

# ASPECTOS TEÓRICOS DEL PROCESO DE LIOFILIZACIÓN DE ALIMENTOS

## THEORETICAL ASPECTS OF THE FOOD LYOPHILIZATION PROCESS

**Keyla Márquez\*, Domingo Alarcón, Milagro Montilla, Jaimel Salcedo, Elkis Weinhold**

Laboratorio de Electroquímica, Departamento de Química  
Núcleo Universitario Alberto Adriani, Facultad de Ciencias.  
Universidad de los Andes, Mérida 5101, Venezuela  
keylaenator@gmail.com

**Recibido:** 19-02-18

**Aceptado:** 14-03-18

### RESUMEN

En la situación de emergencia asociada al suministro de alimentos que vive Venezuela actualmente, se precisa desarrollar sistemas y procesos a corto plazo, orientados a la preservación de alimentos de la temporada, para poder ser consumidos durante todo el año. Uno de los métodos utilizados es la deshidratación, el cual consiste en extraer solamente el agua presente en los alimentos. En este trabajo se plantea algunos aspectos teóricos de la deshidratación por una técnica conocida como liofilización, el cual consiste en procesar alimentos bajo presión baja (vacío) y moderada temperatura. En este proceso no ocurre la evaporación del agua a partir de la fase líquida, normal en procesos de secado, sino la sublimación del hielo, es decir, el paso de agua sólida a vapor de agua, sin pasar por el estado líquido. Por este motivo los productos deben estar congelados al comenzar el proceso de secado.

**Palabras claves:** Deshidratación, Liofilización, preservación de alimentos

### Abstract

Due to the emergency related to the food supply in Venezuela nowadays, it is necessary developing, in a short time, some systems and processes pointing to conservation of season food to enable them to be consumed during the whole year. One of the most used methods is the dehydration, which consists in removing only the water content from the food. In this paper, some theoretical aspects of a dehydration technique known as lyophilization, to process food by vacuum removing the water at moderate temperature. In this process, evaporation of water from its liquid phase, as ordinarily happens during drying, does not occur but by sublimation of ice to evaporate to steam water without passing for the liquid phase. That is why the material should be frozen at the beginning of the drying process.

**Keywords:** Dehydration, Lyophilization, Food preservation

**Keyla Márquez:** Msc. En Electroquímica Fundamental y Aplicada (ULA), Ing. Industrial (IUP Santiago Mariño), miembro del personal docente y de investigación del NUAA-ULA. e-mail: keylaenator@gmail.com / **Domingo Alarcón:** Dr en Ciencias de la Educación (Universidad Fermín Toro), Lic. En Química (ULA), miembro del personal docente y de investigación del NUAA-ULA. e-mail: alarcondomingoa@gmail.com / **Milagro Montilla:** Dra en Ciencias de la Educación (Universidad Fermín Toro), Lic. En Química (ULA), miembro del personal docente y de investigación del NUAA-ULA. e-mail: milagroy@gmail.com / **Elkis Weinhold:** Dra. En Química Aplicada, opción electroquímica (ULA), miembro del personal docente y de investigación de la Facultad de Ciencias-ULA. e-mail: elkisweinhold@gmail.com / **Jaimel Salcedo:** MSc En Enseñanza de la Química (Universidad del Zulia), Lic. En Educación Mención Química miembro del personal docente y de investigación del NUAA-ULA. e-mail: jaimelsalcedo@gmail.com

## Introducción

La liofilización consiste en un conjunto de procesos, no solamente el secado cuyo resultado será la obtención de un producto seco sino el mantenimiento de las características iniciales del mismo como la textura, el color, aroma, y sabor, es lo que la hace diferente de los procesos de deshidratación. El proceso de extracción del agua por sublimación está ilustrado en la figura 1.

