

ESTIMACIÓN DE VIDA DE ANAQUEL DE PRODUCTOS CON HUMEDAD BAJA DEPENDIENTE DEL MATERIAL DE EMPAQUE ^a

SHELF LIFE ESTIMATION SOFTWARE FOR LOW MOISTURE PRODUCTS DEPENDING ON THEIR PACKAGING MATERIAL

Tijerina-Berzosa, D.; Soto-Castro, RD; Atta-Delgado, M.X.; González de la Garza, D; Torres, J.A.*

¹*Tecnológico de Monterrey. Tecnológico de Monterrey, School of Engineering and Sciences, Centro de Biotecnología FEMSA, Avenida Eugenio Garza Sada 2501, Monterrey, NL, 64849 Mexico; A01197131@tec.mx (D.T.B); A01706104@tec.mx (R.D.S.C); marlenne.atta@tec.mx (M.X.A.D); josetorres@tec.mx (J.A.T.B).*

Fecha de envío: 13 de enero 2023

Fecha de publicación: 16, diciembre, 2023

Resumen:

La retención de la calidad e inocuidad de productos de humedad baja e intermedia requiere de un control riguroso en los valores de a_w . Con el objetivo de disminuir el desperdicio de alimentos por cambios en su contenido de humedad, se diseñó un programa en Excel Office 360 en el que se empleó la ecuación de Guggenheim–Anderson–de Boer (G.A.B.) para describir la isoterma del producto. La herramienta computacional estima el efecto de la propiedad de barrera a la humedad del empaque en la vida de anaquel utilizando métodos de cálculo probabilísticos y determinísticos, es decir considerando o no la variabilidad estadística de los parámetros involucrados en la estimación. En su versión inicial, el programa incluyó isotermas de sorción para hojuelas de cebolla, flatbread de trigo extruido y durazno deshidratado. La isoterma fue linealizada en el rango entre la a_w inicial, crítica (cuando el producto falla), y la de equilibrio con el medio ambiente. La determinación de la vida de anaquel consideró la velocidad de transmisión de vapor de agua (VTVA o WVTR por sus siglas en inglés) de tres materiales de empaque (PET/Nylon/PP, Nylon-EVOH/PP y HB-PET/PP), el área total del empaque, y el peso neto del producto. Se encontró que los productos con baja higroscopicidad, envases con mayor VTVA, y los envases pequeños con poco gramaje presentan menor vida de anaquel. Finalmente, el método probabilístico permitió garantizar la vida de anaquel con el margen de confianza hasta el final de la vida de anaquel declarada por el productor. En este estudio se utilizó un 80% de confianza que es lo recomendado cuando el producto falla por calidad.

Palabras clave: LMF, IMF, estimados probabilísticos y determinísticos, Guggenheim–Anderson–de Boer.

^a Proyecto de investigación realizado en colaboración entre alumnas de pregrado y posgrado del Tecnológico de Monterrey.

Abstract:

The retention of quality and safety of low and intermediate moisture products requires rigorous control of a_w values. With the objective of reducing food waste due to changes in their moisture content, the Excel Office 360 program developed used the Guggenheim–Anderson–de Boer (G.A.B.) equation used to describe the product isotherm. The computational tool estimates the effect of the moisture barrier property of the packaging on the shelf life using probabilistic and deterministic calculation methods, that is, considering or ignoring the statistical variability of the parameters involved in the estimation. In its initial version, the program included sorption isotherms for onion flakes, extruded wheat flatbread, and dehydrated peach. The isotherm was linearized in the range between the initial, critical (when the product fails), and the equilibrium a_w with the environment. The determination of the shelf life considered the water vapor transmission rate (VTVA or WVTR) of three packaging materials (PET/Nylon/PP, Nylon-EVOH/PP and HB-PET/PP), the total area of the package, and the net weight of the product. It was found that products with low hygroscopicity, containers with higher VTVA, and small containers with low grammage have a shorter shelf life. Finally, the probabilistic method made it possible to guarantee the product shelf life until the end of the shelf life declared by the producer. In this study, an 80% confidence level was used, which is recommended when the product fails due to quality.

