



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTILÁN**

**ESTUDIO TÉRMICO Y MÁSIKO EN LA PRIMERA ETAPA DE SECADO POR
CONGELACIÓN A VACÍO DE PAPA Y ZANAHORIA.**

**TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO EN ALIMENTOS
PRESENTAN:**

**PALOMA ARROYO AURIOLES
ISRAEL MARQUEZ DE LA ROSA**

**ASESORES: I.A ALFREDO ALVAREZ CARDENAS
M.C. MARIA DE LA LUZ ZAMBRANO ZARAGOZA**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a la universidad por permitirnos ser parte de su gran familia y compartir con nosotros toda su riqueza.

Al profesor Alfredo por su amistad, cariño, el tiempo dedicado y el interés mostrado para encaminar nuestro esfuerzo en la realización de este trabajo, por ayudarnos a ser mejores seres humanos y profesionistas.

A la profesora Luz Zambrano por su amistad y cariño, gracias por su tiempo, por compartir su talento, por los buenos consejos que nos hicieron crecer durante este tiempo, siempre estará en nuestro corazón.

A todos y cada uno de nuestros profesores que contribuyeron para forjarnos como profesionistas y buenos universitarios, por plasmar en nosotros esos grandes conocimientos.

A nuestra generación 25 por permitirnos pasar cinco años inolvidables de nuestras vidas.

DEDICATORIAS

Gracias a dios por darme su fortaleza y confianza para poder crecer cada día más como persona y profesionista, gracias por llenarme de bendiciones.

A mi abuelito Juan Auriolos:

Por que siempre creíste en mí, me apoyaste y amaste hasta el último día de tu vida.

A mis papás:

Por todo el amor que me han dado por su lucha diaria de apoyarme y ayudarme para ser una mejor persona, por su gran ejemplo de fortaleza, por sus sacrificios y desvelos en el afán de sacarme a delante los quiero mucho papitos.

Gracias a mis hermanos (Roberto, Polo) a mis tías (Lily, Susy) y a mis primitas (Lupita, Esme y Koritza) por su enorme cariño y apoyo por que siempre van estar conmigo, ya que todos forman parte importante de mi vida para impulsarme a seguir adelante.

A mi familia Martínez Auriolos:

Gracias por todo su apoyo y cariño, por sus grandes consejos para forjarme, por sus alegrías, angustias y desvelos, pero sobre todo gracias por ser mi familia los quiero mucho.

A la familia Márquez de la Rosa y Hugo:

No tengo palabras para agradecerles todo lo que han hecho por mi solo puedo decirles que son parte fundamental en mi vida y que siempre tendrán un lugar importante en mi corazón gracias por dejarme formar parte de su familia, los quiero mucho

A toda mi familia que tuvo confianza en mi y que me brindo su apoyo, gracias.

Gracias a mis amigos (Noemy, Ere, Tania, Roberto, Pablo, Jorge, Oscar, Lucero, Lety, Alicia, Bianca) por brindarme su amistad y compartir buenos y difíciles momentos, gracias por su apoyo y cariño.

A ti mi amorcito por estar conmigo en todo momento, por que juntos hemos logrado conseguir nuestros objetivos, por ser ese gran motor en mi vida, por tu gran apoyo, gracias por toda la felicidad que me das, gracias por ser quien eres en mi vida, Te amo Isra.

Paloma

DEDICATORIAS

Gracias a dios por llenar de bendiciones mi vida, por saber que siempre esta conmigo y por guiarme en el camino diario hacia la culminación de esta etapa de mi carrera profesional.

A mis padres:

Por ser los pilares donde se sostiene mis éxitos, por ser las dos personas a las cuales les debo todo lo que soy, por la confianza depositada en mi, por enseñarme todo lo que saben de la vida, por ser esas personas que dejaron a un lado cualquier cosa con el afán de verme siempre feliz, por dejarme sentir su cariño y apoyo en todo momento, pero sobre todo gracias por ser mis padres los adoro.

A mis hermanos (Jairo, Evelyn) por impulsarme en el día a día, por ser esas personas a las cuales puedo contar mis tristezas y alegrías, por estar conmigo en las buenas y en las malas, por enseñarme que la unión siempre nos facilita las cosas y que cuando uno cae el otro siempre esta para levantarlo y llevarlo mas adelante, por confiar en mi y llenarme de ganas para hacer cualquier cosa que me proponga, por compartir conmigo los tiempos de dicha y resolver en conjunto los tiempos difíciles, gracias por ser mis hermanos los quiero mucho.

A mis abuelos, tíos, Hugo y Angel:

Gracias por todos sus consejos y por el apoyo que representa para mí tener una familia como la nuestra los quiero mucho.

A mis amigos (Alejandro y Martín), por ser las dos personas que me enseñaron el valor de la amistad verdadera y desinteresada, por los momentos de fiesta, regaños y consejos que por el bien de cada uno hemos tenido, por el apoyo incondicional para que consiguiera este y otros objetivos. Gracias por ser mis amigos.

A mis compañeros de escuela (Jorge, Pablo, Roberto, Josué, Lalo y Oscar)

Por ser las personas con las cuales compartí noches de estudio, fiesta y charlas amenas, por tenderme la mano siempre que fue necesario y por dejarme saber que existen grandes seres humanos con los cuales compartir toda una vida.

A mi perro bruno por que nunca me dejo solo en las noches de desvelo.

A mi novia (Paloma) por ayudarme a ver la vida de otra forma, gracias por ser la persona que eres conmigo, por compartir tantos momentos e impulsarme a seguir adelante, por amarme y permitirme amarte, por tu gran apoyo y por estar en mi vida.

Israel

INDICE	Página
INDICE GENERAL	I
INDICE DE FIGURAS	II
INDICE DE TABLAS	II
RESUMEN	III
INTRODUCCIÓN	IV
CAPITULO I. ANTECEDENTES	
1.1. Materia prima.	1
1.1.1. Composición química de papa y zanahoria.	1
1.1.2. Efecto de la temperatura y presión en la cámara de secado.	3
1.2. Fundamento de secado por congelación a vacío.	6
1.2.1. Etapas de congelación.	7
1.2.2. Primera y segunda etapa de secado.	9
1.2.3. Tipos de secadores.	10
1.2.4. Sistema de secado por congelación a vacío.	10
1.2.5. Características del proceso térmico.	12
1.3. Mecanismos de transferencia de masa y calor en un proceso de secado por congelación a vacío.	15
CAPITULO II. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	
2.1. Cuadro metodológico.	21
2.2. Descripción del cuadro metodológico.	22
CAPITULO III. TRATAMIENTO DE DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	
3.1. Pérdidas de humedad por sublimación.	26
3.2. Coeficiente de difusividad másica.	28
3.3. Conductividad térmica.	32
3.4. Coeficiente de difusividad térmica.	32
3.5. Flux de sublimación.	35
3.6. Relación del número adimensional de Lewis.	36
CONCLUSIONES	38
ANEXOS	39
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	40

INDICE DE FIGURAS

Figura	Nombre de figura	Página
1	Etapas de proceso de secado completo en forma sinóptica.	8
2	Diagrama de equilibrio de fases aproximado presión – temperatura para el agua pura.	13
3	Influencia de la presión de trabajo sobre la velocidad de sublimación.	14
4	Transferencia de calor y masa en secado por congelación a vacío.	16
5	Transferencia de calor y masa en una superficie plana.	17
6	Pérdida de humedad durante el secado en zanahoria y papa.	27
7	Coefficiente de difusividad másica en zanahoria a los diferentes espesores.	30
8	Coefficiente de difusividad másica en papa a los diferentes espesores.	31
9	Conductividad térmica contra tiempo para zanahoria y papa.	32
10	Coefficiente de difusividad térmica en zanahoria a los diferentes espesores.	34
11	Coefficiente de difusividad térmica en papa a los diferentes espesores.	35
12	Flux de sublimación contra tiempo en zanahoria y papa.	36

INDICE DE TABLAS

Tabla	Nombre de tabla	Página
1	Contenido de humedad para zanahoria y papa.	26
2	Coefficiente de difusividad másica para zanahoria.	29
3	Coefficiente de difusividad másica para papa.	30
4	Coefficiente de difusividad térmica para zanahoria.	33
5	Número de Lewis en papa y zanahoria.	36

RESUMEN

El presente trabajo se llevo a cabo con el propósito de estudiar el comportamiento de la velocidad de sublimación en papa y zanahoria durante la primera etapa de secado por congelación a vacío, este es un proceso de conservación de los alimentos que se fundamenta en la sublimación del hielo bajo vacío, es decir, el hielo se sublima cuando se suministra la energía correspondiente al calor latente, debido a la baja presión en la cámara y temperaturas, posteriormente se condensa para evitar el retorno de vapor de agua contenida en alimentos congelados, dando con ello un producto con mayor calidad nutricional y conservando los espacios intracelulares, lo que hace posible que el producto recupere su forma durante la rehidratación.

Se evaluó la velocidad de sublimación a través del trabajo experimental que requirió establecer el punto de equilibrio en el sistema que permitiera llevar a acabo la sublimación; se adquirieron papas y zanahorias previamente congeladas por el método de congelación rápida individual (IQF).

Se trabajo en un equipo de secado por congelación a vacío en donde se evaluaron las perdidas de humedad en cada muestra a espesores de 0.6, 0.4 y 0.2 cm e intervalos de tiempo 20, 40, 60 y 80 minutos durante la primera etapa de sublimación, posteriormente se construyeron gráficos que permitieron determinar los diferentes coeficientes de difusividad térmica y másica con los cuales se llevo acabo el análisis del número adimensional de Lewis que las relaciona.

Tanto el espesor como la estructura física y química del material afectaron de forma determinante la relación entre la transferencia de masa y calor, ya que debido a las características del alimento en los espesores de 0.6 cm se permite sublimar mejor facilitando así el proceso de secado que se refiere a la eliminación del agua.

INTRODUCCIÓN

El secado se refiere a la eliminación de agua de los materiales de proceso y de otras sustancias, en general el secado significa la remoción de cantidades de agua relativamente pequeñas de cierto material, en el secado el agua casi siempre se elimina en forma de vapor de aire. En algunos casos, el agua se puede eliminar de los materiales sólidos por medios mecánicos, utilizando prensas, centrifugas y otros métodos. El contenido de humedad del producto seco final varía ya que depende del tipo de producto.

El secado o deshidratación de materiales biológicos (en especial alimentos), se usan también como técnica de preservación. Los microorganismos que provocan la descomposición de los alimentos no pueden crecer y multiplicarse en ausencia de agua además, muchas de las enzimas que causan los cambios químicos de los alimentos y otros materiales biológicos no pueden funcionar sin agua (*Geankoplis, 1998*).

Uno de los problemas que siempre ha preocupado a los investigadores y científicos, es el que presentan gran números de productos biológicos, químicos y alimenticios, que al desnaturalizarse fácilmente, no permiten su conservación sin que sus cualidades originales sean alteradas.

Para efectos de este estudio se utilizó el secado por congelación a vacío que da lugar a productos alimenticios de más alta calidad que con cualquier otro método de secado. El factor principal es la rigidez estructural que se preserva en la sustancia congelada cuando se verifica la sublimación, esto evita el colapso de la estructura porosa después del secado, al añadir agua posteriormente el producto rehidratado retiene la mayor parte de su estructura original y composición química (*Lewis, 1992*).

Estudios anteriores como el de los científicos franceses Bordas y D'Arsonval en 1906 y el americano Shackell en 1909, descubren la aplicación del principio físico de la sublimación, construyendo un sencillo aparato de secado por congelación a vacío de laboratorio.

El gran impulso de la aplicación industrial del secado por congelación a vacío, se debe a los trabajos de E.W Flosdonf y S.Murdd, que trabajando en la escuela de Medicina de la Universidad de Pennsylvania, liofilizan los primeros productos para uso clínico en gran escala, principalmente sueros y plasma humano.

En las últimas décadas se han publicado numerosos trabajos, técnicas y aplicaciones científicas para la congelación a vacío, en donde se analizan, modifican las condiciones y variables de operación del equipo con el fin de lograr su aplicación industrial (*Loch-Bonazzi y col., 1992*).

Es importante mencionar el por que, para el objetivo de estudio se trabajo con papa y zanahoria, esto se debe a que es necesario que el material cuente con un alto contenido de humedad inicial libre que facilite el proceso de secado por congelación a vacío, ya que su fundamento parte de la eliminación de humedad, además es determinante el uso de dos diferentes estructuras físicas y químicas de los alimentos que permitan analizar el amplio comportamiento que tienen.