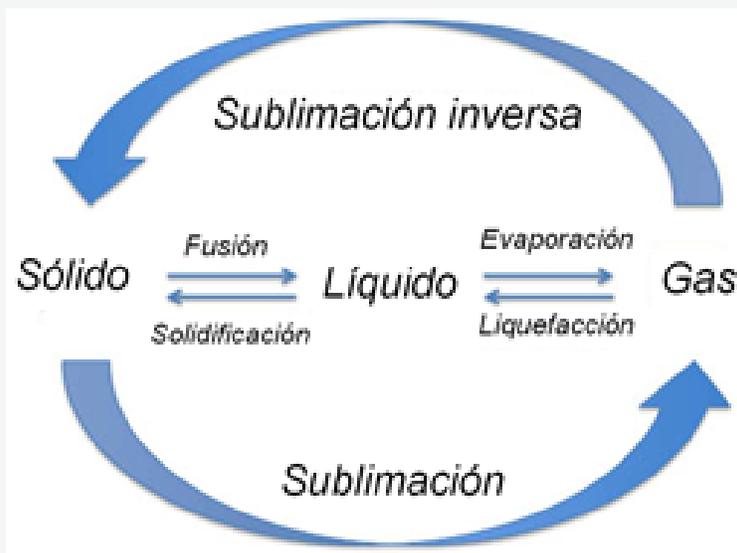


Figura 1.- Esquema que explica los cambios de fase del agua en un proceso de deshidratación

Generalmente, el cambio de fase que se produce durante la nucleación, trae consigo un aumento de energía (energía libre de Gibbs positiva) que expresa el trabajo necesario para iniciar la formación de los primeros núcleos (figura 2). Una vez superada esta barrera energética, se produce una liberación de energía procedente de la cristalización o evaporación de la totalidad del agua (energía libre e Gibbs negativa).

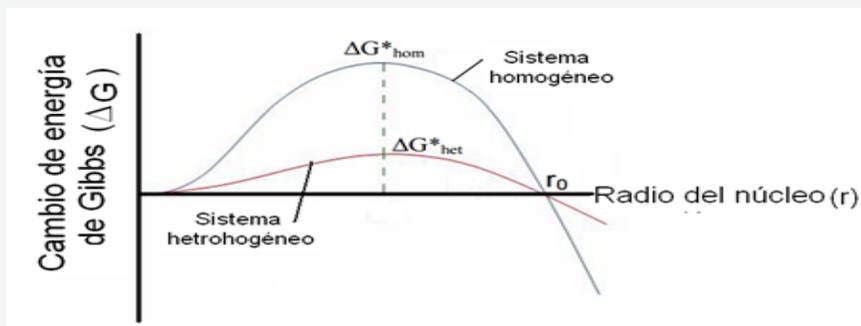


Figura 2.- Diagrama de energía para la nucleación del hielo

El tamaño de los cristales define en medida la apariencia del producto, ya que un preparado con cristales demasiado pequeño tendrá una vez seco, una apariencia mucha más clara que un producto el cual tenía cristales más grandes y que fue lentamente congelado, también se debe considerar el hecho de que si los cristales son irregulares pueden dañar la calidad del producto. La figura 3 ilustra el flujo de calor y masa durante un proceso de liofilización unidimensional.

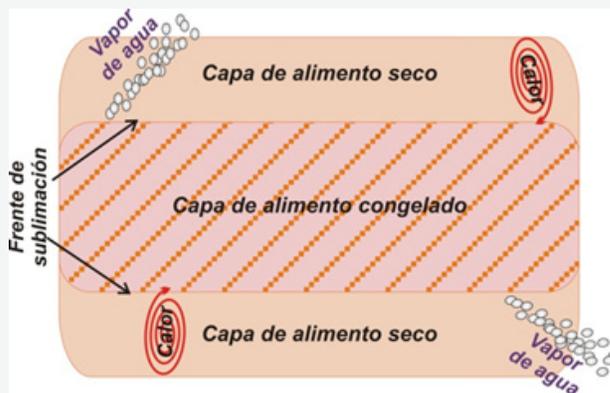


Figura 3.- Esquematización del flujo de calor en un proceso de liofilización

Cuando se realiza el secado mediante la liofilización, se distinguen tres fases o etapas que se esquematizan en la figura 4. Cuando en el proceso de liofilización se comienza el calentamiento, empieza a formarse un frente de sublimación o interfase entre la capa seca y la capa congelada de la muestra, el cual avanza progresivamente. La transferencia de masa ocurre por la migración de vapores a través de la capa seca de la muestra bajo la acción de una diferencia de presión. Las tres fases que se distinguen son:

#### Fase 1:

Llamada etapa conductiva. Inicialmente, por el calentamiento de la muestra, la velocidad de sublimación crece rápidamente hasta llegar a un máximo. El tiempo para agotar esta fase es relativamente corto, entre un 10 y 15% del tiempo total del proceso [1]

#### Fase 2:

Primera etapa difusiva. Muestra un descenso importante de la velocidad de sublimación debido a la formación de una capa porosa de material seco que opone resistencia creciente al flujo de calor y al vapor a medida que procede el secado.