Keywords: LMF, IMF, deterministic and probabilistic estimations, deterministic model, Guggenheim–Anderson–de Boer.

INTRODUCCIÓN

La vida de anaquel es el tiempo en el que un alimento es agradable y seguro de consumir después de condiciones específicas de procesamiento, envasado y almacenamiento (Escobedo-Avellaneda et al., 2012; Robertson & Lee, 2021; Rodríguez-Martínez et al., 2020). Los productos de humedad intermedia y baja (IMFs y LMFs por sus siglas en inglés) son estables a temperatura ambiente. Por ello, pueden ser utilizados como apoyo a la población en desastres naturales y en el combate a la inseguridad alimentaria en familias que no disponen de un refrigerador (Fatmah et al., 2021; Kasim et al., 2017). En los LMFs, la estabilidad se alcanza controlando la actividad de agua ($a_w < 0.60$) por medio del secado. A este nivel de a_w , el crecimiento de microorganismos no es posible y se minimiza la velocidad de las reacciones enzimáticas (Escobedo-Avellaneda et al., 2012). En los IMFs con mayor contenido de humedad, la estabilidad se logra aumentando la concentración de solutos de bajo peso molecular tales como sal común y azúcares para formular productos con ($0.75 < a_w < 0.85$) o sin uso de agentes fungistáticos ($0.60 < a_w < 0.75$) (Karel, 1973, 1976; Motoki et al., 1982; Rahman & Labuza, 2007).

La humedad y temperatura del ambiente son factores críticos en la estabilidad de los IMFs y LMFs por sus efectos sobre la a_w (Barbosa-Cánovas et al., 2007). Los cambios de la a_w pueden controlarse seleccionando materiales de envase con la propiedad de barrera a la transferencia de humedad adecuada para la vida de anaquel deseada (Robertson & Lee, 2021; Rodríguez-Martínez et al., 2020). Esta se reporta típicamente como la velocidad de transmisión de vapor de agua (VTVA o WVTR por sus siglas en inglés) del empaque (Labuza, 1984; Taoukis et al., 1988).

Las isothermas son representaciones matemáticas del contenido de humedad (m , base seca) de un alimento a temperatura y presión constante en función de su a_w (Iglesias & Chirife, 1982). Entre los modelos predictivos para isothermas, la Ecuación (1) de Guggenheim–Anderson–de Boer (G.A.B.) con los parámetros c_1 , k , y m_o , es un modelo frecuentemente utilizado (Blahovec & Yanniotis, 2008).

$$m = \frac{c_1 k m_o Aw}{(1 - kAw)(1 - kAw + c_1 kAw)} \quad (1)$$

Por otro lado, la Ecuación (2) utilizada por primera vez por Karel and Labuza (1969) proporciona estimaciones acertadas de la vida de anaquel (θ) de un producto susceptible a daño por humedad en función de la propiedad de barrera de su material de envase (Robertson & Lee, 2021; Rodríguez-Martínez et al., 2020). El proveedor del material de empaque reporta típicamente la VTVA por unidad de área del material y medida a temperatura y gradiente de humedad relativa ($\Delta\%HR$) constantes. La VTVA permite estimar la permeancia (k/x) utilizando la Ecuación 3.

$$\ln \left[\frac{m_e - m_i}{m_e - m_c} \right] = \frac{k A p_v^o}{x W_s b} \theta \quad (2)$$

$$\frac{k}{x} = \text{permeancia} = \frac{VTVA}{\Delta p_v} \quad (3)$$

$$\Delta p_v = \Delta\%HR \cdot p_o \quad (4)$$



La vida de anaquel depende también del área del envase (A) y del contenido de sólidos (W_s) que se calcula conociendo el peso neto del producto (W) y el contenido inicial de humedad en base seca (m_i). Este último se calcula con la a_{wi} y el intercepto y la pendiente b de la isoterma linealizada en la zona de trabajo, vale decir entre a_{wi} y la a_w crítica que define el punto de falla del producto con la que se estima el contenido de humedad crítico (m_c). Por último, la temperatura del medio ambiente se refleja en el valor de la presión de vapor de agua (p^o_v) y la humedad relativa se refleja en la a_w de equilibrio del producto sin envase (a_{we}) con la que se estima el contenido de humedad de equilibrio (m_e).

