process.

Keywords: Confectionery coatings, Moisture desorption; Stevia; Natural sweeteners.

Introducción

La elaboración de productos con bajo contenido de azúcar resulta estratégica para un sector de la industria dedicada a la elaboración de productos con alto valor agregado. Esta clase de alimentos, considerados “saludables”,

se encuentra dirigido a un sector amplio y específico de la población. Son personas que desean o necesitan consumir productos con contenido calórico reducido y un perfil nutricional adecuado, debido a su condición física y/o metabólica (por ejemplo, personas con sobrepeso, obesidad, diabetes y/o dislipemias) [1, 2].

Los recubrimientos comestibles le otorgan a los alimentos características sensoriales específicas, como color, brillo, textura y sabor a chocolate. Además, permiten controlar variables tecnológicas, como el tiempo de vida útil y las condiciones de almacenamiento [3]. Las coberturas dulces, como los baños de repostería, se utilizan tradicionalmente para recubrir productos panificados (galletitas, alfajores, tortas), y son elaborados con azúcares simples (sacarosa o azúcar impalpable), grasas vegetales (aceites y margarinas) y otros ingredientes (cacao y sólidos de leche) [4]. La sustitución parcial de este azúcar simple por edulcorantes, resulta una estrategia novedosa para elaborar alimentos recubiertos con propiedades nutricionales específicas. Por ejemplo, la stevia comercial es un edulcorante natural derivado de las hojas de la *Stevia rebaudiana* Bertoni y es considerado un producto heterogéneo compuesto por varios glucósidos de steviol (estevisósidos y rebaudiósidos). Estos glucósidos son los responsables de la capacidad edulcorante de la stevia, que posee hasta 300 veces más poder endulzante en comparación con la sacarosa [5, 6].

La calidad de los alimentos recubiertos dependerá de las características de la cobertura, del alimento a recubrir y de la interacción entre ambos. Por este motivo, la modificación en el contenido de azúcar y la adición de edulcorantes puede generar problemas tecnológicos en estos productos, asociados a posibles modificaciones en el comportamiento durante el secado. Esto último se debe principalmente a que una disminución en el contenido de azúcar produce cambios en la difusión de vapor de agua y en las propiedades de sorción de los recubrimientos [7].

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, el objetivo de este trabajo fue obtener los parámetros del proceso de secado y estimar los coeficientes efectivos de difusión de recubrimientos con contenido reducido de azúcar elaborados con un edulcorante comercial a base de stevia. La información publicada en este trabajo no se encuentra disponible en la literatura actual, considerándola necesaria para la posterior realización de estudios relacionados a la transferencia de materia durante un proceso de recubrimiento de alimentos.

Materiales y métodos

Elaboración de los recubrimientos

Se elaboraron recubrimientos utilizando las proporciones descritas en la Tabla 1. Se utilizaron los siguientes ingredientes comerciales: azúcar impalpable (San Diego, Santa Fe, Argentina), solución comercial con 7% p/p de glucósidos de steviol (Dulri SA, Buenos Aires, Argentina), cacao amargo en polvo (Sucesores de José Salgado SAIC, Buenos Aires, Argentina) y aceite de soja (Aceitera General Deheza, Córdoba, Argentina). Además, se usó glicerina como plastificante (Cicarelli, Santa Fe, Argentina), lecitina de soja como emulsionante (Laboratorios Yeruti

SRL, Santa Fe, Argentina), sorbato de potasio como conservante (Cicarelli, Santa Fe, Argentina) y agua potable.

Los ingredientes se pesaron para obtener 300 g de cada formulación por triplicado. Los mismos se mezclaron utilizando una batidora de mesa planetaria PE-BM65V (Peabody SA, Argentina) con un batidor de acero inoxidable tipo lira para minimizar la incorporación de burbujas de aire. Se utilizó la velocidad 1 (~50 rpm) por 5 min y posteriormente la velocidad 2 (~85 rpm) durante 5 min. Las formulaciones obtenidas fueron colocadas en recipientes plásticos con cierre hermético y se almacenaron a una temperatura de 7°C durante 16 h hasta su posterior secado.

Tabla 1: Ingredientes utilizados para elaborar recubrimientos elaborados con cacao y contenido reducido de azúcar.

