



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLAS DE HIDALGO**



**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA QUÍMICA**

TESIS

**“MODELAR Y SIMULAR LA LIOFILIZACIÓN
DEL AGUACATE HASS”**

Que presenta:

ING. XIOMARA ALEJANDRA MADRIGAL MEDINA

Para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA QUÍMICA

Morelia, Mich. Febrero 2008

RESUMEN

MODELAR Y SIMULAR LA LIOFILIZACION DEL AGUACATE HASS

Por

Xiomara Alejandra Madrigal Medina

Febrero del 2008

Maestro en Ciencias en Ingeniería Química

Dirigida por: Dr. Luis Ignacio Salcedo Estrada

Coasesor: Dr. Agustín Castro Montoya

En la actualidad el cultivo de aguacate ha cobrado tanto interés que los países productores en el mundo suman ya 46. México produce mas del 60% de la producción mundial de aguacate; sin embargo, solo exporta un 2.7 % de la producción nacional. La utilización de la liofilización como un método de conservación del aguacate se debe a que los diferentes métodos que se utilizan en la actualidad no son aplicables a este fruto ya que, por su alto contenido vitamínico sufre deterioros que son irreversibles, además de que su alto contenido de agua en su estructura (del 60 al 70 %) permite la utilización de este método. Un modelo matemático de un proceso es un sistema de ecuaciones cuya solución, introduciendo datos específicos, es representativa de la respuesta del proceso. En este trabajo se desarrollo un modelo matemático para la liofilización del Aguacate Hass, se obtuvieron datos experimentales a 2 horas, 4 horas y 6 horas y se uso una muestra de 1 cm de espesor, en cada tiempo se realizaron tres experimentos, calculando los valores de las variables que interviene en este modelo a partir de datos experimentales, la cantidad de agua retirada represento un 62% de la muestra original, obteniendo un producto seco que es fácil de conservar y transportar. Al comparar los resultados obtenidos con el modelo matemático y los obtenidos experimentalmente se observa que la desviación que se tiene es menor al 4%, determinando de esta forma que la principal variable que afecta la liofilización es el tiempo de liofilización.

INDICE

Resumen	iii
Lista de tablas	v
Lista de figuras	vi
Nomenclatura	vii
Agradecimientos	ix
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Generalidades	1
1.1.1 Características de la Liofilización	5
1.1.2 Ventajas de la Liofilización	5
1.2 Objetivo	5
1.3 Justificación	6
1.4 Alcance	7
Capítulo 2. Marco Teórico	9
2.1 Proceso de Liofilización	9
2.2 Métodos de Conservación de Alimentos	9
2.3 Principios Fisicoquímicos de la Liofilización	12
2.4 Diagrama del Punto Triple	14
2.5 Usos de la Liofilización	16
2.6 Modelos Matemáticos Propuestos	16
Capítulo 3. Metodología	25
3.1 Equipo de Liofilización	25
3.2 Técnica para la Liofilización	26
Capítulo 4. Resultados	27
4.1 Resultados Experimentales	27
4.2 Análisis Estadístico	28
4.3 Modelo Matemático Propuesto	30
4.4 Solución del Modelo Matemático	34
Conclusiones	43
Recomendaciones	45
Bibliografía	46

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1.1 Contenido Vitamínico del Aguacate	3
Tabla 1.1.2 Aporte de Minerales del Aguacate	4
Tabla 1.1.3 Contenido de otros Elementos en el Aguacate	4
Tabla 3.2.1 Diseño de Experimentos.	26
Tabla 4.1.1 Resultados Experimentales	27
Tabla 4.1.2 Resultados Experimentales Promedio	28
Tabla 4.2.1 Masa final / Masa inicial	28
Tabla 4.2.2 Porcentaje de Agua Retirada	29
Tabla 4.4.1 Volumen y Espesor Equivalente de la Capa Seca	36
Tabla 4.4.2 Cálculo del espesor de la Capa Seca	37
Tabla 4.4.3 Densidad del Aguacate	37
Tabla 4.4.4 Solución del Modelo Matemático	39
Tabla 4.4.5 Valores de C_A calculados.	39
Tabla 4.4.6 Valores de C_A calculada y valores de C_A experimentales.	40
Tabla 4.4.7 Valores Experimentales y Calculados	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.1	Aguacate Hass	4
Figura 2.3.1	Muestra de Aguacate Liofilizándose	14
Figura 2.4.1	Diagrama de Fases del Agua	14
Figura 2.4.2	Diagrama de Fases Aplicado al Aguacate	15
Figura 2.6.1	Diferentes Tipos de Transferencia de Calor	17
Figura 2.6.2	Flujo de Calor y Masa	19
Figura 3.1.1	Liofilizador	25
Figura 4.2.1	Fracción de Masa Seca a través del Tiempo	29
Figura 4.2.2	Cantidad de Agua Retirada	30
Figura 4.3.1	Diagrama Propuesto	31
Figura 4.4.1	Espesor de la Capa Seca	36
Figura 4.4.2	Comparacion de Resultados para C_A	41