Las fases 1 y 2 se denominan secado primario; en ellas se lleva a cabo la mayor parte de remoción de agua del producto (entre un 75-90 %) [2, 3].

#### Fase 3:

Segunda etapa difusiva, llamada también secado secundario. La velocidad de sublimación continúa decreciendo de forma que se aproxima a cero. Esto debido a que el calor necesario para retirar el agua ligada es más alto que el calor de sublimación. Puesto que la difusividad de los aromas disminuye sensiblemente cuando la humedad es pequeña, es posible en esta etapa incrementar la temperatura de la calefacción y del producto hasta valores del orden de 50°C, dependiendo del material que se trate.

En la transferencia de calor y masa se combinan la acción de la temperatura y los gradientes de presión como fuerzas impulsoras, que deben vencer las resistencias puestas por el espesor de la muestra y sus características físicas. El espesor es importante: mientras éste es más delgado, hay menor resistencia para que el flujo de calor y masa pase a través de la muestra. La transferencia de calor se hace

por conducción, convección gaseosa y radiación (o una combinación de ambos mecanismos) siendo esta última la preponderante cuando se opera a muy baja presión [4].

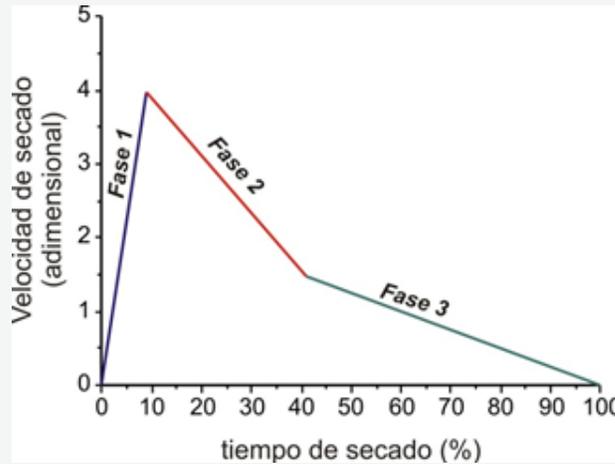


Figura 4.- Etapas del proceso de liofilización

### Desarrollo El secado primario

La figura 5 muestra los pasos que se siguen en un proceso de liofilización en un diagrama temperatura-concentración. En el secado primario el hielo se retira de la muestra mediante sublimación desde la fase sólida a la gaseosa. Mientras se disponga de un sistema que constantemente retire este vapor, el proceso de secado por sublimación continuará hasta que se agote el hielo presente. Este papel lo cumple

en un liofilizador el condensador (o mejor desublimador), elemento del equipo que ofrece una superficie suficientemente fría como para que el vapor de agua pase nuevamente a la fase sólida. La fuerza impulsora que mantiene la sublimación es el gradiente de presión de vapor entre la superficie congelada del producto y el condensador [4].

Para suministrar el calor requerido para la sublimación se dispone de los tres mecanismos de transferencia de calor. Calor

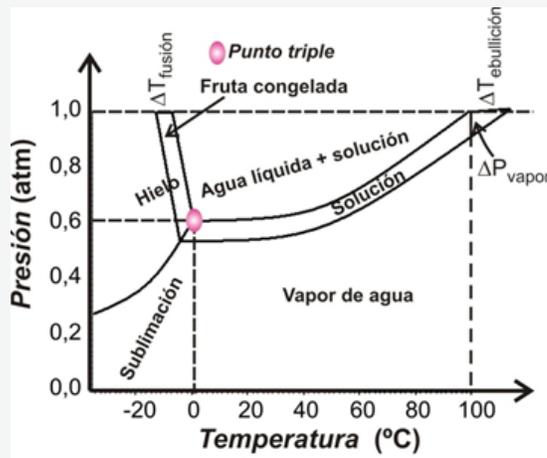


Figura 5.- Diagrama de fase típico para la liofilización de una fruta

por radiación desde la placa calefactora superior, conducción desde la placa inferior por la delgada película de aire que se forma entre el recipiente de la muestra y la placa y/o desde el fondo de la bandeja o vial y la pared de este recipiente y, también por conducción, a través de la capa seca del material hasta la interfase sólida. El coeficiente total de transferencia de calor reportado para viales en procesos farmacéuticos oscila entre 60 y 130 KJ / m<sup>2</sup> h K (1,7 a 3,3 W /m<sup>2</sup> K) [5]