Código	Ingrediente [% p/p]*					
	Azúcar	Cacao	Stevia ¹	Glicerina	Grasa ²	Agua
100% azúcar	40	20	0	1	6	33
75% azúcar	30	20	1	1	6	42
50% azúcar	20	20	2	1	6	51

1- Stevia = solución comercial con 7% p/p de glucósidos de steviol.
2- Grasa = mezcla de aceite de soja (5% p/p) y lecitina de soja (1% p/p). *En todas las formulaciones se utilizó 0,1% p/p de sorbato de potasio como conservante.

Secado de los recubrimientos

Una alícuota de cada formulación fue pesada y colocada en recipientes de vidrio de dimensiones conocidas (9 cm de diámetro y 2 cm de alto) por triplicado. Los recipientes fueron recubiertos con papel de aluminio para favorecer el desprendimiento de las coberturas una vez secas. Las muestras se secaron en una estufa eléctrica con convección natural Dalvo TDC60 (Tecno Dalvo SRL, Santa Fe, Argentina) a 50 (± 1)°C y 17 (± 2)% de humedad relativa. La temperatura fue controlada utilizando un controlador Dhacel CD101 (Dhacel S.R.L., Buenos Aires, Argentina) y la humedad relativa se monitoreo con un registrador Schwyz DAT 10 (Schwyz, China). Los recipientes con las muestras se pesaron utilizando una balanza analítica cada 60 min durante 7 h. La temperatura dentro de la estufa se consideró constante debido a que se registraron variaciones menores a ± 2°C en los ciclos de apertura y cierre de la misma al manipular las muestras.

La pérdida de la humedad (M_t) con el tiempo (t) en relación con la humedad inicial (M_0) de las muestras fue analizada aplicando un modelo matemático de capa fina semiempírico (o modelo logarítmico) derivado del primer término de la solución general de la segunda ley de difusión de Fick [8]:

$$\frac{M_t - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = a \exp(-kt) + c \quad (\text{Ec. 1})$$

donde M_t es la humedad de la muestra (base seca) al tiempo t [kg kg^{-1}], M_0 es la humedad inicial de la muestra (base seca), M_{eq} es la humedad de equilibrio de la muestra (base seca) en las condiciones de estudio [kg kg^{-1}], t es el tiempo [min], k es la constante cinética de secado [min^{-1}] y los parámetros a y c son empíricos y adimensionales. Los valores de M_{eq} se determinaron utilizando la información obtenida de las isothermas de desorción de agua a 50°C .

Determinación de espesores de los recubrimientos

Por un lado, los espesores iniciales de los recubrimientos fueron calculados por triplicado utilizando los valores de las densidades, los pesos iniciales y los radios de los recipientes de vidrio utilizados para secar las muestras (4,5 cm). Las densidades de las formulaciones a $25 (\pm 1)^\circ\text{C}$ fueron determinadas gravimétricamente por quintuplicado pesando en una balanza analítica una cantidad de muestra determinada en recipientes Eppendorf con volúmenes conocidos ($1,89 \text{ cm}^3$). Los valores obtenidos fueron $1209 (\pm 10) \text{ kg m}^{-3}$, $1160 (\pm 12) \text{ kg m}^{-3}$ y $1137 (\pm 12) \text{ kg m}^{-3}$ para las formulaciones 100% azúcar, 75% azúcar y 50% azúcar, respectivamente. Los valores de los espesores iniciales obtenidos fueron $1,31 (\pm 0,03) \text{ mm}$ para las muestras 100% azúcar, $1,50 (\pm 0,05) \text{ mm}$ para 75% azúcar y $1,67 (\pm 0,01) \text{ mm}$ para 50% azúcar, respectivamente.

Por otro lado, los espesores finales obtenidos luego del proceso de secado fueron medidos (10 réplicas) utilizando un micrómetro digital Schwyz ESP1-001PLA (Schwyz, Suiza). En este caso se obtuvieron los siguientes valores: $1,14 (\pm 0,12) \text{ mm}$, $1,15 (\pm 0,11) \text{ mm}$ y $0,97 (\pm 0,15) \text{ mm}$ para las formulaciones 100% azúcar, 75% azúcar y 50% azúcar, respectivamente.