NOMENCLATURA

Variables

A	Área de sublimación (cm^2)
C	Concentración (g/cm^3)
D	Difusividad (cm^2/s)
G(t)	Flujo de vapor de agua
h	Altura (cm)
h_{eq}	Altura equivalente (cm)
k_g	Coefficiente externo de transferencia de masa
K_p	Permeabilidad del vapor de agua
L	Espesor de la placa (cm)
M	Masa de la muestra (g)
M_w	Peso molecular del agua (g/mol)
N	Flujo de vapor de agua
n	Flujo de vapor de agua
P	Presión (atm)
R	Constante universal de los gases ($\text{l atm}/\text{mol K}$)
r	Radio (cm)
S	Área superficial (cm^2)
T	Temperatura media de la capa seca ($^{\circ}\text{C}$)
V	Volumen de la muestra (cm^3)
V_{eq}	Volumen equivalente (cm^3)
W	Concentración de humedad (g)
x	Dirección del transporte
Z	Dirección del transporte

Subíndices

0	Inicial
A	Vapor de agua
B	Aguacate
c	Capa congelada
eff	Efectiva
R	Agua retirada
s	Capa seca

Letras griegas

δ	Espesor de la capa seca
π	Valor 3.1416
ρ	Densidad

AGRADECIMIENTOS

A Dios

Por la vida y sus bendiciones.

A mis padres: Teresa y Arcadio

Por sus cuidados, amor y apoyo.

Los quiero papás.

A mis hermanos: Alfredo y Kristal

Por esos momentos de travesuras
que hemos compartido

A mi esposo: Andres Damian

Por estar ahí cuando lo necesitaba.

A mi Hija: Claudia Damian

Por tolerar mis ausencias y
tomar clases conmigo.

A mis cuñadas: Eloy, Guadalupe y Ángeles

Por su apoyo incondicional.

A mi Asesor: Dr. Luis Ignacio Salcedo Estrada

Por su tolerancia y paciencia.

Por sus enseñanzas .

A mi Universidad:

Por el tiempo que he transitado por
sus pasillos y por todo lo que
en ella he aprendido.

A mis maestros:

Por obsequiarme sus conocimientos
con dedicación y paciencia

A mis compañeras: Bety, Gladis, Eunice y Teo

Por su comprensión y apoyo.

Por su amistad. Mil gracias.

A mis amigos:

Por impulsarme a culminar este proyecto.

A todos aquellos que hicieron posible ESTE SUEÑO.

CAPITULO 1. Introducción

El aguacate u "oro verde" mexicano se encuentra al alza en los mercados internacionales más exigentes como los de Estados Unidos, la Unión Europea y Japón, entre otros países, hacia donde se exporta 20% de la producción nacional. El cultivo del aguacate se concentra en el continente americano. Los países del norte y del centro del mismo contribuyen con 59% de la producción mundial, en tanto las naciones sudamericanas aportan 19%. África y Asia participan con 10 por ciento [1].

El Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa) estima que este año la producción de aguacate podrá superar el millón de toneladas. Además, tiene previsto que el país coloque en los mercados mundiales en la presente temporada de exportación de aguacate, que concluye en este mes de julio aproximadamente 220 mil toneladas del fruto, lo que significará un incremento de 20 mil toneladas con respecto a la temporada 2005-2006, en la cual se enviaron al vecino país del norte 130 mil toneladas de aguacate, 30 mil a Japón, 15 mil a la Unión Europea, 13 mil a Canadá y 12 mil a naciones de Centroamérica, con un valor total de 400 millones de dólares.

1.1 Generalidades del Aguacate

El aguacate es una fruta, que pertenece a la familia de las *Lauraceas* y a las especies *Persea Americana Mill.* Se ha considerado como el centro de origen a las partes altas del centro y este central de México correspondientes a los estados de Nuevo León, Michoacán, Veracruz y Puebla así como en las partes altas de Guatemala y las Antillas.