### El secado secundario

Las porciones remanentes de agua no congelada, que no subliman en la primera etapa del secado, lo hacen por evaporación en la segunda etapa al incrementarse la temperatura de la matriz del alimento. Para el caso de matrices cristalinas, el mecanismo de secado es el de desorción y evaporación del agua desde la superficie cristalina. Con sustancias amorfas de hasta un 40% de

agua lo preponderante es la difusión del agua a través de la fase vítrea, lo que hace muy prolongado el secado secundario. Las partes secas de la muestra que se liofiliza pueden comenzar su secado secundario aunque haya presencia en el alimento de hielo que sublima en fase primaria; mientras estas dos fases coexistan, y debido que el hielo que sublima enfría la estructura, permanece controlada la temperatura del alimento. Cuando desaparece la última porción de hielo se presenta un incremento de la temperatura [4]. Con materiales amorfos debe tenerse cuidado de no superar en el secado secundario su temperatura de transición vítrea (T<sub>g</sub>). Como este valor crece a medida que la muestra se seca es recomendable hacer en forma gradual el incremento de temperatura del plato calefactor y, consecuentemente, del alimento en esta fase de la operación (figura 6).

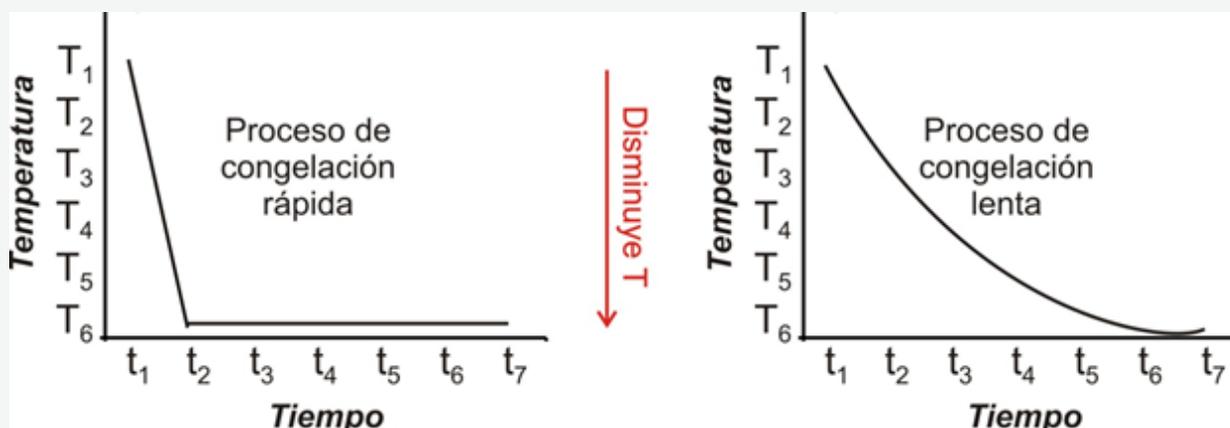


Figura 6.- Control del programa de temperatura de congelado

### Etapas de la liofilización

Una vez establecidas las condiciones de congelación de la muestra a ser liofilizada, se debe optimizar las condiciones de funcionamiento del liofilizador. Para cada tipo de alimento debe hacerse una calibración para establecer las condiciones de temperatura, presión y tiempo, mediante curvas similares a la mostrada en la figura 7.

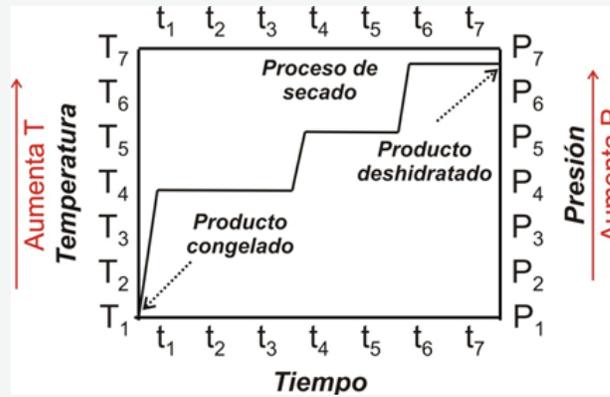


Figura 7.- Calibración del sistema para cada tipo de alimento

### Mecanismo de remoción de agua durante la liofilización:

La velocidad de desorción de un gas desde una superficie puede ser expresada como:

$$\frac{dn}{dt} = k e^{\left(\frac{-\Delta H_d}{RT}\right)} \quad (1)$$

Donde;