El objetivo de esta investigación fue desarrollar una herramienta computacional que incorpore cálculos probabilísticos en la selección del material de envase y así reducir el desperdicio de IMFs y LMFs. Ello requiere diseñar productos con el margen de confianza deseado para lograr la vida de anaquel necesaria para llegar al consumidor final (Torres & Wu, 2018). El margen de confianza deseado se alcanza incorporando la variabilidad de los parámetros en las Ecuaciones 1-2 (Rodríguez-Martínez et al., 2020). En su primera versión, la herramienta incluye un reducido número de productos, entre ellos hojuelas de cebolla, flatbread de trigo extruido, durazno deshidratado. Lo mismo para los materiales de los empaques (PET/Nylon/PP, Nylon-EVOH/PP y HB-PET/PP). El usuario podrá fijar el grado de confianza aceptable ($X\%$) de la solución probabilística para la vida de anaquel.

MATERIALES Y MÉTODOS

Programa en Excel

Los cálculos iniciales y la solución del problema se realizaron en Excel Office 365. Utilizando los valores de a_w reportados para sales en solución sobresaturada (López-Malo et al., 1994) y con los parámetros de la ecuación de GAB para hojuelas de cebolla (Escobedo-Avellaneda et al., 2012), flatbread de trigo (Marzec & Lewicki, 2006), y durazno deshidratado (Staudt et al., 2013), se calculó la humedad correspondiente a cada sal. Para los cálculos probabilísticos de humedad, se usó primero el generador de números aleatorios uniformes entre 0 y 1, y luego la fórmula de Excel “norm.inv” para obtener 500 valores de a_w y de humedad utilizando la media y desviación estándar reportadas (Escobedo-Avellaneda et al., 2012; López-Malo et al., 1994; Marzec & Lewicki, 2006; Staudt et al., 2013).

Posteriormente, se linealizó la isoterma entre los valores de sales que estuvieran entre la a_w inicial (a_{wi}) y la a_w a la que el producto falla ($a_{wcrítica}$). Con la isoterma linealizada se obtuvieron 500 valores del contenido de humedad en base seca para el punto inicial (m_i), crítico (m_c) y de equilibrio con el medio ambiente (m_e). Con estos valores se calculó el argumento de Ln en la Ecuación (2). El contenido de sólidos (Ws) se calculó 500 veces con el peso neto del producto (W) y el valor de m_i en base húmeda ($m_{i,bh}$). La VTVA se obtuvo mediante la generación de 500 números aleatorios entre 0 y 1, y nuevamente con la fórmula de Excel “norm.inv”, donde la media y desviación estándar utilizadas fueron las de la base de datos para el material elegido. Los datos obtenidos fueron utilizados para el cálculo de la permeancia (k/x) como se muestra en la Ecuación (3). La vida de anaquel en días (θ) se obtuvo con la Ecuación (2) y convertida a meses se la reporta como su media y desviación estándar. Además, se utilizó la fórmula de Excel “PERCENTIL.EXC” con los argumentos de vida de anaquel en meses y el porcentaje de fallo (1-%confianza) para reportar la vida de anaquel con el nivel de confianza deseado por el usuario.

Valores utilizados en los ejemplos de cálculo

El Cuadro 1 ilustra valores de los parámetros de VTVA y dimensiones de empaques (Zhang et al., 2015) y son los valores utilizados en los ejemplos de cálculo reportados.

Cuadro 1. Características de los materiales de empaques estudiados (Zhang et al., 2015).

Table 1. Researched material characteristics (Zhang et al., 2015).