Isothermas de desorción de agua

Los recubrimientos secos obtenidos en las condiciones especificadas anteriormente se cortaron en trozos de igual tamaño (aproximadamente $5 \times 5 \text{ mm}$) y se dispusieron en pequeños recipientes de plástico debidamente rotulados por triplicado. Los mismos se colocaron en un ambiente conteniendo agua pura (100% de humedad relativa ambiente) a 25°C durante 3 días para su completa saturación. Luego, los recipientes fueron distribuidos por duplicado en frascos de vidrio herméticamente sellados conteniendo en su interior distintas soluciones salinas saturadas con actividad de agua (a_w) conocida, de acuerdo a la metodología previamente utilizada [9]. Se usaron ocho soluciones salinas dentro del rango de a_w entre 0,189 y 0,848 obtenidos de la literatura [10, 11] (Tabla 2). Posteriormente, los frascos se almacenaron en una estufa con convección natural a

una temperatura controlada de $50 (\pm 1)^\circ\text{C}$ durante 20 días. De acuerdo a experimentos preliminares, este tiempo fue suficiente para que las muestras alcancen la humedad de equilibrio (peso constante). Esta temperatura fue seleccionada debido a que corresponde a la temperatura utilizada para realizar el proceso de secado.

Tabla 2: Actividad de agua (a_w) de soluciones salinas saturadas a 50°C .

Sal	a_w [-]
Acetato de potasio ($\text{CH}_3\text{CO}_2\text{K}$)	0,189
Cloruro de magnesio (MgCl_2)	0,305
Carbonato de potasio (K_2CO_3)	0,427
Nitrato de magnesio ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$)	0,454
Cloruro de cobalto (CoCl_2)	0,500
Cloruro de sodio (NaCl)	0,744
Cloruro de potasio (KCl)	0,812
Nitrato de potasio (KNO_3)	0,848

Luego se determinó el contenido de humedad en base seca por método gravimétrico utilizando una estufa de vacío Yamato ADP310C (Yamato Scientific America Inc., California, USA) a $70 (\pm 1)^\circ\text{C}$ y 0,01 atm de presión durante 6 h. Los valores experimentales de las humedades de equilibrio M_{eq} se analizaron aplicando el modelo teórico de GAB [12]:

$$M_{eq} = \frac{CKa_w M_m}{(1 - Ka_w)[1 + (C - 1)Ka_w]} \quad (\text{Ec. 2})$$

donde M_m es la humedad de la monocapa (base seca) [kg kg^{-1}]. Los parámetros teróricos adimensionales C y K se relacionan con el calor de sorción de la región de la monocapa y la multicapa, respectivamente.

Estimación de los coeficientes efectivos de difusión

Se utilizó un modelo matemático simplificado derivado de la segunda ley de difusión de Fick [13] para la estimación de los coeficientes efectivos de difusión de agua (D_{ef}) de los recubrimientos a la temperatura de secado (50°C). Para el desarrollo, se tuvo en cuenta un sistema isotrópico y homogéneo con transferencia de masa en una de las superficies del recubrimiento, asumida como un sistema en dos dimensiones y considerándolo como una placa plana infinita de espesor constante y humedad inicial M_0 . La superficie de la placa en contacto con el recipiente que la contenía se la consideró aislada a la transferencia y la superficie en contacto con el aire se la consideró en equilibrio con el medio circundante. Esta última consideración se basó en suponer que la resistencia a la transferencia de agua en la capa circundante a la placa es despreciable en comparación a su contraparte interna. Es decir que el proceso presenta valores del número de Biot másico muy grandes ($Bi = k_c L / D_{ef} > 10^3$). Esto puede verificarse teniendo en cuenta que los espesores de la placa (L) considerados se encuentran en el orden de 10^{-3}

m, que en productos alimenticios se ha observado que el coeficiente de transferencia superficial de masa (k_c) es del orden de 10^{-2} m s $^{-1}$ [14] y que D_{ef} es del orden de 10^{-11} m 2 s $^{-1}$. Entonces, se cumple que $Bi = O(10^5)$. Por lo tanto, la humedad de la placa M_t se puede calcular con la siguiente expresión:

$$\frac{M_t - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left[-\frac{\pi^2}{4}(2n-1)^2 Fo\right] \quad (\text{Ec. 3})$$

donde Fo es el número de Fourier másico ($D_{ef}t/L^2$), D_{ef} es el coeficiente efectivo de difusión de agua [m 2 s $^{-1}$] y L es el espesor total de la placa [m].