- n = moles de gas sobre la superficie
- $\Delta H_d$  = cambio de entalpía de descomposición
- R = constante universal de los gases
- T = Temperatura absoluta de operación
- k = constante de proporcionalidad

La ecuación 1 muestra que la velocidad de desorción se incrementará exponencialmente con la temperatura cuando  $H_d$  no varía significativamente con ésta. La velocidad de desorción es también muy dependiente de la energía de desorción, o sea, a medida que la energía aumenta, la velocidad de desorción disminuye exponencialmente, de acuerdo a la ecuación 1 [6]

### Cinética de secado

La cinética de la liofilización se divide en cinética de congelación y cinética de sublimación. La cinética de congelación está relacionada con la formación del estado eutéctico (Es el punto de intersección de las dos curvas que separan la zona líquida y la zona donde el líquido se encuentra en equilibrio con el sólido y es la temperatura más baja a la cual puede existir la fase líquida) de las muestras; y la cinética de

sublimación con la eliminación del hielo a través de los poros en forma de vapor de agua. [7].

Para la cinética de sublimación se tiene en cuenta el modelo de estado estacionario, con base en los siguientes supuestos:

- La temperatura de la superficie es constante durante la etapa de sublimación
- El calor solo entra por la capa seca
- La transferencia de masa solo es a través de la capa seca
- El frente de hielo solo mantiene una posición paralela a la superficie
- Tanto la conductividad térmica, la cual depende de la composición y de la estructura celular de la muestra; como la permeabilidad se mantienen constantes en el producto.

De acuerdo con la transferencia de masa del proceso de sublimación en estado estacionario se tienen las siguientes ecuaciones que relacionan la velocidad de pérdida de masa de agua con el flujo de vapor a través de la capa porosa (ecuación 2) y la velocidad de pérdida de agua con la variación de la fracción de agua en el producto y el movimiento del frente de hielo (ecuación 3) [7].

$$\frac{dW}{dt A} = \frac{b \Delta p}{x} \quad (2)$$

$$\frac{dW}{dt A} = \rho_s (m_0 - m_f) \frac{dx}{dt} \quad (3)$$

Donde:

W = masa de agua

b= Permeabilidad de la muestra

$\Delta p$  = Presión de vapor del hielo a la temperatura medida

x = Distancia entre el frente de hielo y la superficie (m)

$m_0$  y  $m_f$  = Los contenidos de agua (fracción) inicial y final definidos en base seca.

$\rho_s$  = Densidad de la capa seca (kg/m<sup>3</sup>)

Por otro lado la Ley de Fourier en estado estacionario se utiliza para describir la transferencia de calor (ecuación 4).

$$Q = \frac{AK(T_s - T_i)}{x} \quad (4)$$

Donde:

A= Área de transferencia (m<sup>2</sup>)

K= Conductividad térmica del producto seco (Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>)

T<sub>s</sub> y T<sub>i</sub>: =Temperaturas de la superficie y del frente de hielo

Haciendo un balance de calor en el frente de hielo, asumiendo que todo el calor que entra al producto es utilizado en el proceso de sublimación se tiene (ecuación 5).

$$\frac{dW}{dt} \Delta H = Q \quad (5)$$

Donde:

$\Delta H$ = Calor latente de sublimación (2,84 x 10<sup>6</sup> J.kg<sup>-1</sup>)

Finalmente asumiendo que existe un equilibrio entre la transferencia de masa y calor; realizando los reemplazos correspondientes entre las ecuaciones 3-5 y luego integrando, se obtiene el tiempo de secado (ecuación 6) el cual es aproximadamente proporcional al cuadrado del espesor del producto, razón por la cual resulta favorable trabajar con capas delgadas o trozos de tamaño pequeño [8].

$$T_f = \frac{x_f^2 \Delta H \rho_s (m_0 - m_f)}{2K(T_s - T_i)} \quad (6)$$

## Determinación de los parámetros cinéticos de la liofilización

La cinética de secado está determinada por la difusión de la humedad desde el sustrato hacia el aire de secado. Se puede describir mediante la segunda ley de Fick (Ec. 7), donde X representa el contenido de humedad y D es el coeficiente de difusividad efectiva (m/s) [9].

$$\frac{\partial x}{\partial t} = D \frac{\partial^2 x}{\partial z^2} \quad (7)$$