Material	VTVA (g/m ² *día)	Dimensión (cm)	Capacidad (g)	Tipo de pouch
PET/Nylon/PP	5.190	11 x 13 x 4	227	Fondo plano
		11 x 16 x 6	340	
		13 x 17 x 6	454	
Nylon- EVOH/PP	4.120	10 x 14	57	Plano
		13 x 18	113	
		16 x 20	227	
HB-PET/PP	0.440	10 x 14	57	Plano
		13 x 18	113	
		16 x 20	227	

El Cuadro 2 muestra los valores utilizados para los parámetros de G.A.B. para hojuelas de cebolla (Escobedo-Avellaneda et al., 2012), flatbread de trigo (Marzec & Lewicki, 2006), y durazno deshidratado (Staudt et al., 2013). Para la cebolla, se utilizó una $a_{w\text{crítica}}$ de 0.40 pues su vida de anaquel termina cuando sufre de caramelización (Escobedo-Avellaneda et al., 2012). En el caso del flatbread de trigo, se utilizó una $a_{w\text{crítica}}$ de 0.53 para evitar el deterioro de la textura del producto (Marzec & Lewicki, 2006). Finalmente, en el durazno deshidratado, la $a_{w\text{crítica}}$ fue de 0.70 lo que minimiza el riesgo de la formación de hongos sin uso de fungistáticos (Karel & Heidelbaugh, 1973; Torres et al., 1989). La a_w de equilibrio utilizada fue para el caso de 70% RH. Finalmente, la variabilidad de la a_w de las 10 sales utilizadas son los valores reportados por López-Malo et al. (1994).

Cuadro 2. Parámetros de G.A.B. para los productos estudiados

Table 2. G.A.B. parameters for each researched product

Producto	m_o	c_1	k
Hojuelas de cebolla (Escobedo-Avellaneda et al., 2012)	7.420 ± 0.230	2.210 ± 0.140	0.970 ± 0.010
Flatbread de trigo (Marzec & Lewicki, 2006)	5.321 ± 0.361	42.012 ± 4.115	0.860 ± 0.046
Durazno deshidratado (Staudt et al., 2013)	11.58 ± 0.43	1.24 ± 0.08	0.95 ± 0.01



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las isotermas de los productos utilizadas en los ejemplos de cálculo considerando la variabilidad de los parámetros de G.A.B. (Escobedo-Avellaneda et al., 2012; Marzec & Lewicki, 2006; Staudt et al., 2013) y de la a_w de las sales utilizadas (López-Malo et al., 1994) se muestra en la Figura 2. Ello generó 500 pares de valores de contenido de humedad y de a_w para cada nivel de la última. En la Figura 2 se observa que la variabilidad es mucho menor en el eje horizontal debido a que los valores de la a_w de las sales tienen una desviación estándar muy pequeña (entre 0.001 y 0.003, (López-Malo et al., 1994)). Lo opuesto ocurre en el eje vertical pues la variabilidad de los parámetros de G.A.B. es significativamente mayor (Cuadro 2).