Además, teniendo en cuenta que se espera que los términos de la sumatoria de la Ec. (3) disminuyan en un orden de magnitud ($Fo > 0,3$), entonces el primer término será representativo y por lo tanto:

$$\frac{M_t - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \approx \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2}{4} \frac{D_{ef}t}{L^2}\right) \quad (\text{Ec. 4})$$

reordenando la Ec. (4) y aplicando logaritmos:

$$\ln\left(\frac{M_t - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}}\right) \approx \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \frac{\pi^2}{4} \frac{D_{ef}}{L^2} t = A + Bt \quad (\text{Ec. 5})$$

donde $A = \ln(8/\pi^2)$ y $B = -\pi^2 D_{ef}/4L^2$. De esta forma, luego de ajustar los datos experimentales a la Ec. (5), graficando $\ln[(M_t/M_{eq})/(M_0/M_{eq})]$ en función de t , el coeficiente D_{ef} se puede estimar a partir de la siguiente expresión:

$$D_{ef} \approx -\frac{4}{\pi^2} L^2 B \quad (\text{Ec. 6})$$

Para este estudio, los valores de M_{eq} fueron obtenidos a partir de las isotermas de desorción de agua.

Análisis estadístico

La determinación de los parámetros del modelo logarítmico (Ec. 1) y el de GAB (Ec. 2) se llevó a cabo a por medio de regresión no lineal. Se evaluó la existencia de diferencias estadísticamente significativa entre los valores de D_{ef} aplicando ANOVA y, posteriormente, el test de Tuckey para la comparación de medias (95% de nivel de confianza).

La capacidad de ajuste de los modelos no lineales fue analizada calculando los errores promedio porcentuales (EPP) y la raíz del error medio cuadrático (RMSE); mientras que el ajuste del modelo propuesto para la estimación de los coeficientes D_{ef} fue evaluada a calculando los coeficientes de determinación (R^2) [15]. El análisis estadístico se llevó a cabo utilizando el programa Statgraphics Plus 5.1 (Statgraphics Inc., Rockville, MD, USA).

Resultados y discusión

Isotermas de desorción de agua

En la Figura 1 se pueden observar los valores de las humedades de equilibrio obtenidas experimentalmente a 50°C y las curvas teóricas ajustadas con el modelo de GAB (Ec. 2). La forma de las curvas obtenidas es característica de las isotermas tipo III (de acuerdo con la clasificación de BET), que se ha observado en alimentos con alto contenido de azúcares y compuestos solubles en agua [16].