El proceso de secado por congelación a vacío parte desde la etapa de congelación a la de secado. Primeramente es necesario llevar a cabo la congelación del producto para ello se adquirieron papas y zanahorias previamente congeladas bajo el método de congelación rápida individual este proceso de congelamiento rápido permite que los cristales de hielo que se forman dentro de las células de los tejidos sean de tamaño muy pequeño.

De esta manera se evita que las paredes celulares que conforman los tejidos vegetales se rompan. Por lo tanto al descongelar el producto no hay derrame de fluidos celulares, lo cual garantiza una textura, valor nutritivo y sabor igual al de un producto recién cosechado. La diferencia sustancial entre una congelación rápida Individual (IQF) y una congelación lenta es el tamaño del cristal que se forma. En la segunda el cristal es tan grande que rompe las paredes celulares, permitiendo el derrame de fluidos internos y por ende un deterioro en textura, sabor y valor nutritivo (*Sanz et al., 1999*).

Resulta interesante el estudio del efecto que tiene el secado por congelación a vacío de dos alimentos con diferentes características físicas y químicas sobre la velocidad de sublimación, importante en el secado por congelación a vacío, debido a que en ella se refleja la transferencia de calor y masa que son los fenómenos que rigen el proceso, así mediante el uso de los coeficientes de transferencia de calor y masa se pueda analizar su comportamiento mediante el número adimensional de Lewis que los relaciona y permite dar un panorama más amplio de los efectos que ocurren en el proceso.

Capítulo I. ANTECEDENTES

1.1. MATERIA PRIMA

La zanahoria y la papa son hortalizas muy utilizadas en la industria de alimentos, actualmente el consumo de hortalizas se ha incrementado de manera importante a nivel mundial, debido a que son alimentos que se encuentran en las dietas que pretenden bajar el número de calorías por comida debido a su bajo contenido calórico comparado con el de algunas cereales y otros alimentos, además son dos hortalizas que se procesan de manera importante en la industria ya que el mercado ha cambiado drásticamente debido al ritmo tan acelerado de vida en las ciudades, lo que ha provocado que los alimentos instantáneos estén ocupando las alacenas de las familias no solo del primer mundo sino de las grandes ciudades de países como el nuestro, en donde se busca la obtención de comida rápida para facilitar la vida diaria. Es aquí en donde estas hortalizas acompañan la mayoría de estos alimentos, como lo son sopas instantáneas y ensaladas.

Actualmente este tipo de alimentos tiene gran aceptación en particular las hortalizas por su facilidad de manejo durante los diferentes procesos y por ser del gusto de la mayoría de los consumidores.

1.1.1. Composición química de papa y zanahoria.

Papa (*Solanum tuberosum L.*)

Es un tubérculo, que debido a su modificación estructural es un órgano de almacenamiento en la planta, razón por la cual es rica en almidón, es un sustrato energético que contribuye al mantenimiento. Al ser una raíz modificada también es rica en vitaminas hidrosolubles y minerales. Esta hortaliza tiene fibra dietética y durante el procesamiento forma almidón resistente estas sustancias son importantes para el buen funcionamiento fisiológico del ser humano.

El valor nutrimental de la papa depende mucho de su estado óptimo de madurez y de la forma de consumo. Las papas fritas, por estar impregnadas de aceite, presentan un valor calórico superior al valor calórico de las papas guisadas o deshidratadas. Además, en el proceso de pelado se pierde gran parte de su valor nutricional, ya que su piel es especialmente rica en minerales, proteínas, vitaminas y fibra (Grosch, 1992).

El almidón sirve de reserva energética en el reino vegetal y se encuentra en pequeños corpúsculos discretos que reciben el nombre de gránulos; en tejido vegetal, éstos ejercen una presión osmótica muy baja, con lo que la planta almacena grandes cantidades de glucosa de una manera muy accesible sin romper el balance de agua interior. El contenido de humedad en papa es predominante comparada con los demás compuestos químicos ya que contiene un 78% en humedad, 18.9% de carbohidratos y 2 % en proteínas. Químicamente el almidón es una mezcla de dos polisacáridos muy similares esta la amilosa y la amilopectina. La papa contiene aproximadamente 17 – 27 % de amilosa y el resto de amilopectina. El primero es producto de la condensación de D-Glucopiranosas por medio de enlaces glucosídicos α -1,4 resulta una cadena de homopolímero que es denominada amilosa Un segundo tipo de polímero en el almidón se desarrolla cuando la condensación enzimática se desarrolla entre carbonos 1 y 6 de la molécula de glucosa. Este enlace ocasional, con el enlace predominante 1,4 resulta en un efecto de ramificación. Esta molécula es denominada amilopectina. Todos los almidones se hacen de una o ambas de estas moléculas, sin embargo, la relación de una a otra cambiará (Badui, 1993).

Zanahoria (*Dacus carota L.*)

En la tabla 1, se muestra la composición química de la zanahoria en base húmeda, de este se destaca que después del agua con un 87% los carbohidratos son el componente más abundante con 9.2% de la composición total.

Además de que parte de estos carbohidratos son los cuantificables como fibra dietética, es decir aquellos que no son digeridos por el tracto digestivo humano y entre los que se incluye la lignina, la que a pesar de no ser un polisacárido, si se comporta como fibra dietética.

La lignina está formada por la extracción irreversible del agua de los azúcares, creando compuestos aromáticos, es una macromolécula, con un elevado peso molecular, que resulta de la unión de varios ácidos y alcoholes fenilpropílicos (cumarílico, coniferílico y sinapílico). El acoplamiento aleatorizado de estos radicales da origen a una estructura tridimensional, polímero amorfo, característico de la lignina, lo que lo convierte en el mas complejo de los polimeros naturales en relación a su estructura y heterogeneidad (*Grosch, 1992*).

1.1.2. Efecto de la temperatura y presión sobre la estructura de la papa y zanahoria.

a) Influencia de la porosidad del producto.

La porosidad es la proporción entre el volumen de los espacios intercelulares y el volumen total del órgano, esta implica cambios en forma de difusión como son:

- La difusión libre que tiende a igualar las concentraciones de gases entre la atmósfera interna de los órganos y el aire ambiente y la permeación proceso de difusión de los gases en estado disuelto a través de las células.

Por porosidad no se entiende proporción de volumen de la fase no sólida del producto sino tamaño de los poros. De este modo la permeabilidad a la difusión de vapor aumenta con la porosidad lo que se traduce en un aumento de la velocidad de sublimación (si el transporte de masa es limitante).

Esta es la razón por la cual la rápida velocidad de congelación del producto provoca rápida velocidad de secado ya que los cristales formados no son voluminosos y se transforman en poros después de la sublimación. Esto se ve con mayor frecuencia en la estructura de la zanahoria que en papa (*Krokida, 1998*).

b) Gelatinización.

Los gránulos de almidón son insolubles en agua fría debido a su organización e interacción entre sus dos polisacáridos constituyentes; sin embargo, cuando se calienta empieza un proceso lento de absorción de agua en las zonas intermicelares amorfas, que son las menos organizadas y las más accesibles, ya que los puentes de hidrógeno no son tan numerosos ni rígidos como en las áreas cristalinas. A medida que se incrementa la temperatura, se retiene más agua y el gránulo empieza a hincharse y aumentar de volumen, fenómeno que se puede observar en el microscopio; una vez que la parte amorfa se ha hidratado completamente, la cristalina inicia un proceso semejante, pero para esto se requiere más energía (*Arthey, 1992*).

Al llegar a una cierta temperatura, el gránulo empieza su volumen máximo y pierde tanto su patrón de difracción de rayos X; si se administra más calor, el gránulo hinchado, incapacitado para retener líquido, se rompe parcialmente y la amilosa y la amilopectina, fuertemente hidratadas, se dispersan en el seno de la disolución. A todo este proceso se le llama gelatinización y es una transición de un estado ordenado (la estructura cristalina) a otro desordenado en el que se absorbe. Es decir, la gelatinización transforma los gránulos de almidón insolubles en una solución de moléculas constituyentes en forma individual (*Arthey, 1992*).

c) Interacción del almidón con agua.

Uno de los principales factores que afectan las propiedades funcionales de estos polímeros es la cantidad de agua con la que puede reaccionar; la intensidad y su grado de hinchamiento están en función directa de la concentración de este disolvente de tal manera que la adsorción se facilita a medida que aumenta la concentración (*Fellows, 1994*).

d) Dispersión permanente.

Al secar por congelación a vacío un material, la superficie del sólido constituye la interfase en la cual tiene lugar la sublimación del hielo. A medida que éste va sublimando, la interfase va retrocediendo al interior de ese sólido. Al final del secado por congelación a vacío, lo que queda del sólido está constituido por las sustancias no volátiles del material original y forma una red de partículas. Estas, por lo general, soportan su propio peso y forman una estructura muy porosa y de una enorme superficie. Esa gran porosidad y superficie por unidad de peso, son justamente las cualidades más buscadas, aparte de la estabilidad térmica, en los productos de secado por congelación a vacío. Las dos cualidades nombradas son aquellas que permiten la reconstitución o solubilización rápida del producto. Cada molécula ha quedado en su lugar en el espacio, desde el comienzo hasta el final de la operación. La concentración espacial del soluto, al congelarse totalmente la solución, es la misma en el producto deshidratado que en el original (*Helman, 1981*).

e) Esterilidad.

Durante el secado por congelación a vacío no hay multiplicación bacteriana y la posibilidad de contaminación puede fácilmente reducirse al mínimo.

Las cámaras de secado por congelación a vacío no son difíciles de esterilizar y los productos pueden envasarse y sellarse en sus envases dentro de las cámaras (*Helman, 1981*).

f) Oxidación.

Durante el secado por congelación a vacío se trabaja a una presión que va desde 1 hasta 10^{-3} torr; esta presión, la tensión parcial del oxígeno es muy baja, las reacciones en las cuales interviene el oxígeno como reactante, tendrá una velocidad baja o muy baja.

Se puede decir que las oxidaciones prácticamente no ocurren durante el secado por congelación a vacío. El problema es diferente después. Cualquier envase que contenga un material secado por congelación a vacío tendrá que protegerse durante por lo menos un año a temperatura ambiente. Todo envase es permeable a los gases, entre estos al oxígeno. Si se piensa que durante un año a temperatura ambiente una cierta cantidad de oxígeno puede penetrar desde el exterior al interior de un envase, se observará que pueden ocurrir reacciones no deseables especialmente con ácidos grasos cuyo enranciamiento notable se produce con mínimas cantidades de oxígeno. También el vapor de agua puede entrar al envase y causar daño por su lado (*Barbosa, 2000*).

1.2. FUNDAMENTO DE SECADO POR CONGELACIÓN A VACÍO.

Es un proceso de conservación de los alimentos que se fundamenta en la sublimación del hielo bajo vacío, es decir, el hielo se sublima cuando se suministra la energía correspondiente al calor latente, debido a la baja presión en la cámara y se condensa posteriormente para evitar el retorno de vapor de agua contenida en alimentos congelados.

El proceso de secado por congelación a vacío consta de dos etapas: congelación y secado; la congelación debe ser muy rápida con el objeto de obtener un producto con cristales de hielo pequeños y en un estado amorfo (*Mellor, 1978*). La etapa de secado se realiza a presiones bajas para permitir la sublimación del hielo.

En el secado por congelación a vacío se deben considerar tres variables de diseño importantes: 1) el vacío en el interior de la cámara de secado, 2) el flujo de energía de la placa calefactora aplicado al alimento y 3) la temperatura del condensador. La velocidad inicial de secado es alta ya que la resistencia a los flujos de masa y energía es pequeña, sin embargo se acumula una pequeña capa alrededor del producto congelado que hace decaer la velocidad de secado a medida que éste avanza. Esta capa sirve de aislante y afecta a la transmisión de calor hacia el frente de hielo. Además la transferencia de materia desde el frente de hielo se reduce a medida que el espesor de la capa seca aumenta. Esto es debido a la reducción de la difusión desde la interfase de sublimación hacia la superficie del producto (*Tscheuschner, 2001*). En la figura 1 se muestra de manera sinóptica el procedimiento, operación y los equipos del secado por congelación a vacío (*Helman, 1981*).