México mantiene una producción anual de aguacate cercana a un millón de toneladas, con una superficie de casi 100 mil hectáreas y alrededor de 21 mil productores, rubro en el que Michoacán ocupa el primer lugar a nivel nacional con más de 900 mil toneladas. La superficie sembrada de aguacate es de 112 mil 782 hectáreas en 28 estados, sin embargo, Michoacán concentra más de 80 por ciento de la producción del "oro verde". Otros estados que destacan en la producción de aguacate

Introducción

son: Morelos, Nayarit, Puebla, Guerrero y Jalisco, con 32 mil 489, 23 mil 158, 12 mil 785, 12 mil tres y ocho mil 560 toneladas respectivamente.

Michoacán es líder mundial en producción y exportación de esta fruta, ya que el consumidor internacional prefiere aguacates mexicanos por sabor, calidad y frescura sobre los de otras naciones también fuertemente productoras como Chile, Estados Unidos y República Dominicana. Las ventajas que favorecen la producción de aguacate en Michoacán son el clima, suelo y agua, propicios para el desarrollo y cultivo de la fruta, misma que se da en una superficie aproximada de 90 mil hectáreas, de las cuales 70 mil están sembradas a cielo abierto y el resto en invernadero.

Por tratarse de un fruto extremadamente sensible, el aguacate requiere de un preenfriado en las cajas de 400 kilogramos que se utilizan para exportar. El camión debe pasar por una cortina de agua fría de 6 grados centígrados, requiere de especiales cuidados el control aduanero del etiquetado, ya que la veracidad de la información y la certificación de la calidad que ostente el aguacate de exportación responderán al código de prácticas internacionales.

El aguacate se ha convertido en un producto de gran demanda mundial al dejar de ser una fruta exótica para incorporarse en la dieta de varios países. Lo anterior se ha reforzado por la tendencia que se manifiesta en el gusto del consumidor mundial, en el sentido de preferir productos sanos y naturales.

En la Tabla 1.1.1 se muestra el aporte vitamínico del Aguacate en la cual podemos observar los siguientes puntos:

- 1.- Contiene 12 de las 13 vitaminas; la única ausente es la vitamina B12 (ya que ésta se encuentra sólo en el reino animal).
- 2.- Contiene cantidades significativas de todas las vitaminas liposolubles, lo cual lo pone en situación de privilegio respecto al resto de los alimentos vegetales que en su mayoría poseen predominio de algunas y escasez de otras.
- 3.- Aporta vitaminas liposolubles sin colesterol y con mínima cantidad de ácidos grasos saturados.
- 4.- Proporciona vitaminas hidrosolubles en cantidades apreciables, destacándose su contenido en ácido ascórbico.

Introducción

Tabla 1.1.1 Contenido Vitamínico del Aguacate

Vitaminas	Aportación por cada 100 grs. de Aguacate:
D	Más del 100% del requerimiento
E, B6 y C	Cubre más del 20%
Vitamina C	7, 9 mg
Vitamina B1	0, 108 mg
Vitamina B2	0, 122 mg
Vitamina B6	0, 280 mg
Vitamina A	61 IU
Vitamina E	1,340 mg
Folacina	62 mcg
Niacina	1, 921 mg

El aguacate es un alimento rico en potasio y pobre en sodio como lo muestra la Tabla 1.1.2; esta relación es favorable para el descenso de la presión arterial y la disminución de la susceptibilidad a los accidentes vasculares que no dependen de la presión arterial.

En la Tabla 1.1.3 observamos la característica alimentaría principal de este fruto que es su riqueza en aceites que llegan en algunas especies al 30 %, pero que normalmente varían entre un 10 o 15 %. La ventaja de estos aceites es que están formadas por ácidos grasos poliinsaturados (ácidos oleico, linoleico y palmítico, fundamentalmente) por lo que, al igual que ocurre con el aceite de oliva, el pescado azul, el ajo o la manzana, pueden ayudar a aminorar los efectos nocivos de las grasas monoinsaturadas contenidas en los aceites animales. Resulta muy adecuado para evitar la formación de colesterol, reduciendo el riesgo de sufrir enfermedades vasculares, como infartos o hemorragias cerebrales. Igualmente interesante en este sentido resulta su alto contenido en lecitina, necesaria en el metabolismo de las grasas y muy útil en la lucha contra el colesterol y en la prevención de la arteriosclerosis.