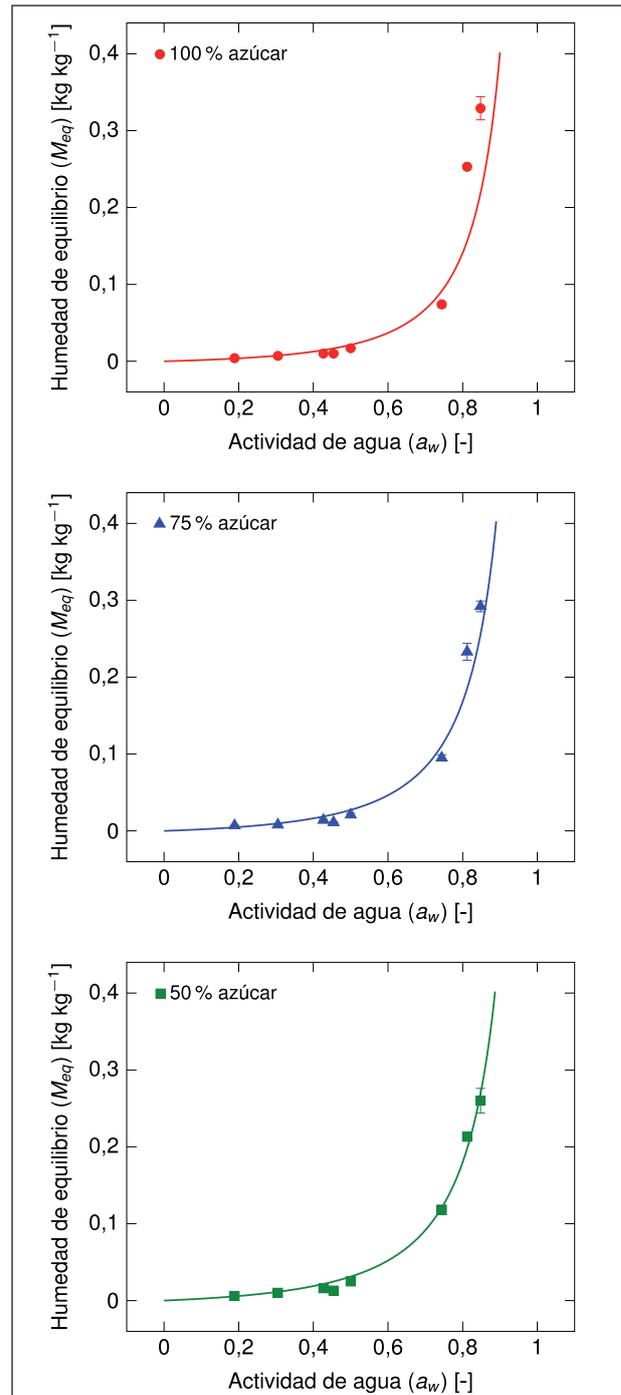


Figura 1: Isotermas de desorción de agua a 50°C de los recubrimientos estudiados. Los símbolos son los valores promedio (\pm desvíos estándares) de tres mediciones experimentales y las líneas corresponden al modelo teórico de GAB (Ec. 2).

Los valores de las constantes del modelo de GAB se encuentran expresadas en la Tabla 3. Como puede observarse, el modelo teórico seleccionado presentó un buen ajuste (RMSE entre 0,008 y 0,037 kg kg⁻¹), consistente con los errores experimentales obtenidos menores a 0,016 kg kg⁻¹. Los valores del coeficiente K se encontraron en el rango de 0,997 a 0,998, considerándose constantes e independientes del tipo de muestra analizada. Los coeficientes C aumentaron al aumentar el reemplazo de azúcar por el edulcorante a base de stevia, desde valores iguales a 0,198 para la muestra con 100% de azúcar hasta 0,312 para las muestras con 50% de azúcar. Estos valores se encuentran en concordancia con los valores esperados para esta constante que, de acuerdo a la literatura, debe ser menor o igual a 2 para las isoterms tipo III [17]. Los valores de M_m , correspondiente a la humedad de la monocapa, se encontraron en el rango de 0,065 a 0,067 kg kg⁻¹, considerándose constantes y similares a datos obtenidos en la literatura para recubrimientos a base de cacao [9].

Tabla 3: Parámetros del modelo de GAB (Ec. 2) para el estudio de las isoterms de desorción de agua a 50°C de los recubrimientos analizados.

Código	M_m [kg kg ⁻¹]	C [-]	K [-]	RMSE [kg kg ⁻¹]
100% azúcar	0,065	0,198	0,997	0,037
75% azúcar	0,067	0,258	0,998	0,023
50% azúcar	0,066	0,312	0,997	0,008

El significado físico de los valores de las constantes halladas para cada formulación indicaría que el mecanismo de sorción de agua varía con la composición. De acuerdo con Quirijns, van Boxtel, van Loon y van Straten (2005) [18], bajos valores de C acompañados con valores de K aproximadamente iguales a 1 indicarían que no existe adsorción de agua localizada. En este caso, el comportamiento de las moléculas de agua adsorbidas en la monocapa no difiere del de las moléculas de la multicapa, que al mismo tiempo se comportan como el agua líquida.

Curvas de secado

En la Figura 2 se pueden observar las curvas de secado de los recubrimientos analizados. Los tres recubrimientos presentaron un comportamiento similar, con una alta velocidad de secado inicial seguida por una etapa más lenta. Se puede observar que desde el comienzo del proceso de secado, no se evidencia la presencia de un período inicial de ajuste ni de secado constante, indicando que la temperatura de secado fue suficientemente baja para que las muestras alcancen la temperatura del aire rápidamente dentro de la estufa. Esto significa que en las formulaciones estudiadas el secado se produjo exclusivamente dentro del período de velocidad decreciente, donde principalmente se produce la difusión de vapor de agua desde el interior del alimento hacia la superficie del mismo. El contenido

de humedad a tiempo infinito se aproxima asintóticamente al valor de equilibrio a la temperatura y humedad relativa ambiente del aire en contacto con el alimento [19].