1.2.1. Etapas de congelación

La temperatura y el tiempo de congelación de productos alimentarios es función de los solutos en solución que contiene (*Singh, 1998*). La temperatura de congelación para el agua pura permanece constante en el punto de congelación hasta que el agua se ha congelado. En los alimentos, la temperatura de congelación es más baja que para el agua pura ya que los solutos del agua no congelada se van concentrando y la temperatura de congelación va disminuyendo continuamente hasta que la solución queda congelada.

Al final de la congelación la masa entera del producto está rígida formando un sólido que consiste en cristales de hielo y componentes del alimento (Singh, 1998). Se requiere llegar al estado sólido para asegurar la eliminación de agua sólo por sublimación y no por combinación de sublimación y evaporación. Se debe evitar una fusión y una inadecuada congelación ya que sustancias porosas y gomosas pueden aparecer en el producto final.

La permeabilidad de la superficie congelada puede afectarse por la migración de componentes solubles durante la etapa de congelación. Sin embargo la eliminación de la fina capa de la superficie del producto congelado o la congelación bajo condiciones que inhiban la separación de la fase concentrada propician mejores velocidades de secado (Dalglish, 1990).

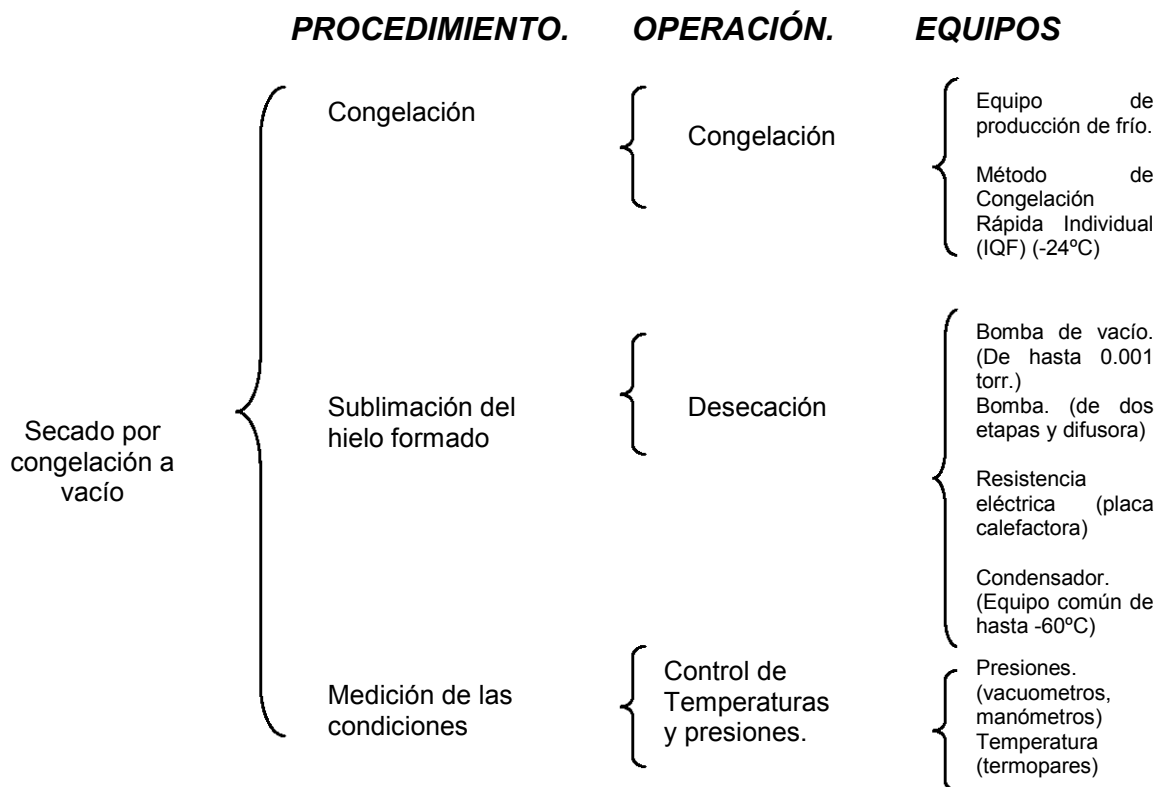


Figura 1: Etapas de secado por congelación a vacío en forma sinóptica.

1.2.2. Primera y segunda etapa de secado.

La primera etapa de secado es la sublimación del hielo bajo vacío. El hielo sublima cuando se suministra la energía correspondiente al calor latente debido a la baja presión en la cámara de secado, el vapor de agua generado en la interfase de sublimación es eliminado a través de los poros.

El condensador previene el retorno del vapor de agua hacia el producto. La fuerza impulsora de sublimación es la diferencia de presiones entre la presión del vapor de agua en la interfase de hielo y la presión parcial del vapor de agua en la cámara de secado.

La energía requerida para mantener la sublimación se supone que es igual al flujo radiante o conductivo debido al gradiente de temperaturas entre el producto congelado y la fuente de calor en la cámara de liofilización, sin embargo en la mayoría de los estudios se considera despreciable para el análisis el flujo de calor radiante. (*Srikatden et al., 2003*).

La segunda etapa de secado comienza cuando se ha agotado el hielo en el producto y la humedad proviene del agua parcialmente ligada en el material que se está secando. En este momento la velocidad de calentamiento debe disminuir para mantener la temperatura del producto por debajo de los 30 - 50°C lo que evita el colapso del material (*Mellor, 1978*). Si la parte sólida del material está demasiado caliente la estructura se colapsa lo que se traduce en una disminución de la velocidad de sublimación en el frente de hielo del producto. (*Geankoplis, 1998*).

1.2.3. Tipos de secadores.

Existen dos tipos de secadores por congelación a vacío:

- 1) En un proceso discontinuo o batch las bandejas se cargan con el producto congelado se cierra la cámara y se hace el vacío se lleva a la temperatura de secado durante el tiempo especificado para el ciclo. Al final del ciclo de secado se llena la cámara con un gas inerte y a continuación se abre.
- 2) En un proceso continuo se utilizan secadores de bandeja y dinámicos que ocupan eyectores de vapor de agua para eliminar grandes volúmenes de vapor de agua y gases permanentes que al no tener un eyector los suficientemente bueno requeriría de una bomba bastante potente para realizar el trabajo y permitir el carácter cíclico del secado por congelación a vacío que favorece principalmente a la industria que seca grandes cantidades de material. (*Lewis, 1993*).

1.2.4. Sistema de secado por congelación a vacío.

El sistema de secado por congelación a vacío esta compuesto principalmente por los siguientes elementos:

- a) Cámara de secado.

En el interior de la cual se dispone el producto sobre una serie de bandejas paralelas y horizontales. Esta puede ser rectangular o cilíndrica. Las cámaras de sección rectangular permiten aprovechar el espacio interior fácilmente. Por el contrario el interés de las de forma cilíndrica es su mejor resistencia a la presión (*Golblith, 1975*).

b) Fuente de calor. (Placa).

El calor necesario para llevar a cabo el proceso de sublimación puede ser transmitido mediante placas con circulación de fluidos. En este modelo las placas pueden actuar como un congelador indirecto; es decir, se lleva a cabo una transferencia de calor por conducción.

Durante la sublimación se hace circular agua caliente cuyo flujo se regula mediante una válvula automática, también la fuente de calor puede ser una serie de resistencias eléctricas incorporadas directamente a las bandejas.

A menudo se emplea la transferencia de calor por radiación mediante rayos infrarrojos o microondas. De este modo se pueden calentar uniformemente ambos lados de la capa de producto.

c) Condensador.

Tiene la función de condensar el vapor de agua extraído de la cámara, el vapor pasa a la zona de mayor concentración y de menor temperatura. Se caracteriza por su capacidad de condensación que depende de la temperatura de su superficie. El condensador puede ser alimentado directamente por el fluido frigorífico.

Los secadores por congelación a vacío se pueden distinguir por la localización del condensador, los de condensador interno y equipos con condensador externo, Se habla de condensador interno cuando se halla en el interior de la cámara de secado. Esta opción es interesante desde dos puntos de vista:

1) Por una parte implica un trayecto más corto del vapor.

2) Por otra permite la fácil reconversión del secador al congelador.

El condensador externo se localiza en un recinto separado de la cámara de secado comunicado por una válvula.

Esta disposición implica cierta independencia del condensador lo que facilita su mantenimiento o las reparaciones. También permite alternar dos condensadores independientes de modo que uno funciona mientras otro está en proceso de desescarchado permitiendo que el secador por congelación a vacío funcione en continuo. Como contrapartida el condensador externo exige hacer el vacío en un recinto suplementario (*Charm, 1981*).

d) Bomba de vacío

Se encarga de generar el vacío suficiente en la cámara para provocar la sublimación.

e) Sistema de producción de frío a una etapa de compresión que consta de los siguientes elementos (Evaporador, Compresor, Condensador y Válvula de expansión).

1.2.5. Características del proceso térmico.

a) Diagrama de fases de sustancias puras:

Una sustancia pura como el agua puede existir como fase sólida, líquida y vapor, dependiendo de las condiciones de temperatura y presión, durante la ebullición del agua, el agua líquida y el agua vapor son dos fases en equilibrio. En el diagrama de fases presión-temperatura (P - T) del agua existe un punto triple a baja presión (4579 torr) y baja temperatura (0,0098 °C) donde las fases sólida, líquida y gaseosa coexisten (PT). Las fases líquida y gaseosa existen a lo largo de la línea de vaporización (de C a C') y las fases líquida y sólida a lo largo de la línea de congelación (de B a B'), como se muestra en la figura 2. Estas líneas son de equilibrio entre dos fases (*Black, 1991*).

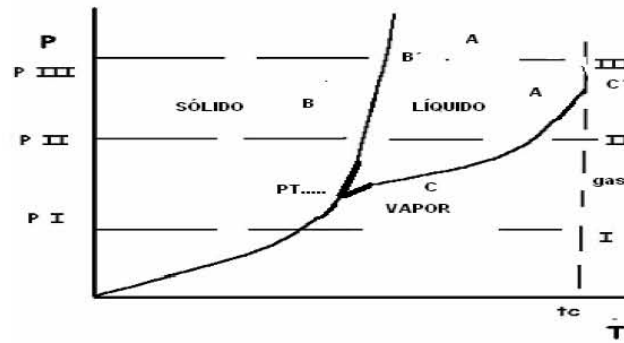


Figura 2: Diagrama de equilibrio de fases aproximado presión-temperatura (PT) para el agua pura (Black, 1991).

La figura 2 corresponde al diagrama P-T o *diagrama de fases* en que las líneas llenas dividen al plano en regiones cuyos puntos corresponden a valores de presión y temperatura para los que la sustancia está completamente en fase sólida, líquida o gaseosa. Las líneas mismas representan las condiciones para las que la sustancia se descompone en dos fases de equilibrio. En esta figura, un proceso isobárico reversible como el propuesto queda representado como una recta horizontal que, de acuerdo a las regiones que atraviesa, presenta distintas características. En el primer caso, para calentar isobáricamente el sólido que se encuentra inicialmente a baja temperatura, debe entregársele calor a la presión constante P_1 . Como consecuencia de esto, el sólido se dilata y su temperatura asciende gradualmente a medida que se le entrega calor para estabilizarse posteriormente en un valor bien determinado, conocido como *punto de sublimación*, temperatura para la cual parte del sólido comienza a vaporizarse. Al continuar agregando calor al sistema se consigue que una mayor proporción del sólido sublime.

b) La temperatura y tiempo de congelación de la papa y zanahoria.

Es función de los solutos en solución que contiene (Fellows, 1994) la temperatura de congelación es más baja que para el agua pura, ya que los solutos del agua no congelada se van concentrando y la temperatura de congelación va disminuyendo continuamente hasta que la solución queda congelada. Se requiere llegar al estado sólido para asegurar la eliminación

de agua solo por sublimación y no por combinación de sublimación y evaporación. Tanto la zanahoria como la papa son congelados mediante un tunel por congelación rápida individual y su temperatura de congelación llega a -24°C .

c) Presión

Influencia de la presión de la cámara de secado, como se observa en la figura 3, la velocidad de secado en función de la presión comprendida generalmente entre 0,01 y 1 Torr. Al sobrepasar la presión óptima disminuye la velocidad de sublimación, ya que al aumentar la presión se disminuye el gradiente de presión entre el frente de sublimación y la superficie del producto; por otra parte, se aumenta la temperatura de sublimación, lo que provoca la disminución del gradiente de temperatura. Por lo tanto, el aumento de presión disminuye simultáneamente la cantidad de transferencia de masa y cantidad de transferencia de calor. Es difícil interpretar la otra parte de la curva en la que se observa disminución en velocidad de sublimación cuando se desciende debajo de la presión de equilibrio del sistema. En este segmento el vacío provoca desaireado del producto de tal manera que cesan los movimientos de convección, lo que se traduce en disminución de la conductividad térmica del producto. En este momento, la difusividad másica esta controlada por difusividad térmica lo que provoca una disminución de la conductividad térmica (*Mafart, 1994*). La sublimación es la diferencia de presión entre la presión parcial en la interfase del hielo y la presión parcial de vapor de agua en la cámara de secado.