Donde z es la posición dentro de la muestra. La Ec. 7 se resuelve según la geometría estudiada y las condiciones de borde iniciales. En este trabajo se consideró que el sustrato posee una humedad inicial uniforme, sólo existe resistencia interna para la transferencia de masa, no existe encogimiento del sólido durante el proceso de secado, se desprecian los efectos internos y externos para la transferencia de calor y la difusividad efectiva permanece constante durante todo el proceso. Con estos supuestos, la solución matemática expresada para la humedad promedio en todo el sólido, está dada por la Ec. 8.

$$\frac{X(t) - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2V}{\lambda_n^2} e^{-\lambda_n^2 \frac{D_{ef}}{a^2} t} \quad (8)$$

Donde:

V y  $\lambda_n$  = son parámetros geométricos que se definirán en cada caso, de acuerdo a la geometría de la muestra.

k es la conductividad térmica (W/m K).

a = semiespesor de la muestra

X<sub>0</sub> = contenido de humedad inicial

X<sub>eq</sub> = Contenido de humedad en el equilibrio

X(t) = contenido de humedad en función del tiempo

Para una placa plana infinita y considerando sólo el primer término de la sumatoria, se obtiene el modelo de difusividad constante simplificado, mostrado en la ecuación 9.

$$\frac{X}{X_0} = e^{-\left(\frac{\pi^2 D t}{4a^2}\right)} \quad (9)$$

Debido a la simplicidad del modelo, adaptable a distintas geometrías, éste resulta una herramienta útil para describir la cinética de secado. La modelación matemática del proceso de secado es necesaria tanto para el diseño de equipos y procesos, como para la optimización, control y automatización de éstos [10]. Además, el uso de modelos matemáticos empíricos, permite estimar el tiempo necesario para alcanzar el contenido de humedad deseado, y permite estudiar la eficiencia del proceso.

En este trabajo se consideraron los modelos empíricos de Page (Ec. 10), Logarítmico (Ec. 11) y Weibull (Ec. 12), que derivan de la segunda ley de Fick y muestran una relación directa entre el contenido de humedad y el tiempo de secado. El modelo de Page se muestra en la Ec. 10, donde  $k$  [ $\text{min}^{-1}$ ] y  $n$  (adimensional) corresponden a constantes de ajuste.

$$\frac{X}{X_0} = e^{(-kt^n)} \quad (10)$$

El modelo Logarítmico se muestra en la Ec. 11, donde  $b$ ,  $y$   $c$  son constantes de ajuste adimensionales [11].

$$\frac{X}{X_0} = b [e^{-kt}] + c \quad (11)$$

La Ec. 12 muestra el modelo de Weibull, donde  $b$  y  $c$  son constantes de ajuste adimensionales [12,13]

$$\frac{X}{X_0} = e^{-\left(\frac{t}{b}\right)^c} \quad (12)$$

### Medida de la transferencia de masa

Los dos aspectos más importantes de la transferencia de masa son: La transferencia del agua desde el interior hasta la superficie del material (espesor de la capa seca). La extracción del vapor de agua desde la superficie del material (concentración de agua sublimada en la capa seca). La evolución de la transferencia de masa con el tiempo se mide a través de la pérdida de peso (PP); el contenido de sólidos totales

(ST); la pérdida de agua (PA); la ganancia de sólidos (GS) y la concentración de los sólidos solubles en la solución (SS).

El porcentaje de pérdida de peso, viene dada por la ecuación 13

$$\% PP = \left( \frac{m_0 - m_t}{m_0} \right) \times 100 \quad (13)$$

Donde

$m_0$  = masa inicial de muestra fresca.  
 $m_t$  = masa de muestra deshidratada a tiempo  $t$

### Ecuaciones de diseño y modelos matemáticos de la liofilización

Se han hecho numerosos intentos para describir matemáticamente el proceso de liofilización. En la década de los 60s se reportaron muchos estudios acerca de la liofilización de placas delgadas [14,15]. El flujo de calor ( $q$ ) puede ser expresado mediante la ecuación 14 [16].

$$q = h (T_e - T_s) = \frac{k}{\Delta L} (T_s - T_f) \quad (14)$$

La velocidad total de sublimación del vapor de agua desde una superficie de hielo contenida en una matriz isotérmica es la suma de las velocidades de todas las superficies de hielo. La energía ( $Q$ ) requerida para sublimar una cantidad de hielo, a una temperatura  $T'$ , donde  $T' < 273,2$  K, se obtiene mediante la ecuación 15.