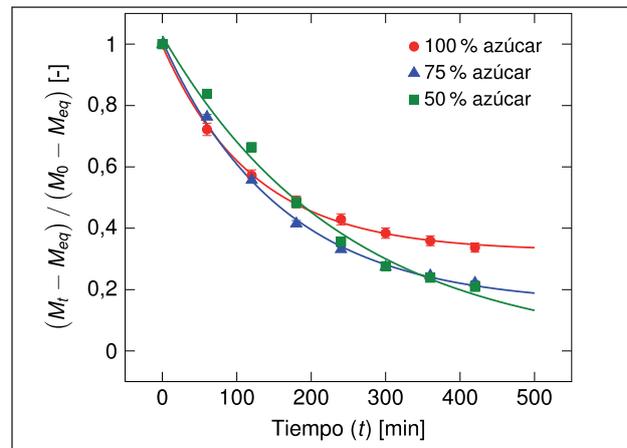


Figura 2: Curvas de secado a 50°C de los recubrimientos estudiados. Los símbolos son los valores promedio (\pm desvíos estándares) de tres mediciones experimentales y las líneas corresponden al modelo semiempírico logarítmico (Ec. 1).

Los valores de los parámetros del modelo logarítmico (Ec. 1) utilizado para estudiar la cinética de secado de las muestras analizadas se encuentran expresados en la Tabla 4. De acuerdo a los resultados obtenidos, se pudo modelar la cinética de secado de los recubrimientos satisfactoriamente, debido a que el máximo EPP obtenido fue de 5,44%.

A medida que el contenido de azúcar disminuye y es reemplazado por el edulcorante a base de stevia, las constantes empíricas varían, observándose que los valores de α aumentan y los de c disminuyen. Al mismo tiempo, los valores de k , que representan las constantes cinéticas del proceso de secado, disminuyeron al aumentar el reemplazo de azúcar, desde 0,008 a 0,004 min⁻¹. Este resultado se debería al menor contenido de sólidos solubles presente en las formulaciones y a la naturaleza higroscópica de la sacarosa que dificulta el proceso de secado por difusión en las formulaciones con mayor contenido de azúcar [7].

Tabla 4: Parámetros del modelo logarítmico (Ec. 1) para el estudio de la cinética a de secado 50°C de los recubrimientos analizados.

Código	α [-]	k [min ⁻¹]	c [-]	EPP [%]
100% azúcar	0,669	0,008	0,326	1,27
75% azúcar	0,858	0,006	0,152	2,44
50% azúcar	1,027	0,004	0,000	5,44

El concepto de capa fina aplicado al modelado matemático del proceso de secado se basa en que el tamaño del material se reduce a dimensiones tales que se asume una distribución uniforme del aire y la temperatura sobre el material. El factor de forma está integrado en los modelos cinéticos para reducir el efecto de la forma del producto en el proceso de secado. La cinética del secado de diversos alimentos fue modelada exitosamente utilizando modelos

matemáticos basados en el concepto de capa fina [20, 21].

Coeficientes efectivos de difusión

La metodología utilizada para la estimación de los D_{ef} se encuentra detallada en la Figura 3. En las regresiones lineales se obtuvieron valores de R^2 mayores a 0,96, considerándolos muy buenos. Los valores estimados de los D_{ef} de los recubrimientos estudiados fueron $1,80 (\pm 0,06) \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para las muestras 100% azúcar; $3,60 (\pm 0,10) \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para las muestras 75% azúcar y $4,50 (\pm 0,06) \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para las muestras 50% azúcar. Estos valores son similares, aunque un orden de magnitud mayores, a los publicados por Gosh, Duda, Ziegler y Anantheswaran (2004) [22] para recubrimientos elaborados con diferentes contenidos de cacao, aceite de coco, lecitina de soja y azúcar a 20°C (temperatura inferior a la estudiada en el presente trabajo).

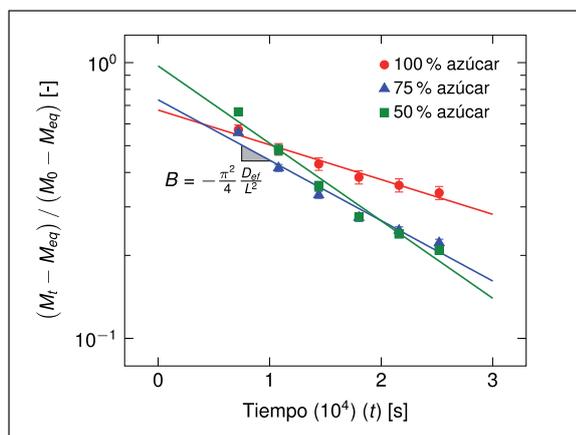


Figura 3: Metodología utilizada para la estimación de los coeficientes efectivos de difusión de agua de los recubrimientos estudiados. Los símbolos corresponden a los promedios de tres determinaciones experimentales y las líneas son las regresiones lineales.