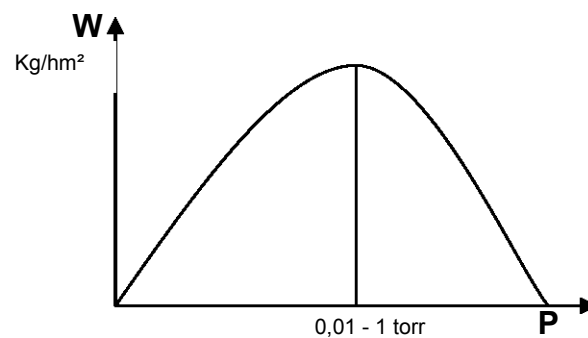


Figura 3: Influencia de la presión sobre la velocidad de sublimación (*Mafart, 1994*)

b) Vacío.

En este caso, el secado por congelación a vacío no puede compararse a un proceso de deshidratación por evaporación, sino a un proceso por arrastre. Sin embargo, el vacío tiene como objetivo disminuir los riesgos de fusión del hielo y acelerar el secado si el mecanismo limitante es la difusión de vapor a través de la masa del producto.

Si el mecanismo limitante es la transferencia de calor interna, como ocurre a menudo, al menos al principio del secado por congelación a vacío, es interesante trabajar a temperaturas de sublimación bajas y por lo tanto a bajas presiones, del orden de 0.3 a 1 Torr, o incluso menores.

1.3. MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE MASA Y CALOR EN UN PROCESO DE SECADO POR CONGELACIÓN A VACÍO.

Los fenómenos de transferencia de materia y calor durante el secado por congelación a vacío se pueden resumir en términos de difusión de vapor de agua del frente de sublimación y conducción de calor de la diferencia de temperaturas.

En el proceso de secado por congelación a vacío el material original está constituido por un núcleo central de material congelado. A medida que el hielo se sublima, el plano de sublimación, que se inicia en la superficie exterior, penetra al interior dejando atrás una corteza porosa de material ya seco como se muestra en la figura 4. El calor latente de sublimación del hielo, procede por conducción a través de la corteza de material seco. El vapor de agua que se forma se transfiere a través de la capa del material seco. Por consiguiente, las transferencias de calor y de masa se verifican simultáneamente como se observa en la figura 4.

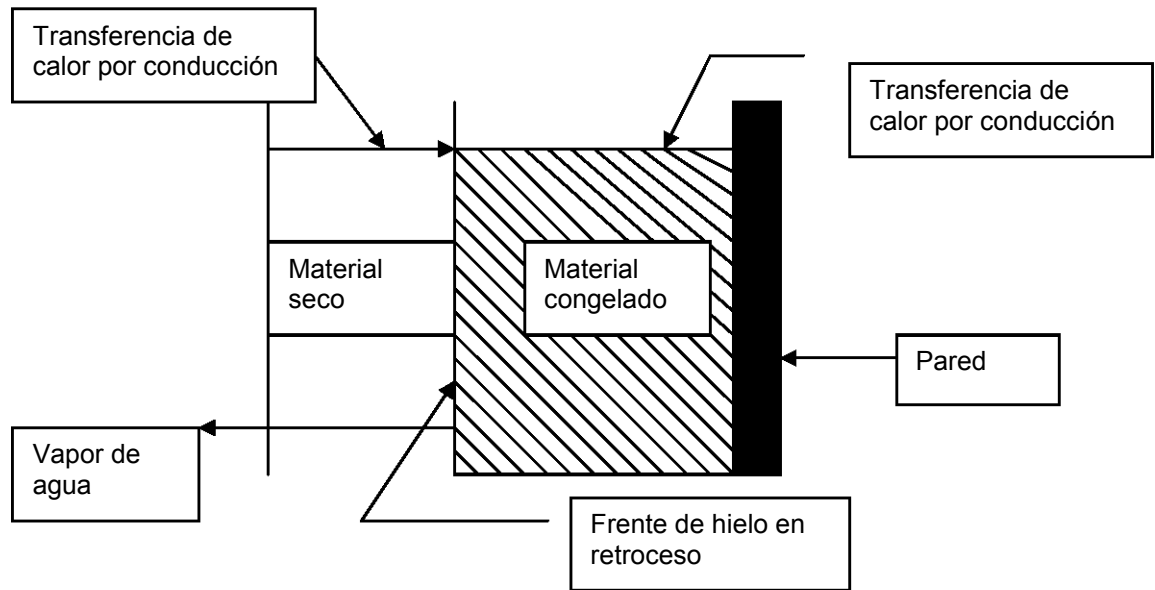


Figura 4: Transferencia de calor y masa en el secado por congelación a vacío.
(Barbosa, 2000)

El calor transferido desde la fase gaseosa por conducción ó convección llega a la superficie seca y se transfiere por conducción hasta la parte congelada. En algunos casos, el calor también pasa a través del material congelado para llegar al plano de la sublimación. El tiempo total de secado debe ser lo suficientemente largo como para que el contenido final de humedad sea inferior al 5% en peso, y evitar así la degradación del producto final durante su almacenamiento. Las temperaturas máximas que se alcanzan en alimentos secos y productos congelados deben ser bastante bajas para evitar la degradación.

El proceso más común en un secado por congelación a vacío, se basa en que los gases que rodean al material suministran a la superficie del sólido el diferencial de temperaturas necesario para la sublimación. Después, este diferencial de temperaturas provoca la transferencia de calor por conducción a través del material seco hasta la superficie congelada tal como se ve en la figura 5.

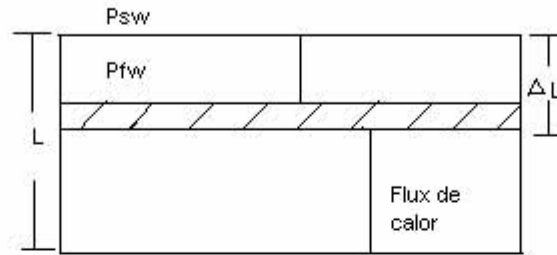


Figura 5: Transferencia de calor y masa en una superficie plana (*Mafart, 1994*).

El flujo de calor a la superficie del material se verifica por convección, ya que se da desde la superficie del material a la cámara de secado y una vez en el sólido seco y por conducción hasta la superficie de sublimación. El flujo de calor a la superficie es igual al que pasa por el sólido seco, suponiendo un estado pseudoestacionario (*Geankoplis, 1998*).

$$q_o = h(T_e - T_s)kt \left(\frac{T_s - T_f}{l_2 - l_1} \right) \dots\dots\dots (1) *$$

a) Velocidad de sublimación.

La sublimación tiene lugar en una sola dirección del espacio. A lo largo del tiempo progresa la capa ya seca en detrimento de la capa todavía congelada. El límite entre las dos capas se denomina frente de sublimación.

Una fuente de calor provoca que la sublimación se considere como un fenómeno endotérmico, por lo tanto como en todo proceso de eliminación de agua por vía térmica se está produciendo simultáneamente transferencia de calor y transferencia de materia.

* La nomenclatura se encuentra citada en la página 39 en la parte de anexos.

La energía requerida para mantener la sublimación se supone que es igual al flujo radiante o conductivo debido al gradiente de temperaturas entre el producto congelado y la fuente de calor en la cámara de secado (*Barbosa, 2000*).

El agua sublima por debajo del punto triple bajo presiones de 611 Pa o menores. La interfase de sublimación esta localizada por encima del frente de hielo y la eliminación de agua tiene lugar cerca o en la interfase de sublimación (*Mafart, 1994*).

$$W = \Delta H_{\text{sub}} / q_0 \quad (2)$$

c) Difusión a través de una capa plana.

La resolución para una placa plana en tiempos cortos tiene la siguiente forma simplificada:

$$MR = \frac{8}{\pi} \exp \left(\frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{4 l^2} \right) \quad (3)$$

la pendiente (m) es determinada de la gráfica $\ln(MR)$ vs tiempo (t) donde:

$$m = \frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{4 l^2} \quad (4)$$

MR es la relación de humedades al tiempo (t) menos la de equilibrio dividida entre la inicial menos la de equilibrio y (l) es la variación en espesor.

$$\frac{M - M_{\infty}}{M_0 - M_{\infty}} \quad (5)$$

La ecuación (5) muestran la relación de humedades linealmente de M a M_{∞} a través de la placa (*Cranck, 1975*).

d) Número de Fourier.

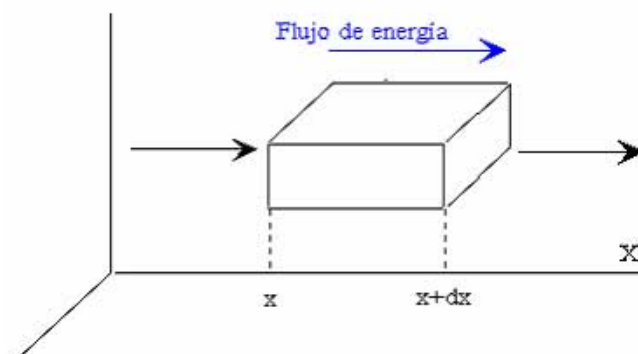
En 1822, el matemático francés Joseph Fourier dio una expresión matemática precisa que hoy se conoce como ley de Fourier de la conducción del calor. Esta ley afirma que la velocidad de conducción de calor a través de un cuerpo por unidad de sección transversal es proporcional al gradiente de temperatura que existe en el cuerpo (con el signo cambiado).

La ecuación que describe la conducción térmica se conoce como ley de Fourier, en este caso el campo es la temperatura T , y el coeficiente $F_0 = \alpha T/l^2$. La conducción del calor se establece siempre que exista un gradiente o diferencia de temperaturas entre dos puntos de sólido.

Sea ρ la densidad de corriente de energía (energía por unidad de área y por unidad de tiempo), que se establece en la barra debido a la diferencia de temperaturas entre dos puntos de la misma. La ley de Fourier afirma que hay una proporcionalidad entre el flujo de energía J y el gradiente de temperatura.

$$\rho = Kt \frac{\partial T}{\partial x}$$

Siendo Kt una constante característica del material denominada conductividad térmica.



e) Numero adimensional Lewis.