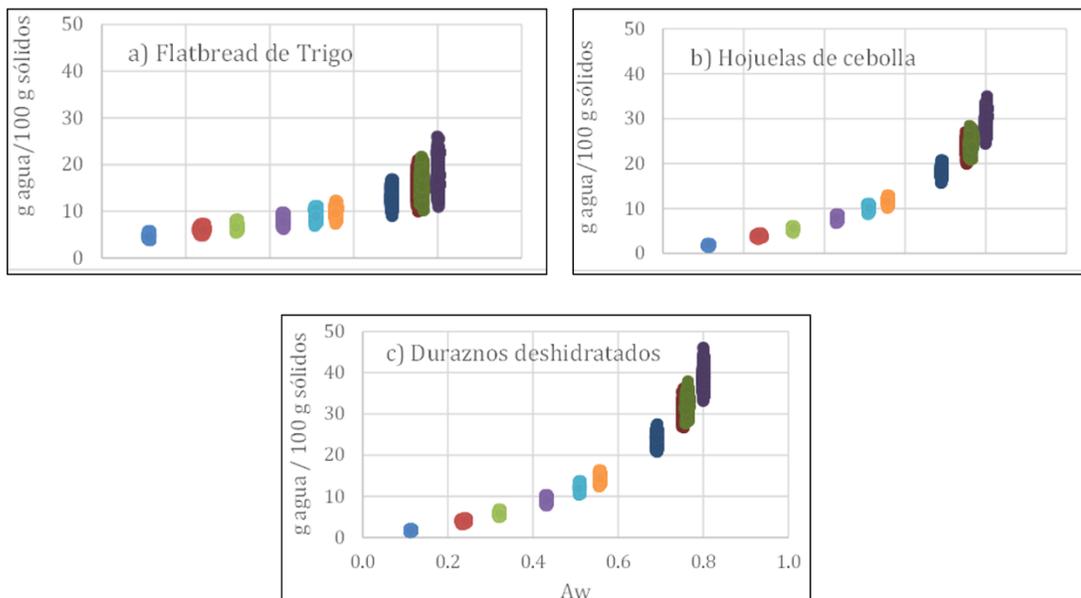


Figura 2. Isotermas para los productos utilizados en los ejemplos de calculo (n = 500 para cada nivel de a_w)

Figure 2. Isotherms for the researched products used in the calculation examples (n = 500 for each a_w level).

Dado que el flatbread de trigo fue el menos higroscópico, su vida de anaquel fue menor ya que la permeación de la misma cantidad de humedad a través del envase tendrá un mayor efecto en la a_w del producto. El caso opuesto fue el del durazno deshidratado que presentó la mayor higroscopía y por lo tanto su vida de anaquel para el mismo material de envase es la mayor. El efecto de la higroscopicidad del

producto se ve reflejada en los valores de la vida de anaquel reportada en el Cuadro 3 para $a_{w\text{inicial}}$ de 0.22 ± 0.05 , $a_{w\text{equilibrio}}$ de 0.70 ± 0.05 , $a_{w\text{crítica}}$ de 0.4, peso neto de $W = 113$ g, y área de envase $A = 0.0468$ m². Para los tres materiales de envase estudiados (Nylon-EVOH/CPP, PET/Nylon/PP, y HB-PET/CPP) se observa que la vida de anaquel aumenta en el siguiente orden: flatbread < hojuelas de cebolla < duraznos deshidratados (Cuadro 3). Reflejando la propiedad de barrera de los materiales estudiados, la vida de anaquel aumenta en el siguiente orden: PET/Nylon/PP < Nylon-EVOH/CPP < HB-PET/CPP (Cuadro 3).

Cuadro 3. Vida de anaquel de productos de higroscopía baja, media y alta usando tres materiales de envase y determinada bajo las mismas condiciones de $a_{w\text{inicial}} = 0.22 \pm 0.05$, $a_{w\text{equilibrio}} = 0.70 \pm 0.05$, $a_{w\text{crítica}} = 0.4$, peso neto $W = 113$ g, y área del envase $A = 0.0468$ m²

Table 3. Shelf life of products with low, medium, and high higroscopy using three different packaging materials under the same conditions: $a_{w\text{inicial}} = 0.22 \pm 0.05$, $a_{w\text{equilibrio}} = 0.70 \pm 0.05$, $a_{w\text{crítica}} = 0.4$, net weight $W = 113$ g, and packaging area $A = 0.0468$ m²

Vida de anaquel promedio (meses)			
Producto	PET/Nylon/PP	Nylon-EVOH/CPP	HB-PET/CPP
Flatbread de trigo	1.1 ± 0.4	1.4 ± 0.4	7.2 ± 2.1
Hojuelas de cebolla	1.8 ± 0.5	2.3 ± 0.7	14.6 ± 4.6
Durazno deshidratado	2.2 ± 0.6	2.7 ± 0.8	28.5 ± 8.4

Otros factores con efecto importante en la vida de anaquel son la dimensión del envase y el peso neto del producto. El Cuadro 4 muestra que al aumentar el peso neto del producto desde un envase pequeño (57 g) a uno mayor (227 g) se necesitan envases de mayor dimensión como los reportados en el Cuadro 1 (Zhang et al., 2015).