Se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los valores mencionados, incrementándose en la medida que disminuye el contenido de azúcar y aumenta el contenido de stevia. De acuerdo a la información obtenida de la literatura, este comportamiento es esperable debido a la mayor cantidad de sólidos presente en las formulaciones con mayor contenido de azúcar. Se ha observado que en recubrimientos dulces elaborados con cacao, la difusión a través de las partículas de sacarosa es mucho más lenta que a través de otros componentes, como grasas y aceites, debido a que el azúcar es cristalina en su naturaleza. Además, la presencia de lecitina en las formulaciones junto con la sacarosa produce que la difusión de agua sea mucho más lenta, debido a que la lecitina tiende a absorber mucha más humedad que el azúcar a valores de actividades de agua menores a 0,85 [7, 22].

Conclusiones

En el presente trabajo se estudió la cinética del proceso de secado a 50°C y se pudieron estimar los coeficientes efectivos de difusión de recubrimientos con contenido reducido de azúcar elaborados con cacao y un edulcorante a base de stevia. A partir de los resultados obtenidos, se pudo modelar la pérdida de humedad durante el secado de los recubrimientos analizados satisfactoriamente, obteniéndose coeficientes efectivos de difusión que son útiles para el estudio de la transferencia de materia que pueda ocurrir entre la cobertura, el sustrato y/o el medio ambiente durante un proceso de recubrimiento de alimentos. Además, el significado físico de los valores de las constantes del modelo de GAB halladas para cada formulación indicaría que el mecanismo de sorción de agua varía con la composición de los recubrimientos estudiados.

Nomenclatura

a	Constante empírica (Ec. 1) [-]
a_w	Actividad de agua [-]
Bi	Número de Biot másico ($k_c L / D_{ef}$) [-]
c	Constante empírica (Ec. 1) [-]
C	Constante teórica relacionada con el calor de sorción de la monocapa (Ec. 2) [-]
D_{ef}	Coefficiente efectivo de difusión de agua [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]
EPP	Error promedio porcentual [%]
$ Fo$	Número de Fourier másico ($D_{ef} t / L^2$) [-]
k	Constante cinética de secado (Ec. 1) [min^{-1}]
k_c	Coefficiente de transferencia superficial de masa [m s^{-1}]
K	Constante teórica relacionada con el calor de sorción de la multicapa (Ec. 2) [-]
L	Espesor total de la placa [m]
M_{eq}	Humedad de equilibrio (base seca) [kg kg^{-1}]
M_m	Humedad de la monocapa (base seca) (Ec. 2) [kg kg^{-1}]
M_t	Humedad al tiempo t (base seca) [kg kg^{-1}]
M_0	Humedad inicial (base seca) [kg kg^{-1}]
$RMSE$	Raíz del error medio cuadrático [kg kg^{-1}]
R^2	Coefficiente de determinación [-]
t	Tiempo [min] (Ec. 1) [s] (Ec. 5)

Agradecimientos

Este trabajo fue parcialmente financiado por el CONICET (Proyecto PIP 2015-11220150100185CO, Argentina), la UNL (Proyectos CAI+D 2016-50420150100002LI y CAI+D 2020-50620190100005LI, Santa Fe, Argentina) y la Agencia Nacional de Promoción de la Investigación, el Desarrollo Tecnológico y la Innovación (Proyecto PICT 2019-209, Argentina).