Introducción

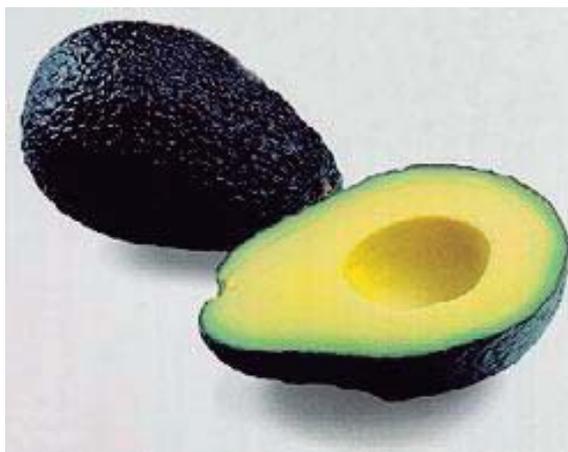
Tabla 1.1.2 Aporte de Minerales del Aguacate

Potasio	600 mg
Sodio	10 mg
Fósforo	41 mg
Calcio	11 mg
Magnesio	39 mg
Cobre	0, 26 mg
Hierro	0, 40 mg
Zinc	1 mg

Tabla 1.1.3 Contenido de otros Elementos en el Aguacate

Agua	74, 27 gr.
Contenido Calórico	161 Kcal
Lípidos	15, 32 gr.
Proteína	1, 98 gr.
Hidratos de carbono	7, 39 gr.
Fibra	5 gr.

En la Figura 1.1.1 se muestra el Aguacate Hass, en la cual podemos observar la forma y color de dicha fruta, la pulpa es de color amarillo verdoso con un borde verde y cáscara negra.

**Fig. 1.1.1 Aguacate Hass**

1.1.1 Características de la Liofilización

La liofilización consiste en extraer el agua a una sustancia congelada saltándose el paso por el estado líquido: se congela una solución acuosa de la sustancia química que deseamos liofilizar y, a esa baja temperatura que impide cambios químicos de deterioro, se le somete a un alto vacío que hace pasar el agua del estado sólido al estado gaseoso, sin pasar por el estado líquido conocido como sublimación.

1.1.2 Ventajas de la Liofilización

En la actualidad se ha buscado extender el mercado. Sin embargo, eso no ha resuelto el problema de las grandes cantidades de aguacate producido, por lo que se han utilizado otras presentaciones como guacamole congelado, aguacate en trozos congelados, etc. Estas presentaciones del Aguacate son útiles para quienes comercializan productos congelados, para ampliar la variedad de su oferta; o para quienes ya cuentan con bodegas congeladas. Sin embargo, su almacenaje puede representar un problema ya que aunque se cuenta con empresas que se dedican a la renta de bodegas de congelación y refrigeración, la cuota es por kilo almacenado.

Los diferentes métodos de secado que se utilizan en la actualidad no son aplicables a este fruto ya que, por su alto contenido vitamínico sufre deterioros que son irreversibles. Otro punto a favor, es que los productos liofilizados ofrecen la ventaja de comercializarlos cuando, por ejemplo, el aguacate está fuera de temporada y no es fácil conseguirlo en el mercado (Sánchez y col., 2007).

Actualmente se ha iniciado el estudio de un procedimiento más sofisticado para comercializar en polvo este producto que contiene gran cantidad de agua, pero hasta el momento no se ha comercializado el aguacate en esta presentación.

1.2 Objetivos

Se propone como objetivo general de este trabajo la obtención y evaluación de un modelo matemático que represente a la liofilización experimental del aguacate.

Como objetivos específicos se tienen los siguientes:

1. Determinación de las principales variables que afectan el proceso de liofilización.

Introducción

2. Utilización de las variables determinadas en un modelo matemático para predecir el comportamiento del proceso de la liofilización.
3. Obtener resultados del modelo matemático y compararlos con los datos experimentales.

1.3 Justificación

Únicamente el 10 por ciento de los productores de aguacate no han accedido a la exportación, debido a que aún no certifican su producción, mientras que un total de 5 mil productores han podido penetrar en el mercado extranjero.

La hegemonía adquirida por Michoacán es el reflejo de la gran expansión del cultivo. Este año Michoacán ha exportado a Estados Unidos un total de 200 mil toneladas, mientras que al resto del mundo se ha comercializado 300 mil toneladas, lo que consolida a Michoacán como el primer productor mundial de ese fruto.