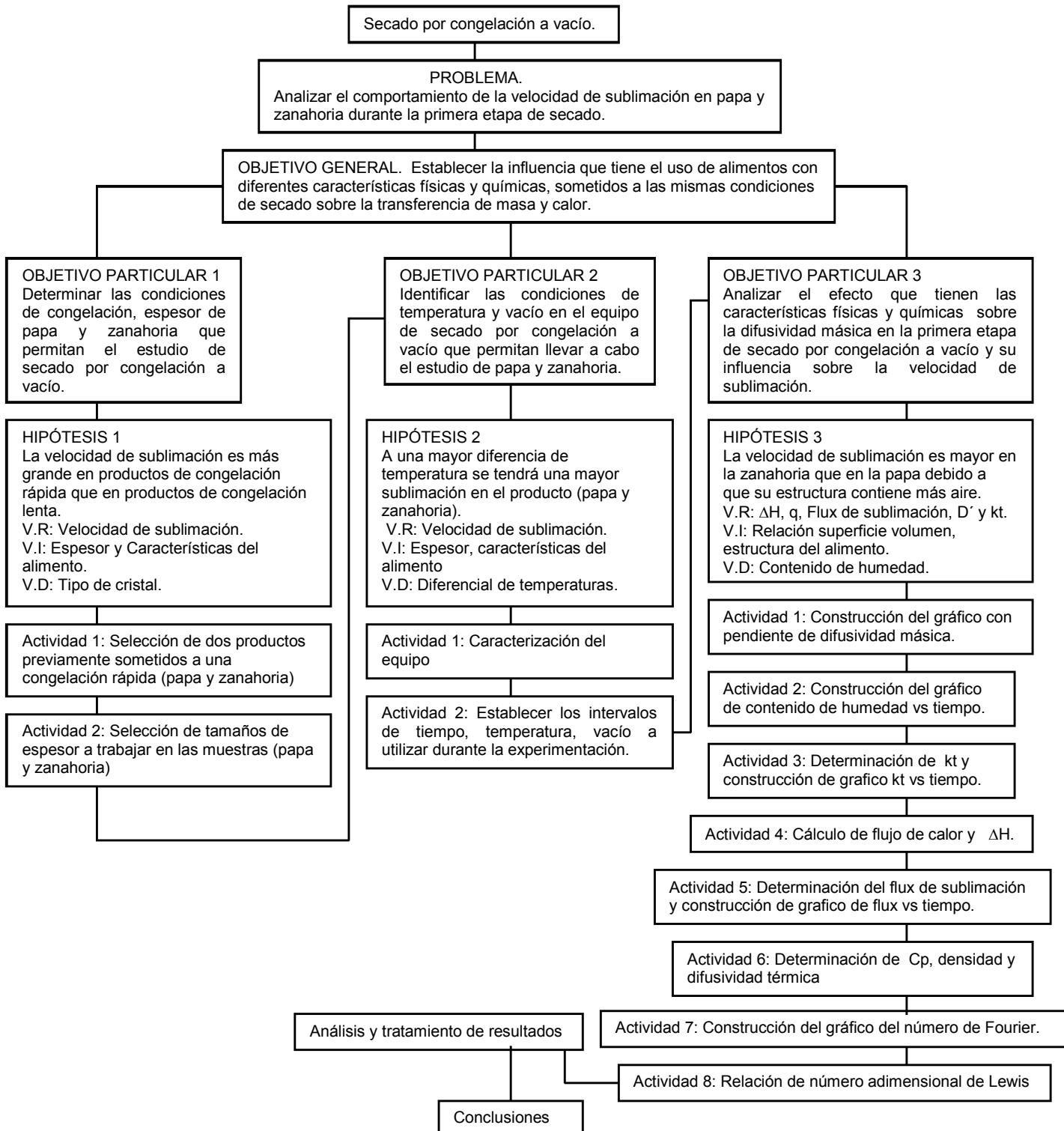
Se utiliza para relacionar la transferencia de masa y calor, mediante los perfiles de concentración y temperaturas:

$$\frac{\alpha}{D_{eff}} = N_{Le} = \text{Número de Lewis.} \quad (6)$$

Capítulo II. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.

El siguiente tipo de metodología empleada estudia la primera etapa de secado por congelación a vacío en dos alimentos con diferentes características físicas y químicas, permitiendo el análisis de los coeficientes de difusividad másica y térmica.

2.1. CUADRO METODOLOGICO



2.2. DESCRIPCIÓN DEL CUADRO METODOLOGICO

1. Selección de la materia prima:

Se utilizaron papas (*Solanum tuberosum L.*) y zanahorias (*Dacus carota L.*) que fueron compradas ya congeladas por el método de congelación rápida individual (IQF), esto para tener un mejor control en formación de cristal, para controlar las características del producto durante el secado por congelación a vacío.

2. Selección de tamaño en las muestras:

Con la finalidad de tener flujo de calor y masa unidireccional, las zanahorias y papas fueron cortadas en las dimensiones siguientes considerando tres niveles de variación:

Dimensiones de la zanahoria:

Diámetro = 2cm

Altura = espesor (0.2, 0.4 y 0.6 cm)

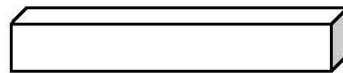


Dimensiones de la papa:

Largo = 3.0 cm

Altura = espesor (0.6, 0.4 y 0.2 cm)

Ancho = 0.5 cm



Las condiciones límites de la función $F(x)$ son:

$$\begin{array}{lll} M=M_0, & x=0, & t = 0 \\ M=M, & x=l, & t > 0 \\ M=F(x), & 0 \leq x \leq l, & t = 0. \end{array}$$

3. Caracterización de equipo.

Se trabajó con una unidad de secado por congelación bajo vacío modelo USC de *Ed. Educational Engineering S.A. N.V* que cuenta con un sistema de producción de frío por compresión mecánica, bomba de vacío marca Galileo Vacuum Tec modelo M6C17TC57C de 1 HP, refrigerante R-134 y una placa calefactora que no fue utilizada.

4. Establecimiento de condiciones de operación del equipo.

Previo a la experimentación se realizó una corrida experimental, con el fin de establecer el tiempo promedio en el que se realizaría los tratamientos para las diferentes muestras, determinado los intervalos de tiempo en 20, 40, 60 y 80 minutos para cada corrida. La presión absoluta en la cámara fue de 0.0197 atm y vacío de 60 cmHg.

5. Difusividad másica.

Para la cinética de secado se tomaron muestras cada 20 minutos, hasta que entre muestras existiera una mínima variación en peso, los resultados se pesaron en una balanza digital con precisión de ± 0.001 , se trataron en relación a una cinética de 1er orden, para obtener la velocidad de pérdida de humedad ($dw/dt = kC$). Los coeficientes de difusividad efectiva (D_{eff}) fueron determinados desde los resultados de secado y analizados de acuerdo con la segunda ley de Fick. Posteriormente se realiza el gráfico de coeficiente de difusividad másica para zanahoria y papa, de acuerdo a la ecuación (5).

6. Conductividad térmica.

Tomando en consideración la cinética de pérdida de humedad, se determinó la conductividad térmica (k_T), a los diferentes espesores, utilizando la siguiente ecuación empírica (*Singh, 1998*):

$$k_T = 0.148 + 0.00493 \cdot w_{H_2O} \text{ W/m}^\circ\text{C} \quad (7)$$

Donde: w_{H_2O} % de Humedad

La ecuación de Sweat se utiliza para frutas y hortalizas con contenidos de humedad por arriba del 60% (*Charm, 1981*). Otros autores utilizaron la misma ecuación para sus respectivos trabajos de correlación entre la transferencia de calor y de masa en el secado por congelación, y para el estudio de congelación a vacío por microondas, ya que es necesario el uso de la conductividad térmica para obtener el flujo de calor por que el mecanismo de transferencia de calor se da por conducción, para efectos de este estudio se construirá un gráfico de conductividad térmica con respecto al tiempo para llevar a cabo un mejor análisis. (*Farid, 2003*).

7. Difusividad Térmica.

Para conocer el coeficiente de difusividad térmica fue necesario realizar la determinación del número de fourier, ya que a través de este, se estudia la velocidad de conducción de calor a través de un cuerpo por unidad de sección transversal, esto favorece el manejo de diferentes espesores en el experimento, después de la obtención de este número se realizo un gráfico en donde se obtuvo el inverso de la pendiente.

$$Fo = \alpha t / l^2$$

8. Flujo de calor.

Con el fin de determinar el flujo de calor, fue necesario el registrar temperaturas con respecto al tiempo, para lo que se utilizaron termopares validados de cobre-constantan tipo T con un rango de temperatura de -200 a -400°C . Las temperaturas se obtuvieron en la superficie del material y se correlacionaron con la pérdida de agua (sublimada) durante el proceso.

Se determino el flujo de calor por conducción considerando la ecuación de Fourier $q_0 = \alpha \nabla^2 dT$ (kJ/h m^2), para calcular el flux de sublimación.

Mediante la ecuación empírica de *Lamb (1976)* se establece que el calor latente de sublimación está influido por el contenido de humedad del alimento (*Lewis, 1993*):

$$\Delta H_{\text{sub}} = 335(\text{Humedad}) \text{ (kJ/kg)} \quad (8)$$

Esta ecuación se usa ya que en el secado por congelación a vacío la transferencia de calor a través de la capa del producto congelado es por conducción; se ha utilizado para el desarrollo y validación de modelos de transferencia de calor en zanahorias rebanadas a diferentes espesores 1, 2, 3 mm. (*Datta, 2001*).

Posteriormente se determina el flux de sublimación mediante la siguiente ecuación:

$$W = q_0 / \Delta H_{\text{sub}} \text{ kJh}^{-1} / \text{kJkg}^{-1} = \text{kg/h} \quad (9)$$

Esta ecuación se ha utilizado bajo condiciones de temperatura de sublimación de 0°C hasta -20°C y un vacío de 10⁻⁴ a 10⁻⁵ atmósferas, para una cantidad máxima de 30% de humedad después del secado por congelación a vacío (*James, 2001*).

En esta ecuación se simplifica la expresión para determinar el flux de sublimación a través de la capa del producto congelado ignorando la transferencia de calor por convección y radiación, sólo resaltando la conducción del producto. Posteriormente se construyó un gráfico de flux de sublimación con respecto al tiempo que permitió ampliar el análisis. Además también se utilizó el método estadística, desviación estándar.

9. Relación del número adimensional.

Finalmente se realizó el cálculo del coeficiente de difusividad térmica para llevar a cabo la relación del número adimensional de Lewis donde indica la relación existente de transferencia de calor y masa (*Treybal, 1998*).

Capítulo III. TRATAMIENTO DE DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

3.1. Pérdidas de humedad por sublimación.

En la tabla 1, se muestran los resultados obtenidos en relación con la pérdida de humedad de las muestras de zanahoria y papa, sometidas a sublimación a condiciones de vacío de 60 cmHg y una presión absoluta de 0.0197 atm. Esto garantiza la sublimación ya que la presión de vapor del hielo en el alimento se obtuvo de 4.217 Torr, lo que equivale a 0.4217 cmHg, 562.22 Pa y 0.0055 atm. Estos valores se encuentran por debajo del punto triple de 0.01°C y 611 Pa.

Las condiciones de sublimación se establecen en función del vacío ya que contribuye a reducir los riesgos de fusión del hielo al ser la presión en la cámara directamente proporcional a la temperatura necesaria para que se lleve a cabo el secado por congelación a vacío.

La siguiente tabla presenta los contenidos de humedad en base seca que se obtuvieron durante toda la primera etapa de secado a los diferentes intervalos de tiempo con estos datos se realiza la cinética de secado.

Tabla 1: *Contenido de humedad para papa y zanahoria.*

Espesor(cm)	Tiempo(min)	M zanahoria (kg agua/kg s.s.)	M papa (kg agua/kg s.s.)
0.6	20	0.1799	0.0324
	40	0.1451	0.0118
	60	0.1127	0.0088
	80	0.0743	0.0082
0.4	20	0.0956	0.0339
	40	0.0909	0.0233
	60	0.0889	0.0212
	80	0.0869	0.0141
0.2	20	0.0441	0.0224
	40	0.0410	0.0177
	60	0.0334	0.01649
	80	0.0267	0.01404

La figura 6 muestra el contenido de humedad de la zanahoria y papa a 0.2, 0.4 y 0.6 cm de espesor en función del tiempo. Es evidente que a medida que el proceso avanza el contenido de humedad de las muestras va disminuyendo, lo cual es consecuencia del proceso de secado por congelación a vacío que se lleva a cabo. El contenido de humedad en las muestras de zanahoria a un espesor de 0.6 cm muestra pérdidas más grandes de humedad alcanzando 0.1 kg agua / kg de sólido seco, lo que significa pérdidas mayores respecto a las muestras de 0.2 que tuvieron pérdidas de 0.015 kg de agua/ kg de sólido seco lo que indica que tardará más tiempo en secarse un alimento de mayor espesor y masa que uno de menor. Es decir, el tiempo de secado es directamente proporcional al espesor del alimento a secar, ya que el agua disponible para el secado en un espesor pequeño es menor, lo que permite reducir los tiempos de secado.