El Cuadro 4 ilustra claramente que los productos en envases de mayor tamaño y peso neto tienen una vida de anaquel mayor. Los valores de vida útil en dicho cuadro son determinísticos, es decir, se calcularon sin considerar la variabilidad de los datos y son similares a los valores promedio que se obtienen al considerar la

variabilidad. Por definición de valor medio, esto implica que ignorar la variabilidad de la información lleva a soluciones con una probabilidad de fallo de 50%. Un nivel de confianza típico para la vida de anaquel que falle por consideraciones de calidad es 80%. Esto quiere decir que al final de ese valor de vida de anaquel, solamente 20% de los productos estarán por encima del $a_{wcrítica}$. Si la vida de anaquel está ligada a un riesgo de salud para el consumidor, se reportaría con un 95% de confianza para alimentos y 99% para medicamentos (Torres, 2022).

Cuadro 4. Vida de anaquel en meses de diferentes presentaciones de hojuelas de cebolla empaquetadas a 30°C y 73% HR con Nylon-EVOH/ CPP y HB-PET/ CPP

Table 4. Shelf life in months of different presentations of onion flakes packaged at 30°C and 73% HR with Nylon-EVOH/ CPP and HB-PET/ CPP

Peso (g)	Área (m ²)	Nylon-EVOH/ CPP			HB-PET/ CPP		
		Determinístico	Probabilístico Mean ± DS 80%		Determinístico	Probabilístico Mean ± DS 80%	
57	0.0280	1.1	1.1 ± 0.3	0.9	11.4	11.8 ± 3.5	9.1
113	0.0468	2.2	2.3 ± 0.7	1.8	22.6	23.4 ± 6.9	18.2
227	0.064	4.4	4.6 ± 1.3	3.5	45.3	47.0 ± 13.8	36.5

CONCLUSIÓN

El método probabilístico en la evaluación de la vida de anaquel es una herramienta útil para la toma de decisiones al momento de diseñar empaques para diseñar nuevos productos. La aplicación de ingeniería probabilística en la industria alimentaria permite el desarrollo de productos que garanticen la vida de anaquel invirtiendo una menor cantidad de recursos iniciales para pruebas en laboratorio. Además, se reduce el desperdicio de alimentos, se maximiza la rentabilidad de la empresa, y se aumenta la certeza de que el consumidor reciba un producto de calidad. Materiales de envase con mayor VTVA, así como envases pequeños y poco contenido de producto tienen menor vida de anaquel que aquellos en presentaciones grandes o familiares. Finalmente, los productos con alta higroscopía tienen una mayor vida de anaquel debido a que la permeación de la misma cantidad de humedad tiene un menor efecto en la a_w del producto.