$$\Delta H = m\Delta H_S (273,1 - T') - m\Delta H_F + m\Delta H_v \quad (15)$$

**Tiempo de liofilización:** Uno de los modelos encontrados en la literatura [17] para estimar el tiempo de liofilización está expresado en la ecuación 16:

$$t = \frac{X^2 \rho (M_1 - M_2) \lambda_s}{8k_s (\theta_1 - \theta_2)} \quad (16)$$

Donde:  
 $X$  = Distancia entre el frente de hielo y la superficie  
 $M_1 - M_2$  = variación en la masa de la muestra  
 $\rho$  = densidad de la muestra

k es la conductividad térmica  
 $\theta_1 - \theta_2$  = variación en la porosidad de la muestra

$\lambda$  = parámetro geométrico que se definirán en cada caso, de acuerdo a la geometría de la muestra

Por otro lado, Levi y colaboradores [18] propusieron el modelo logarítmico mostrado en la ecuación 17, con un porcentaje de error muy bajo:

$$\log \frac{t}{t_0} = \frac{M_1 (T_L - T_0)}{M_2 (T_L - T_0)} \quad (17)$$

Donde: t y  $t_0$  = hora al finalizar el secado y hora inicial, respectivamente ( $t_0, 0$ )

## CONCLUSIONES

Este trabajo pretende hacer una revisión parcial de la matemática involucrada en el proceso de liofilización, pero es preciso tener en cuenta algunos aspectos experimentales:

- Los alimentos contienen un porcentaje importante de agua. Cuando se congelan esos materiales sólo cristaliza entre el 90 y 95% del agua líquida contenida. La figura 8 ilustra tres momentos importantes del proceso de congelación de alimentos: T1: tiempo inicial, antes de comenzar el proceso, T2: tiempo intermedio del proceso y T3: tiempo final, después del cual no varía el contenido de agua del sistema. Un producto sin congelar podría tener 70% de agua y 30% de sólidos totales a cualquier temperatura por encima de la temperatura inicial para la cristalización de hielo, como se muestra en la figura xx. Al disminuir la temperatura, el porcentaje de hielo incrementará en oposición al agua sin congelar. A una temperatura mucho menor que la inicial a la de congelación, una pequeña fracción de agua permanecerá en el estado líquido y se conoce como agua no congelable [19]

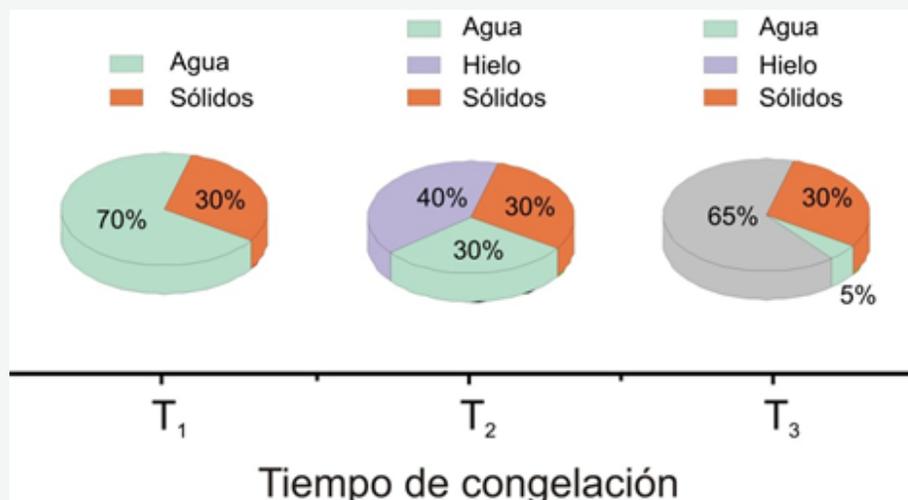


Figura 8.- Variaciones típicas de porcentajes de los componentes de alimentos, a medida que procede la congelación

- La velocidad de enfriamiento, la cual se expresa como la variación, en grados de temperatura por unidad de tiempo, de la muestra en un determinado medio de enfriamiento [20], Este parámetro va a depender del espesor de la muestra y del medio de enfriamiento utilizado como se muestra en la tabla 1

Tabla 1.- Factores que inciden en la velocidad de enfriamiento previo de la muestra

Medio de enfriamiento	Espesor de la muestra (mm)	Velocidad de enfriamiento (°C/min)
Congelador convencional	10	2
Con temperatura programada	10	1
Baño de nitrógeno líquido	10	230

Generalmente, el cambio de fase que se produce durante la nucleación, trae consigo un aumento de energía que expresa el trabajo necesario para iniciar la formación de los primeros núcleos. Una vez superada esta barrera energética, se produce una liberación de energía procedente de la cristalización o evaporación de la totalidad del agua. Se están realizando experimentos para hacer un estimado semiempírico de los aspectos de la liofilización de alimentos.