En la actualidad se ha buscado extender el mercado. Sin embargo, eso no ha resuelto el problema de las grandes cantidades de aguacate producido, por lo que se han utilizado otras presentaciones para su comercialización como guacamole congelado, aguacate congelado y descongelado en su destino, etc. Sin embargo, ninguna de ellas ha reflejado un impacto importante en las pérdidas de este fruto.

A temperatura ambiente el aguacate se oscurece en menos de dos horas, pero si se le agregan conservadores naturales (ácido ascórbico) dura hasta siete horas sin cambiar de color. Si se le refrigera entero tiene un tiempo de vida óptimo de siete días.

Para su manejo, este alimento requiere de una "cadena en frío", es decir, que desde su salida de la planta deben mantenerse congelados a una misma temperatura, ya sea al ser transportados o en la bodega donde sean almacenados. Esta puede ser una oportunidad para quienes comercializan productos congelados, para ampliar la variedad de su oferta; o para quienes ya cuentan con bodegas congeladas. Sin embargo, su almacenaje puede representar un problema ya que aunque se cuenta con empresas que se dedican a la renta de bodegas de congelación y refrigeración, la cuota es por kilo almacenado (Sánchez y col., 2007).

Los métodos tradicionales de secado utilizados para la conservación de alimentos, mejoran la estabilidad durante el almacenamiento pero generalmente provocan

Introducción

perdidas de sustancias relacionadas con el sabor y color de los alimentos, esto genera un decremento considerable en la calidad de los productos. Es indispensable desarrollar nuevos procesos tendientes a mejorar la estabilidad de los productos durante el almacenamiento, procurando conservar sus propiedades sensoriales muy parecidas a las del alimento fresco. La utilización de la liofilización como un método de la conservación del aguacate se debe a que los diferentes métodos que se utilizan en la actualidad no son aplicables a este fruto ya que, por su alto contenido vitamínico sufre deterioros que son irreversibles. Otro punto a favor, es que los productos liofilizados ofrecen la ventaja de comercializarlos cuando, por ejemplo, el aguacate está fuera de temporada y no es fácil conseguirlo en el mercado (Vanaclocha y Requena, 2002).

En la actualidad se ha iniciado el estudio de un procedimiento mas sofisticado para comercializar en polvo este producto que contiene gran cantidad de agua, pero hasta el momento no se ha comercializado el aguacate en esta presentación.

Como ya se sabe ningún proceso es 100 % estable, en él pueden haber diferentes tipos de disturbios controlables como la presión, temperatura, grosor de la capa a liofilizar, etc., y otras variables incontrolables como la temperatura ambiente. De aquí se deriva la importancia de obtener un modelo matemático que prediga las posibles alteraciones que pueda sufrir el producto terminado ante cualquier cambio de las principales variables y cuales son las medidas de seguridad que se deben de tomar para tener un mejor control del proceso.

Al realizar experimentación con este método de conservación de alimentos se puede tener un mejor panorama de los beneficios y desventajas, a demás de deducir cuales son las variables que afectan al proceso. Sin embargo, se requiere de una inversión monetaria grande para poder llevarla a cabo y en algunas ocasiones no se cuenta con ella ya que los reactivos son muy caros, y no se realiza solamente un experimento sino que se hacen varios para asegurarse de que los resultados son confiables. Mediante un modelo matemático se puede predecir el comportamiento de las principales variables que afectan a nuestro sistema sin tener que realizar la experimentación y deducir cuales son las mejores formas de solucionar un problema que se puede suscitar a causa de un disturbio de ellas.

Ventajas de la liofilización

1. La temperatura a la que se realiza la liofilización, es menor a la temperatura a la que la sustancia a liofilizar sufre cambios químicos.
2. Debido a la baja temperatura que se opera, la pérdida de los constituyentes volátiles, es mínima.
3. Se eliminan los fenómenos de oxidación, dado que se opera y envasa a alto vacío.
4. La gran porosidad del producto facilita con rapidez la reconstitución por la adición de agua o del solvente adecuado.
5. Al ser despreciable la humedad remanente, el producto puede ser almacenado por tiempo ilimitado, constituyendo productos de larga estabilidad.
6. Es posible conseguir un producto (fruta o verdura) aun cuando no sea temporada del mismo.

Desventajas de la liofilización

1. Es un proceso costoso, debido a la gran cantidad de energía que requiere.
2. Se requiere de personal calificado en la operación y mantenimiento de los equipos.
3. Elevado costo de inversión de las instalaciones y equipos.