LITERATURA CITADA

- Barbosa-Cánovas, G. V., Fontana, A. J., Schmidt, S. J., & Labuza, T. P. (2007). *Water activity in foods: Fundamentals and applications*. Wiley-Blackwell.
- Blahovec, J., & Yanniotis, S. (2008). GAB generalized equation for sorption phenomena. *Food and Bioprocess Technology*, 1(1), 82-90.
- Escobedo-Avellaneda, Z., Velazquez, G., Torres, J. A., & Welti-Chanes, J. (2012). Inclusion of the variability of model parameters on shelf-life estimations for low and intermediate moisture vegetables. *LWT - Food Science and Technology*, 47(2), 364-370.
- Fatmah, F., Utomo, S. W., & Lestari, F. (2021). Broccoli-soybean-mangrove food bar as an emergency food for older people during natural disaster. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. Apr 1;18(7):3686., 18(3686).
- Iglesias, H. A., & Chirife, J. (1982). *Handbook of Food Isotherms: Water Sorption Parameters for Food and Food Components*. Academic Press Inc.
- Karel, M. (1973). Recent research and development in the field of low moisture and intermediate moisture foods. *CRC Critical Reviews in Food Technology*, 3, 329-373.
- Karel, M. (1976). Technology and application of new intermediate moisture foods. In R. Davies, G. G. Birch, & K. J. Parker (Eds.), *Intermediate Moisture Foods* (pp. 4-31). Applied Science Publishers.
- Karel, M., & Heidelbaugh, N. D. (1973). Recent research and development in the field of low-moisture and intermediate-moisture foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 3(3), 329-373.
- Karel, M., & Labuza, T. P. (1969). *Optimization of protective packaging of space foods (U.S. Air Force Contract F-43-609-68-C-0015)*.
- Kasim, R., Ahmad, L., Une, S., Bait, Y., & Liputo, S. A. (2017). Characterization of snack food bars made of nixtamalized corn flour and flour of nike fish for emergency food. *International Journal of Agriculture System*, 5(1), 33-41.
- Labuza, T. P. (1984). *Moisture sorption: Practical aspects of isotherm measurement and use*. American Association of Cereal Chemists (AACCC).
- López-Malo, A., Palou, E., & Argai, A. (1994). *Measurement of water activity of saturated salt solutions at various temperatures*. Universidad de las Américas-Puebla.
- Marzec, A., & Lewicki, P. P. (2006). Antiplasticization of cereal-based products by water. Part I. Extruded flat bread. *Journal of Food Engineering*, 73(1), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.12.002>

- Motoki, M., Torres, J. A., & Karel, M. (1982). Development and stability of intermediate moisture cheese analogs from isolated soybean proteins. *Journal of Food Processing and Preservation*, 6, 41-53.
- Rahman, M. S., & Labuza, T. P. (2007). Water activity and food preservation. In M. S. Rahman (Ed.), *Handbook of Food Preservation* (2nd ed., pp. 447-477). CRC Press.
- Robertson, G. L., & Lee, D. S. (2021). Comparison of linear and GAB isotherms for estimating the shelf-life of low moisture foods packaged in plastic films. *Journal of Food Engineering*, 291. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110317>
- Rodríguez-Martínez, V., Velázquez, G., Welti-Chanes, J., & Torres, J. A. (2020). Applications of probabilistic engineering in food moisture management to meet product quality, safety and shelf-life requirements. In G. V. Barbosa-Cánovas, A. J. Fontana, S. J. Schmidt, & T. P. Labuza (Eds.), *Water Activity in Foods, Fundamental and Applications* (2nd ed., pp. 501-520). Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9781118765982.ch21>
- Staudt, P. B., Tessaro, I. C., Marczak, L. D. F., Soares, R. P., & Cardozo, N. S. M. (2013). A new method for predicting sorption isotherms at different temperatures: Extension to the GAB model. *Journal of Food Engineering*, 118(3), 247-255. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.04.013>
- Taoukis, P. S., El Meskine, A., & Labuza, T. P. (1988). Moisture transfer and shelf-life of packaged foods. In J. H. Hotchkiss (Ed.), *Food and Packaging Interactions* (pp. 244-261). ACS Publications.
- Torres, J. A. (2022). Recommendations for the confidence level to be used when assessing quality and safety risks for consumers. In.
- Torres, J. A., Bouzas, J. O., & Karel, M. (1989). Sorbic acid stability during processing and storage of an intermediate moisture cheese analog. *Journal of Food Processing and Preservation*, 13(6), 409-415.
- Torres, J. A., & Wu, X. (2018). *Probabilistic engineering approaches to food safety, quality, and shelf-life: A primer on applications to moisture-controlled, thermally-processed, and chilled/frozen foods* IFT Annual Meeting, Chicago, IL.
- Zhang, H., Bhunia, K., Kuang, P., Tang, J., Rasco, B., Mattinson, D. S., & Sablani, S. S. (2015). Effects of oxygen and water vapor transmission rates of polymeric pouches on oxidative changes of microwave-sterilized mashed potato. *Food and Bioprocess Technology*, 9(2), 341-351. <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1628-3>