**Agradecimientos:** Los autores agradecen al CDCHTA – ULA, proyectos NUAA – 06-17- 08- B y NUAA-05-17-08-B por el apoyo a este trabajo

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Rothmayr, W. W. (1974). Basic knowlwdge of freeze drying. Heat and mass transfer, en Freeze drying and advanced food technology, S. A. Goldblith, et al., Editores: London, p. 203-222.
- Millman, M. J., Liapis, A. I. y Marchello, J. M. (1984). Guidelines for the desirable operation of batch freeze driers during the removal of free water. J. FoodTechnol19: 725-738.
- Roth, C. (2000). Ein Mikro-Waageverfahren zur kontinuierlichen Bestimmung der Sublimations geschwindigkeit während der Gefriertrocknung, Den Naturwissenschaftlichen Fakultäten der Friedrich- Alexander- Universität Erlangen- Nürnberg zur Erlangung des Doktorgrades, Stuttgart.
- Kramer, M. (1999). Innovatives Einfrierverfahren zur Minimierung der Prozeßzeit von Gefriertrocknungszyklen Den Naturwissenschaftlichen Fakultäten. Stuttgart: Den Naturwissenschaftlichen Fakultäten der Friedrich- Alexander- Universität Erlangen- Nürnberg zur Erlangung des Doktorgrades.
- Oetjen, G. W. (1999). industrial freeze drying for pharmaceutical applications, en Freeze drying/lyophilization of pharmaceutical and biological products, L. Rey, J.C. May, y M.D. INC, Editores: New York, p. 267-335
- Jennings T. A., (1993). Seminario de liofilización, Sociedad Internacional de Liofilización.
- Barbosa G. – Cánovas H. (2000). Deshidratación de alimentos. Zaragoza, España Editorial Acribia, S.A.
- Mafart, P. (1994). Ingeniería Industrial Alimentaria. Volumen I. Zaragoza, España: Ed. Acribia S.A.
- Crank, J. (1975). The Mathematics of Diffusion. 2nd Ed. Oxford University Press, London
- Rayaguru, K. R., W. (2012). Mathematical modeling of thin layer drying kinetics of stone apple

- slices. *International Food Research Journal* 19 (4), 1503-1510
- Togrul, I. T. y Pehlivan, D. (2002). Mathematical modeling of solar drying of apricots in thin layers. *Food Engineering* 55, 209-216
- Corzo, O. B., N.; Pereira, A.; Vásquez, A. (2008). Weibull distribution for modeling air drying of coroba slices. *Journal of Food Science and Technology* 41: 2023-2028
- Orrego A., Carlos E., (2004). Apuntes del Curso Procesamiento de Alimentos: línea de profundización, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería y Arquitectura – Sede Manizales
- Lusk, G., Karel, M. y Goldblith, S.A. (1964). Thermal conductivity of some freeze dried fish. *Food Technol.* 18:121-124.
- Massey, W. y Sunderland, J.E. (1967). Measurement of thermal conductivity during freeze drying of beef. *Food Technol.* p. 408-412
- Okos, Martin R.; NARSIMHAN, Ganesan; SINGH, Rakesh K. y WEITNAUER, A. C./1992). Food Dehydration. By HELDMAN, Dennis R. *Handbook of Food Engineering*. Marcel Dekker, Inc. 501-507
- Fellows (2000), *Food processing Technology, Principles and Practice*, 2nd Ed. CRC Press LLC.
- Levi Guy & Karel Marcus (1995) Volumetric shrinkage (collapse) in freeze-dried carbohydrates above their glass transition temperature
- Heldman, D. R. y Hartel, R. W. (1997). *Principles of food processing. Freezing and frozen-food storage*. Chapman & Hall. Nueva York. pp. 113-137
- Martínez, A., Daza, L.E., Grajales, L.M. y Orrego, C.E. (2006) Determinación de la difusividad efectiva del vapor de agua en un producto liofilizado. En VI Seminario Nacional e Internacional de Frutales. Manizales