Referencias bibliográficas

1. FAO. *Diet, nutrition, and the prevention of chronic diseases*. WHO technical report series. World Health Organization, Geneva, Switzerland. 2003.
2. Poirier, P.; Giles, T. D.; Bray, G. A.; Hong, Y.; Stern, J. S.; Pi-Sunyer, F. X. y Eckel, R. H. *Obesity and cardiovascular disease: pathophysiology, evaluation, and effect of weight loss*. *Circulation*, 113(6), pp: 898-918. 2006. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.106.171016>
3. Baldwin, E. A.; Hagenmaier, R. y Bai, J. *Edible coatings and films to improve food quality*. CRC Press, Boca Raton, USA. 2012.
4. Código Alimentario Argentino (CAA). *Capítulo X (Alimentos azucarados)*. http://www.anmat.gov.ar/alimentos/normativas_alimentos_caa.asp. 2010.
5. Marie, S.; Keynes, M. y Piggotti, J. R. *Handbook of sweeteners*. Springer Science+Business Media, New York, USA. 1991.
6. Goyal, S. K.; Samsher, G. R. y Goyal, R. K. *Stevia (Stevia rebaudiana) a bio-sweetener: a review*. *International Journal of Food Science and Nutrition*, 61(1), pp: 1-10. 2010. <https://doi.org/10.3109/09637480903193049>
7. Ghosh, V.; Ziegler, G. R. y Anantheswaran, R. C. *Moisture migration through chocolate-flavored confectionery coatings*. *Journal of Food Engineering*, 66, pp: 177-186. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.03.012>
8. Onwude, D. I.; Hashim, N.; Janius, R. B.; Nawi, N. M. y Abdan, K. *Modeling the thin-layer drying of fruits and vegetables: a review*. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15, pp: 599-618. 2016. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12196>
9. Meza, B. E.; Carboni, A. D. y Peralta, J. M. *Water adsorption and rheological properties of full-fat and low-fat cocoa-based confectionery coatings*. *Food and Bioproducts Processing*, 110, pp: 16-25. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2018.04.005>
10. Greenspan, L. *Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions*. *Journal of Research of the National Bureau of Standards Section A: Physics and Chemistry*, 8(1), pp: 89-96. 1977. <https://doi.org/10.6028/JRES.081A.011>
11. Labuza, T. P.; Kaauane, A. y Chen, J. Y. *Effect of temperature on the moisture sorption isotherms and water activity shift of two dehydrated foods*. *Journal of Food Science*, 50, pp: 385-392. 1985. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1985.tb13409.x>
12. Basu, S.; Shivhare, U. S. y Mujumdar, A. S. *Models for sorption isotherms for foods: a review*. *Drying technology*, 24(8), pp: 917-930. 2006. <https://doi.org/10.1080/07373930600775979>
13. Crank, J. *The mathematics of diffusion*. 2da edición. Oxford University Press Inc, Whiltshire, Reino Unido. 1975.
14. Guillard, V.; Broyart, B.; Guilbert, S.; Bonazzi, C. y Gontard N. *Moisture diffusivity and transfer modelling in dry biscuit*. *Journal of Food Engineering*, 64, pp: 81-87. 2004. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2003.09.014>
15. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2003.09.014>
16. Montgomery, D. C. *Diseño y análisis de experimentos*. Limusa Wiley, México DF, México. 2004.
17. Khalfaoui, M.; Knani, S.; Hachicha, M. A. y Lamine, A. B. *New theoretical expressions for the five adsorption type isotherms classified by BET based on statistical physics treatment*. *Journal of Colloid Interface Science*, 263, pp: 350-356. 2003. [https://doi.org/10.1016/S0021-9797\(03\)00139-5](https://doi.org/10.1016/S0021-9797(03)00139-5)
18. Blahovec, J. *Sorption isotherms in materials of biological origin mathematical and physical approach*. *Journal of Food Engineering*, 65, pp: 489-495. 2004. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.02.012>
19. Quirijns, E. J.; van Boxtel, A. J.; van Loon, W. K. y van Straten, G. *Sorption isotherms, GAB parameters and isosteric heat of sorption*. *Journal of Science Food Agriculture*, 85, pp: 1805-1814. 2005. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2140>
20. Rotstein, E.; Singh R. P. y Valentas K. J. *Handbook of Food Engineering Practice*. CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, USA. 1997.
21. Chigal, P. S.; Milde, L. B. y Brumovsky, L. A. *Modelado matemático del secado de fideos libres de gluten, influencia de la velocidad del aire*. *Revista de Ciencia y Tecnología*, 21(32), pp: 71-75. 2019. <https://doi.org/10.36995/j.recyt.2019.32.011>
22. Doymaz, I. *Thin-layer drying of spinach leaves in a convective dryer*. *Journal of Food Process Engineering*, 32, pp: 112-125. 2009. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2007.00205.x>
23. Ghosh, J. L.; Duda, I.; Ziegler, G. R. V. y Anantheswaran, R. C. *Diffusion of moisture through chocolate flavoured confectionery coatings*. *Food and Bioproducts Processing*, 82(C1), pp: 35-43. 2004. <https://doi.org/10.1205/096030804322985290>