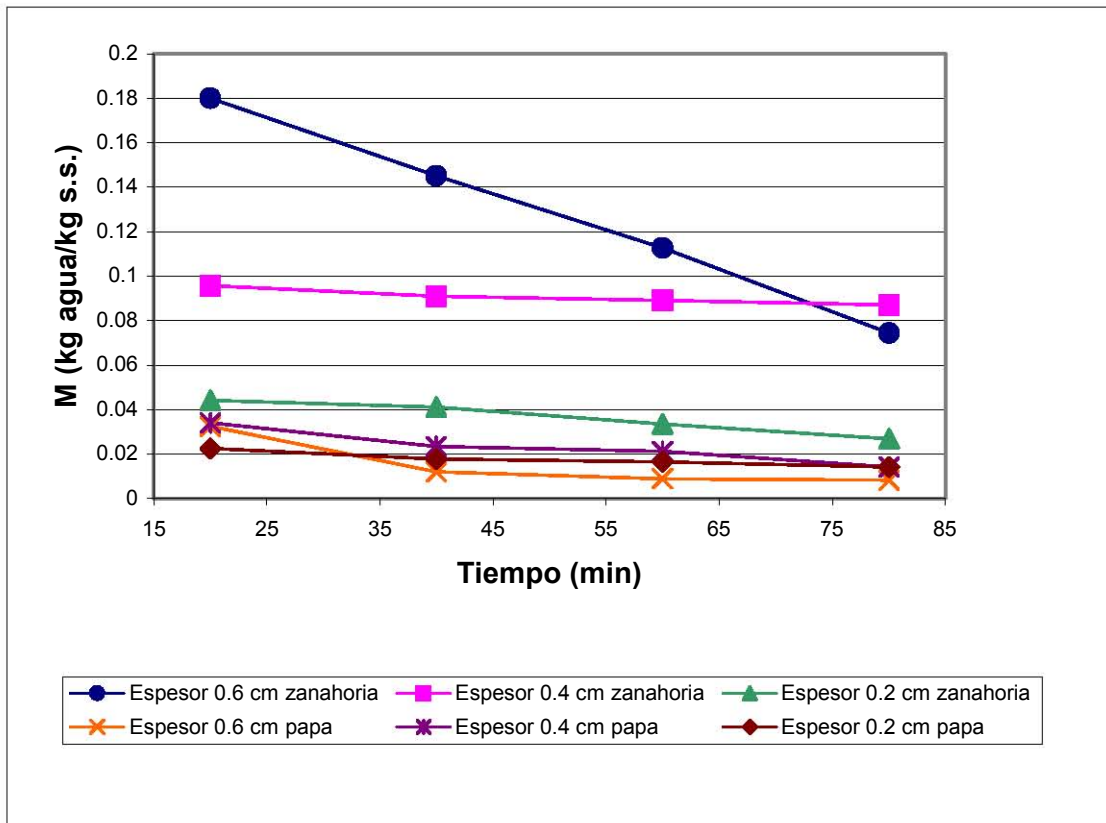


Figura 6: Pérdida de humedad durante el secado en zanahoria y papa.

En el caso de la papa a un espesor 0.6 cm, presenta pérdidas de 0.022 kg de agua/ kg de sólido seco, por otro lado para el espesor de 0.2cm se tuvieron pérdidas de 0.0173 kg de agua/ kg de sólido seco, lo que indica que el contenido de almidón en la papa influye, ya que su estructura esta compuesta por dos polisacáridos; amilosa y amilopectina los cuales retiene cierta humedad, cuando el espesor y la masa inicial son grandes se incrementa la cantidad de almidón, y por lo tanto se tiene una mayor desprendimiento de humedad y a partir de los 60 minutos en este espesor el agua que se esta retirando no es nada más agua libre sino también agua ligada, esto es debido a su cantidad de almidón la cual permite que además de porosa se deshidrate de manera que al momento de sacarse se puede observar el polvo.

Estos resultados coinciden con lo publicado por Srikiatden y Roberts, que realizaron un secado por convección utilizando velocidades de aire de 1.5 y 3 m/s, temperaturas de 50 y 70 °C presentando pérdidas de humedad constantes a partir de los 120 minutos de secado, debido a que se realiza un secado convencional, sin embargo la cantidad de humedad perdida respecto al tiempo es mayor en zanahoria que en papa, por otro lado Krokida y Maroulis, sin realizaron un estudio de secado a diferentes espesores en donde se observa una tendencia similar ha este estudio, ya que en espesores mayores de zanahoria las pérdidas de humedad son mayores en los primeros minutos, sin embargo ellos requirieron de mayor tiempo para alcanzar el período constante.

3.2. Coeficientes de difusividad másica.

En la tabla 2, se muestran los resultados, para el tratamiento de datos de acuerdo con la ecuación 5, en donde se observa el coeficiente de difusividad másica en los diferentes espesores de zanahoria, se tiene que en el espesor mayor 0.6 cm, el coeficiente de difusividad es de $8 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, debido a que la cantidad de humedad libre es muy grande y con esto se consigue mantener la sublimación eliminado humedad de los conductos mas internos

del material; sin embargo, la distancia que tiene que recorrer el flujo de vapor desde el interior del material hasta el frente de sublimación es mayor que para las otras dos muestras, debido a esto no se elimina toda la humedad.

Tabla 2. Coeficientes de difusividad másica.

Espesor (cm)	D_{eff} Zanahoria (m^2/s)
0.6	8×10^{-9}
0.4	7×10^{-10}
0.2	4×10^{-10}

Sin embargo, en el espesor de 0.2 cm se consiguió eliminar casi toda la humedad disponible para la sublimación, a pesar de que el coeficiente de difusividad es de $4 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ya que la distancia que tenía que recorrer la humedad hasta el frente de sublimación es menor con respecto al espesor 0.6 cm, esto se puede ver observar en la figura 7 que muestra el efecto del espesor del material sobre la difusividad másica, y al ser sometidas a las mismas condiciones de secado se ve reflejado en la cantidad de masa eliminada en forma de vapor.

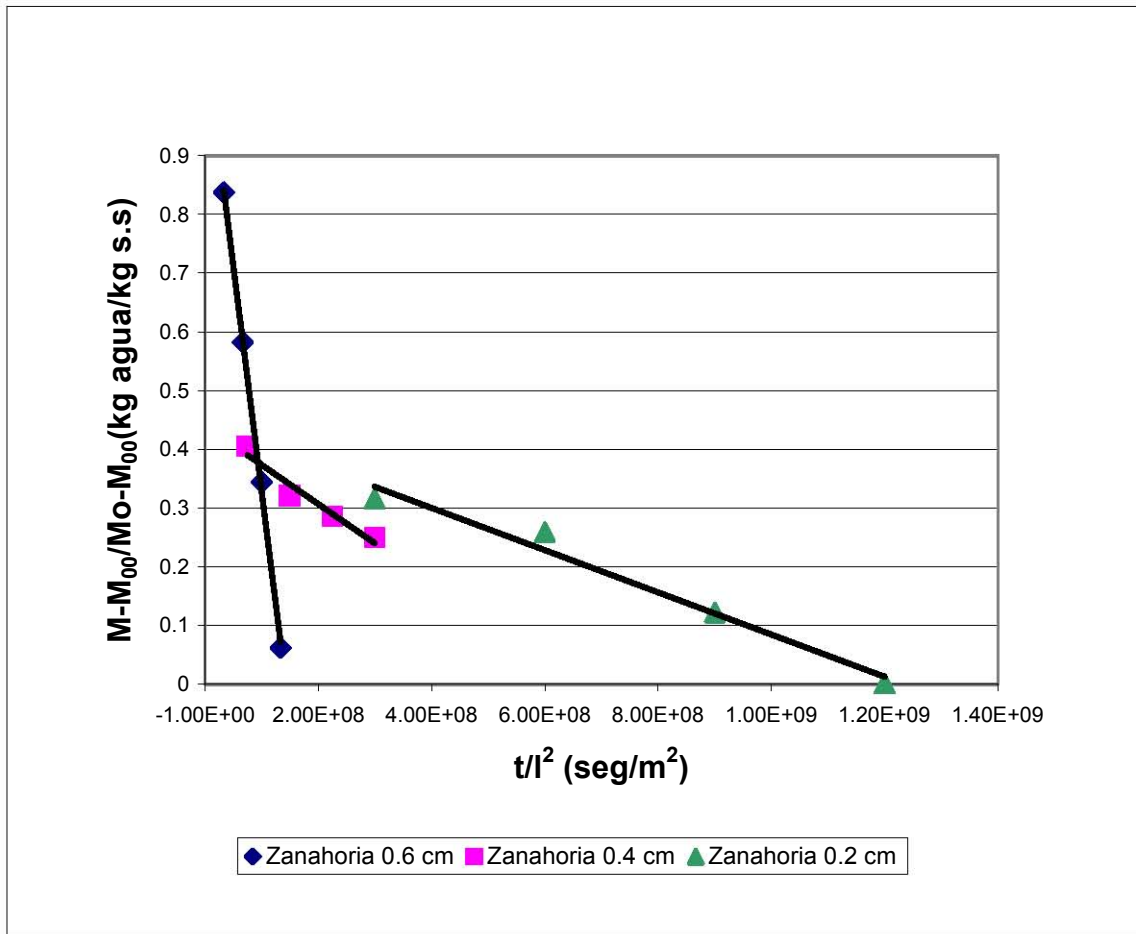


Figura 7: Coeficiente de difusividad másica en zanahoria a diferentes espesores.

En la papa se puede observar un comportamiento muy similar en los resultados obtenidos de coeficientes difusividad másica en los espesores 0.4 y 0.6 cm, a diferencia del espesor 0.2 cm que muestra un cambio significativo como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 3: coeficientes de difusividad másica.

Espesor (cm)	D_{eff} papa (m ² /s)
0.6	2×10^{-9}
0.4	2×10^{-9}
0.2	5×10^{-10}

En la tabla 3 se muestran los coeficientes másicos obtenidos de la figura 8, para el tratamiento de datos de acuerdo con la ecuación 5, en donde se observa el efecto del espesor del material sobre la difusividad másica, se tiene que en los espesores 0.4 y 0.6 cm, el coeficiente de difusión es de $2 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, debido a que fueron previamente escaldadas antes de ser congeladas, lo que provoca una pre-gelatinización de los almidones que constituyen parte esencial de la estructura de la papa generando retención de humedad, en un espesor de 0.2 cm se tiene un coeficiente de difusión de $5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ esto se debe a que existe una mayor gelatinización de los almidones retardando la velocidad de eliminación de agua en forma de vapor, es por esto que existe una diferencia considerable respecto a los otros espesores

Según los resultados obtenidos por Srikiatden y Roberts, el coeficiente de difusividad en espesores (0.7 y 1.4 cm) oscila entre 5.9 y $9.6 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ utilizando temperaturas de 50 y 70°C , las difusividades obtenidas en la experimentación van de 5×10^{-10} a $2 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ en el espesor mayor, lo que indica en el caso de papa la utilización de vacío generado en la cámara favorece en mayor grado la difusividad que utilizar un secado por convección, en el caso de la zanahoria sucede algo similar y con mejores resultados ya que se alcanzan difusividades de $8 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$.

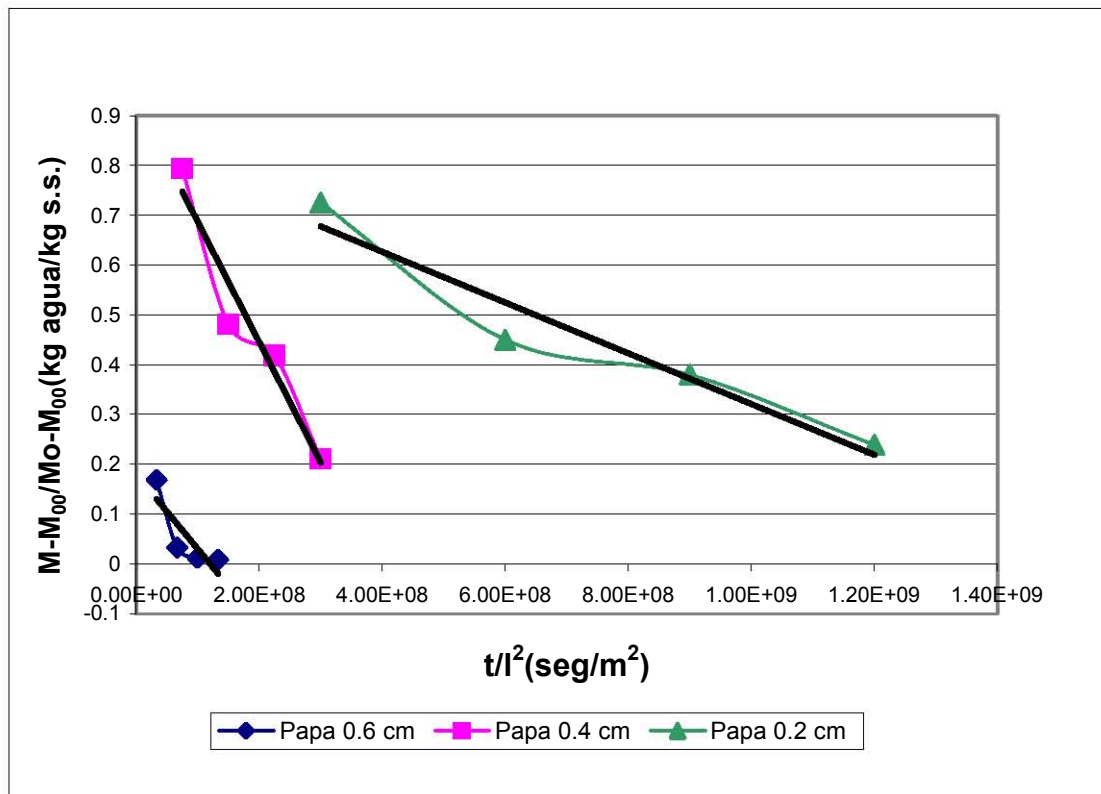


Figura 8: Coeficiente de difusividad másica en papa a diferentes espesores.

3.3. Conductividad térmica.

En este caso, tanto en papa como zanahoria la conductividad térmica disminuye notablemente con respecto al tiempo del proceso, esto se atribuye principalmente a factores como la naturaleza del material a secar. *Charm, 1981*, reporta que otro factor que también afecta es la presión en la cámara, que es particularmente importante en el secado por congelación a vacío, lo cual provoca la disminución de la conductividad térmica y, por tanto, que disminuya la transferencia de calor durante el proceso. A pesar de que los datos no cambian significativamente, en papa se presentan una mayor disminución de la conductividad térmica obteniendo valores de hasta 0.2431 los cuales se contrastan con los resultados de Farid y Butcher, que realizaron estudios en papa dando como resultados de entre 0.001 y 0.55 W/m °K.

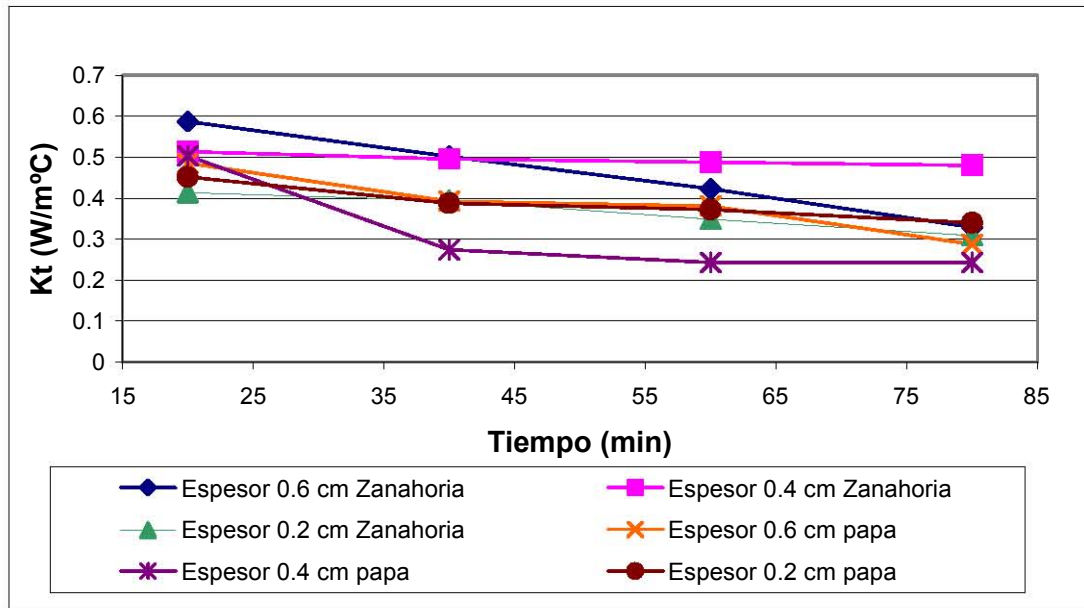


Figura 9: Conductividad térmica contra tiempo en papa y zanahoria.

3.4. Coeficientes de difusividad térmica.

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos de difusividad térmica los cuales se obtienen del gráfico de número de Fourier como se puede observar los valores de difusividad térmica más bajos se dieron en los espesores de 0.6 cm y 0.4 cm tanto en papa como en zanahoria, es importante mencionar que la transferencia de calor se da simultáneamente con la másica aunque en la térmica se da en menor proporción es necesario conocer la velocidad de conducción del calor a través de un sólido en el que existe una diferencia de temperatura conocida.

Tabla 4: Coeficientes de difusividad térmica.

Espesor (cm)	α zanahoria (m ² /s)	α papa (m ² /s)
0.6	2.4×10^{-10}	1.4×10^{-11}
0.4	3×10^{-11}	1.7×10^{-11}
0.2	3.1×10^{-11}	2.0×10^{-13}

En la figura 10 se puede observar como la difusividad térmica es mayor durante los primeros veinte minutos en los tres diferentes espesores y a

medida que pasa el tiempo empieza a disminuir, se puede decir que el material al inicio del proceso facilita la transferencia de calor, debido a que los componentes del material no han sido alterados, principalmente el contenido de humedad ya que el coeficiente de difusividad térmica aumenta o disminuye según la presencia de este componente y como al paso del tiempo esta disminuye se ve reflejado en una disminución de la difusividad, por otro lado el número de Fourier introduce la sección transversal de los cuerpos para determinar la velocidad con la que se conduce el calor, es por ello que el coeficiente mas grande se da en el espesor 0.2 ya que el la distancia que tiene que recorrer el flujo de calor es menor que para los otros dos espesores, y se facilita llegar al estado estacionario en el que la temperatura en cada punto del alimento no varía considerablemente con el tiempo.

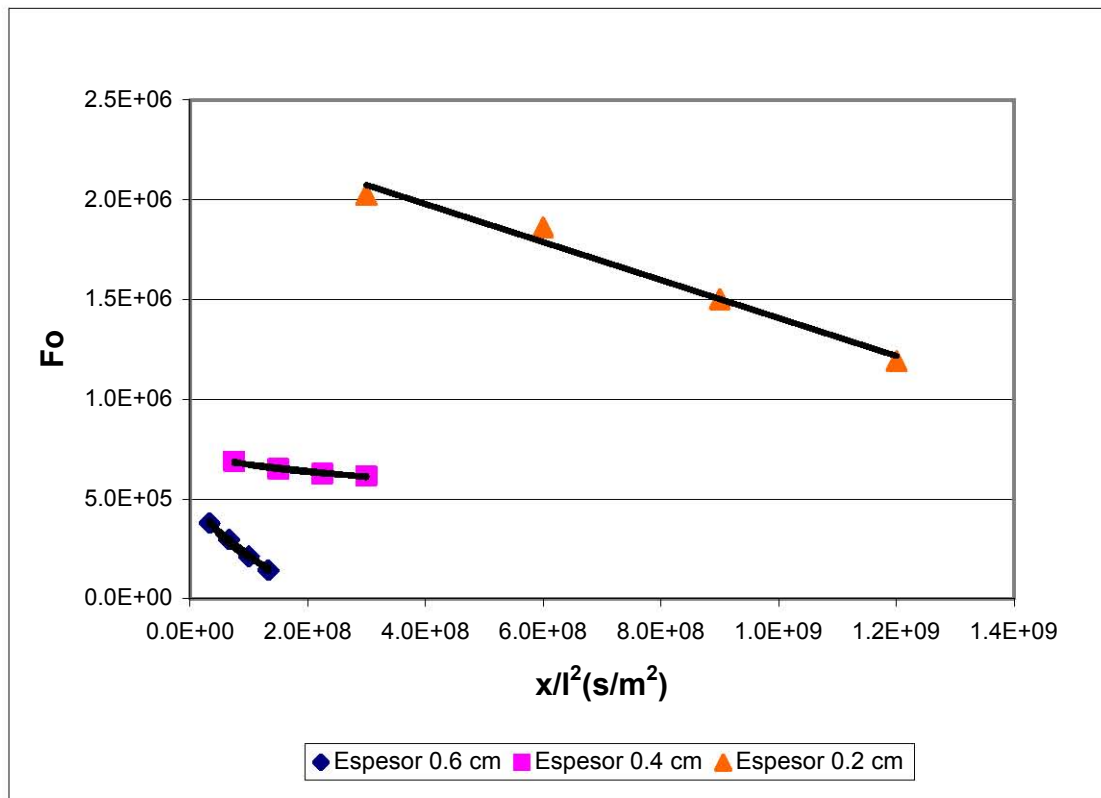


Figura 10: Coeficiente de difusividad térmica en zanahoria a diferentes espesores.

En la figura 11 se observa el comportamiento de la difusividad térmica, y como se espera teóricamente, es mayor a espesores pequeños, lo cual se

asume a las características del material (*Badui, 1993*), debido a que para la difusividad térmica influye en gran medida la estructura por el alto contenido de almidón que al ser sometido a al vacío comienza su retrogradación y desprende humedad que al ser retirada comienza el decremento para todos los casos, sin embargo se ve un coeficiente de difusividad más elevado a menores espesores debido a que la distancia que tiene que recorrer el calor para difundirse a través de toda la sección transversal es menor.

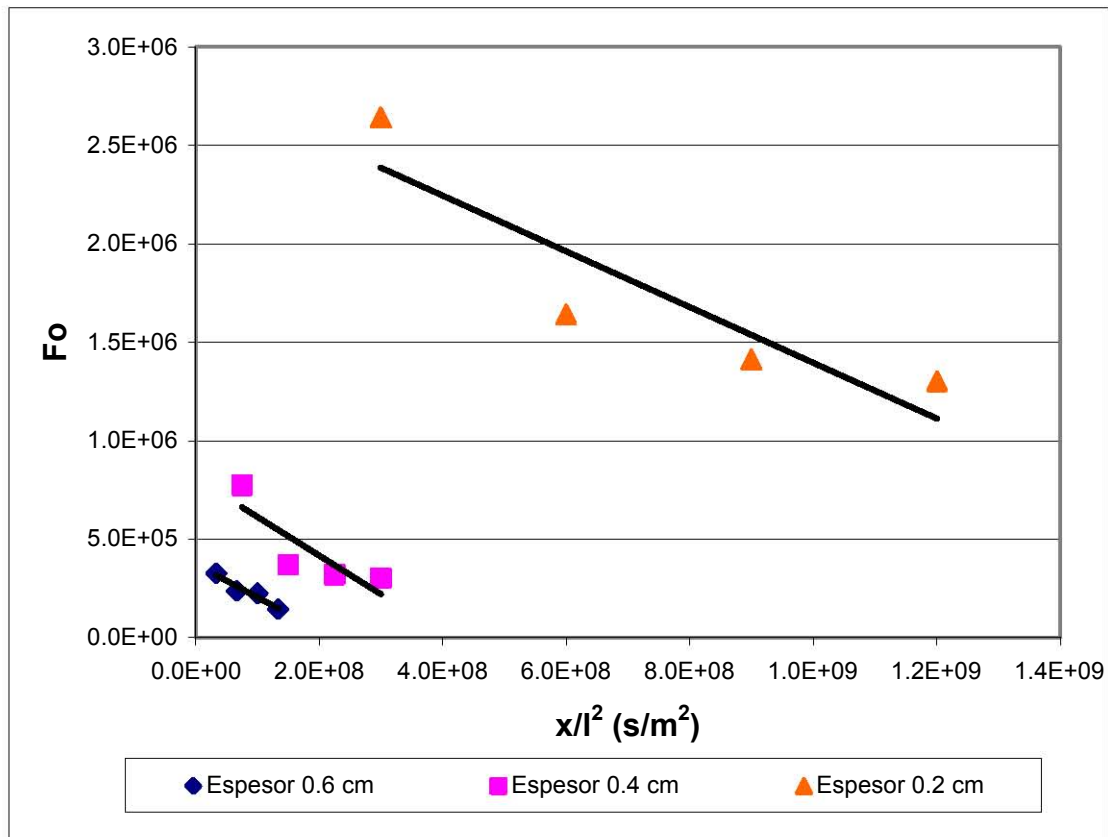


Figura 11: Coeficiente de difusividad térmica en papa a diferentes espesores.

3.5. Flux de sublimación.

En la figura 12 se muestra que en la papa se presenta un flux de sublimación mayor para cada uno de sus espesores, conforme transcurre el tiempo, el flux de sublimación va aumentando a menor espesor, esto se debe a que el área que tiene que recorrer el vapor de agua desde el interior del alimento hasta el frente de sublimación es menor, esto quiere decir que

las dimensiones del material forman parte esencial del comportamiento del flux de sublimación.

Es evidente que el espesor del material a liofilizar influye directamente sobre el flux con el que se elimina por sublimación el agua congelada, debido a que el espesor afecta de manera inversa al flujo de calor, es decir, a mayor espesor, el flujo de calor disminuye.

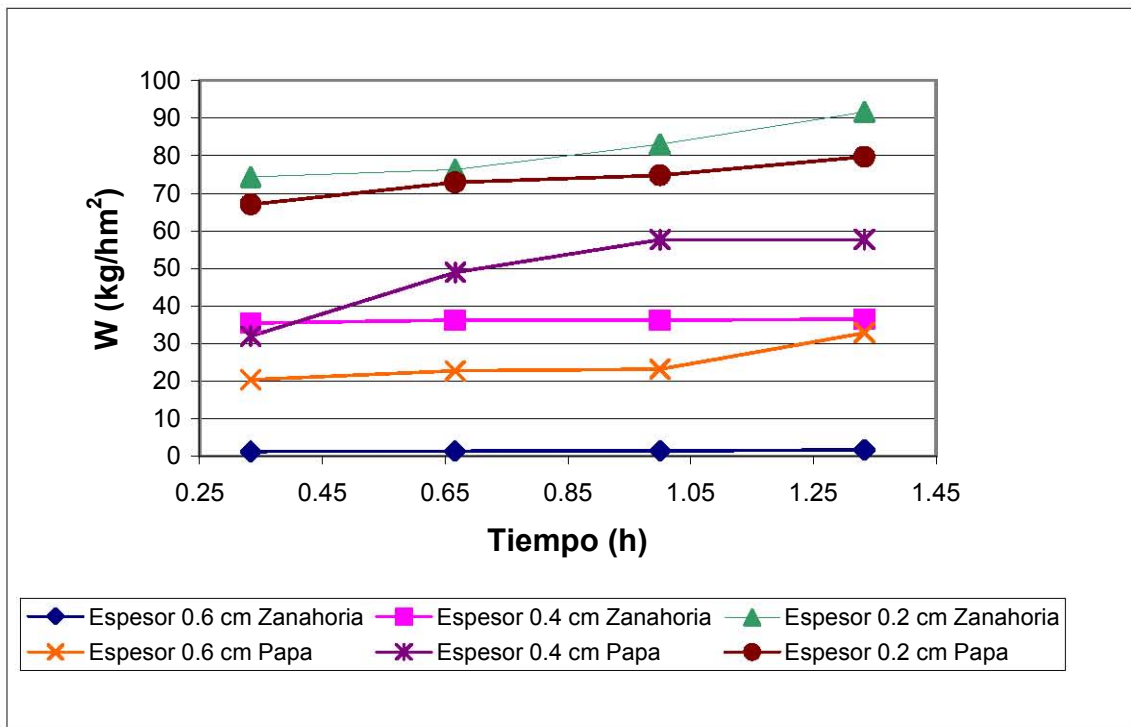


Figura 12: Flux de sublimación contra tiempo en papa y zanahoria a diferentes espesores.

3.6. Relación del Número adimensional de Lewis.

Tabla 6. Número de Lewis para zanahoria y papa.

Espesor	N _o de Lewis papa	N _o de Lewis zanahoria
0.6 cm	0.007	0.03
0.4 cm	0.0085	0.04
0.2 cm	0.0004	0.077

En la tabla 6 se presenta la relación existente de transferencia de calor y masa mediante el número adimensional de Lewis, el cual indica que las pérdidas de humedad sufridas por el alimento durante el secado por congelación a vacío se dan para todos los casos debido a la transferencia de masa, ya que los números de Lewis obtenidos son muy pequeños; sin embargo, se nota una diferencia más significativa en papa donde se tiene un promedio del 99.35 % del total de la transferencia debido a la transferencia de masa, ya que las propiedades intrínsecas de la papa se modifican en mayor grado durante el escaldado donde los almidones llegan a pregelatinizarse, por lo que el vacío durante la liofilización genera una pulverización de estos, lo que provoca que la transferencia de calor fuera más complicada ya que se necesitaban temperaturas más elevadas para facilitar la transferencia y al no utilizar la placa calefactora no se genera las condiciones adecuadas. Por otro lado la mayor cantidad de humedad libre disponible en la zanahoria permitió transferir calor con mayor facilidad que en papa, sin llegar a ser la fuerza impulsora de la sublimación, ya que se obtuvo un 95 % promedio del total de la transferencia esto debido principalmente a la transferencia de masa, sin embargo si se observa un incremento de la difusividad térmica lo que se ve reflejado en números de Lewis un poco más grandes con respecto a papa.

El número de Lewis permite determinar que predomina la transferencia de masa y se tienen números muy pequeños debido a que no se utilizó la placa calefactora y el diferencial de temperaturas entre la placa y el alimento es casi despreciables, lo que se traduce en un proceso en donde la transferencia total del sistema se da en suma mayor parte por los fenómenos de transferencia de masa generados al disminuir la presión que resulta ser la fuerza impulsora de mayor impacto para que se de el secado por congelación a vacío.

CONCLUSIONES

La zanahoria no presentó diferencia significativa entre los diferentes espesores de las muestras, relación a los coeficientes de transferencia de calor y masa, sin embargo durante el proceso hubo dominio de la transferencia de masa sobre la de calor, lo que favoreció la sublimación de agua contenida en el alimento.

En el caso de papa, debido a que no se utilizó la placa calefactora se dificultó en mayor grado la transferencia de calor y fue más evidente el predominio de la transferencia de masa debido a que los almidones se retrogradan durante su exposición al proceso, y al ser un producto con menor cantidad de humedad libre se limita la transferencia de calor, por ello es favorable utilizar espesores mayores para favorecer la sublimación.

Es importante decir que el secado por congelación a vacío sin el uso de la placa resulta viable a espesores más grandes ya que la humedad libre es mayor y esta se retira principalmente por transferencia de masa y no por transferencia de calor donde lo que se requiere es acortar la sección transversal del material para equiparar de manera rápida la temperatura en el material.

El secado por congelación a vacío sin el uso de la energía de la placa calefactora es un proceso que resulta adecuado para retirar humedad en papas y zanahorias a espesores mayores a 0.4 cm ya que se elimina una cantidad considerable de humedad con respecto a otros métodos de secado y si a esto se le suma que no se utilizan temperaturas elevadas, se tiene un proceso en donde no se afectan las propiedades del alimento, en mayor grado que en un proceso en donde se añade radiación y además se le confiere porosidad que favorece la rehidratación del alimento.

Simbología

T_e = Temperatura externa del gas en °C.

T_s = Temperatura de la superficie del sólido seco en °C.

T_f = Temperatura del plano de sublimación o capa congelada °C.

T_1 = Temperatura de referencia °C .

$(l_2 - l_1)$ = Espesor de la capa seca (m).

P_{sw} = Presión parcial de Vapor de agua en la superficie (Pa).

P_{fw} = Presión de vapor de la superficie del alimento. (Pa).

P_{ew} = Presión en la cámara (Pa).

M_0 = Humedad Inicial. (kg agua/ kg solido seco)

M = Humedad final. (kg agua/ kg solido seco)

M_∞ = Humedad en el equilibrio. (kg agua/ kg solido seco)

D_{eff} = Difusividad Efectiva (m^2/s).

N_{Le} = Número adimensional de lewis.

N_{Fo} = Número de Fourier.

W_{H_2O} = %Humedad (base humeda)

MR = Relación de humedades.

ρ = densidad del flujo de vapor de agua (kg / m^3).

ΔH_s = Calor latente de sublimación (kJ/kg).

k_T = Conductividad térmica del sólido seco ($W/m \text{ } ^\circ C$).

q_o = flujo de calor (kJ/hm^2).

C_p = Calor específico ($J \text{ } kg^\circ K$).

h = Coeficiente externo de transmisión de calor por convección (W/m^2).

α = Coeficiente de difusividad térmica (m^2/s).

t = Tiempo (min), (seg) (hrs)

x = Posición del frente de sublimación

l = Espesor (m).

BIBLIOGRAFÍA

1. Alvarado, J. (2001) Métodos para medir propiedades físicas en la industria de alimentos. Acribia. España.
2. Arthey, D. (1992) Procesado de Hortalizas. Acribia. España
3. Badui S. (1993) Química de Alimentos. Pearson Educación, tercera edición, México.
4. Barbosa, G. (2000) Deshidratación de los alimentos. Acribia. España.
5. Black, W. (1991) Termodinámica. CECSA. México.
6. Charm (1981) Fundamentals of Food Engineering. The Avi Publishing Company, Inc. Tercera edición USA.
7. Cheng J., Yang R. Z., Chen Q. H. (2002) *Analytical solutions for the moving interface problem in freeze-crying with or without back heating*. Drying Technology, Vol. 20, pag. 553-367.
8. Crank J. (1975) "The mathematical of diffusion", Oxford, USA.
9. Dalgleish. (1990) Freeze-drying for the Food Industries. Elseiver Applied Scince. New York.
10. Farid M. A (2003) *Generalized correlation for heat and mass transfer in freezing, crying, frying and freeze drying*. Drying Technology. Vol. 21, pag. 231-247.
11. Fellows, P. (1994) Tecnología del procesado de los alimentos: *Principios y prácticas*. Acribia. España.
12. Galo Miño Franco (2000) Congelación IQF (Ignacio Pérez Arteta) 15-10 www.agrofrío.tripod.com.
13. Geankoplis. (1998) Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias. Tercera edición. CECSA. México.
14. Goldblith. (1975) Freeze Drying and advanced of Food Technology. Academic Press. New York.
15. Grosch, W. (1992) Química de los alimentos. Segunda edición, editorial Acribia. España.
16. Hall, C. (1986) Encyclopedia of Food Engineering, Segunda edición. Westport, connecticuto.

17. Helman, J. (1981) *Farmacotecnia Teórica y práctica*. Tomo III. Cía. Continental, S. A. De C. V. México.
18. Hongwei W., Zhi T., Guohua C. (2004) *Conjugate heat and mass transfer process within porous media with dielectric cores in microwave freeze drying*. *Journal of Food Engineering*. 59:2921-2928.
19. James, G. (2001) *Development and validation of heat and mass transfer models for freeze drying of vegetable slices*. *Journal of Food Engineering* 52: 89-93.
20. Krokida M, Maroulis B. (1998) *Efecto de las condiciones de liofilización sobre la reducción y porosidad de productos agrícolas deshidratados*. *Journal of Food Engineering* 20:1-18.
21. Lewis. (1993) *Propiedades físicas de los alimentos y de los sistemas de procesado*. Acribia. España.
22. Litvin. S & Milt J. (1997) *Deshidratación de zanahorias por liofilización y calor por microondas*. *Journal of Food Engineering* 59:274-281.
23. Loch-Bonazzi C., Wolff E. & Gilbert H. A (1992) *Comparison Between Different Drying and Freeze-Drying Processes*. *Lebensmittel Wissenschaft und- Technologie* 25, 334–339.
24. Mafart, P. (1994) *Ingeniería Industrial Alimentaria. Procesos Físicos de conservación*. Vol. 1. Acribia. España.
25. Marisell Navarro Alfano : *Liofilización de productos farmacéuticos* (Marisell Navarro Alfano) 10-06-1998. www.bvs.sld.cu/revistas/sint/vol4_1_98/sint5198.htm.
26. Matteo D. (2002) *The role of heat and mass transfer phenomena in atmospheric freeze-drying of foods in a fluidized bed*. *Journal of Food Engineering*. 59:267-275.
27. Mellor. (1978) *Fundamentals of Freeze-Drying*. Academic Press. New York USA.
28. Ratti. C (2001) *Hot air and Freeze-drying of high – value foods*. *Journal of Food Engineering*. 49:311-319.

29. Sanz P.D., Martino M., Zaritzky N., Otero L. & Carrasco J.A. (1999) Freezing rate simulation as an aid to reducing crystallization damage in foods. *Meat Science* 52: 275-278.
30. Singh P, Dennis R. (1998) *Introducción a la ingeniería de los alimentos*. Editorial Acribia, Zaragoza.
31. Srikiatden J, Roberts J, (2003) *Moisture transfer in potato, apple and carrot (core and cortex) during convective hot air and microwave-convective hot air drying*. *Journal of Food Engineering*. Vol. 29, pag 2456-2471.
32. Treybal R. (1998) *Operaciones de Transferencia de Masa*. Segunda edición. Mc Graw – Hill. México.
33. Tscheuschner Horts-Dieter (2001). *Fundamentos de Tecnología de los Alimentos*. Editorial Acribia España.