1.4 Alcance

Se espera obtener un modelo matemático que prediga de forma satisfactoria el proceso de la liofilización del aguacate Hass en un liofilizador Freeze Dry System/Lyph Lock 4.5 litros, para que sirva en un futuro para determinar tiempos de liofilización óptimos para diferentes espesores de aguacate y permita obtener resultados sin necesidad de realizar experimentación.

CAPITULO 2. Marco Teórico

El proceso de secado de alimentos por medio de la liofilización es un método moderno que nos permite la conservación de alimentos que pueden sufrir deterioros en su aporte vitamínico al ser secados por los métodos de secado convencionales. Para saber en que consiste este proceso es importante analizar los fundamentos físico-químicos de la liofilización.

2.1 Proceso de Liofilización

La liofilización es un proceso en el cual es posible obtener un material libre de solventes haciendo uso de la sublimación del líquido contenido en dicha muestra. La sublimación ocurre cuando una muestra congelada pasa directamente en la fase gaseosa sin pasar por la fase líquida. Cuando el hielo se sublima, deja huecos o vacíos o en el material residual seco lo que facilita su rehidratación. Gracias a que el material liofilizado se rehidrata tan fácilmente, se dice que es “liofílico” de dos palabras griegas que significan “amante del solvente”. Es una forma de secar un producto químico a temperaturas bajísimas, sin el deterioro que produciría el calentamiento.

2.2 Métodos de Conservación de Alimentos

La utilización de la liofilización como un método de conservación del aguacate se debe a que los diferentes métodos que se utilizan en la actualidad no son aplicables a este fruto ya que, por su alto contenido vitamínico sufre deterioros que son irreversibles. Los métodos de conservación que actualmente se conocen y aplican son:

1. Deshidratación osmótica
2. Refrigeración
3. Congelación
4. Secado
5. Altas presiones
6. Liofilización
7. Irradiación
8. Campos eléctricos pulsantes de alta densidad

9. Campos magnéticos oscilantes

10. Pulsos luminosos

11. Métodos combinados

Los métodos tradicionales de secado utilizados para la conservación de alimentos, mejoran la estabilidad durante el almacenamiento pero generalmente provocan pérdidas de sustancias relacionadas con el sabor y color de los alimentos, esto genera un decremento considerable en la calidad sensorial de los productos. Es indispensable desarrollar nuevos procesos tendientes a mejorar la estabilidad de los productos durante el almacenamiento, procurando conservar sus propiedades sensoriales muy parecidas a las del alimento fresco.

La deshidratación osmótica es una técnica valiosa que puede ser aplicada separadamente o como una etapa importante dentro de diferentes esquemas de deshidratación, requiere 2 ó 3 veces menos energía comparada con el secado convectivo, las temperaturas del proceso son relativamente bajas (20-50° C) y favorecen la retención de color y sabor. Debido a la inmersión constante dentro del medio osmótico, no es necesario usar aditivos para proteger al alimento contra decoloración enzimática y oxidativa.

En la refrigeración se debe observar que los alimentos se deterioran por acción de microorganismos. La temperatura del refrigerador debe ser de 5° C o menor. A esta temperatura las bacterias no se mueren pero sí se logra retrasar el crecimiento de muchas de ellas, y detener su multiplicación.

La congelación en los alimentos es retrasar el deterioro y prolongar su seguridad evitando que los microorganismos se desarrollen además de retardar la actividad enzimática que hace que los alimentos se echen a perder. La congelación tiene un efecto mínimo en el contenido nutricional de los alimentos. Este método puede provocar la pérdida de la vitamina C (del 15% al 20%). La congelación puede dañar algunos alimentos debido a que la formación de cristales de hielo rompe las membranas celulares, el alimento queda menos crujiente o firme.

El secado no representa una opción real para el aguacate, pero todos los granos y los cereales son conservados por secado. Algunas frutas y hortalizas también son conservadas por este método.

Otro de los métodos es el llamado altas presiones que consiste en someter al alimento a una elevada presión hidrostática (3.9476 atm – 8.8823 atm), durante un tiempo que va desde minutos hasta algunas horas. Este tratamiento inactiva enzimas y microorganismos retardando el deterioro del alimento, dando lugar a productos de óptima calidad microbiológica sin modificar apenas el aroma, sabor y el valor nutritivo.

La irradiación de alimentos consiste en exponerlos a energía procedente de fuentes como rayos gamma, a rayos X o los haces de electrones. Durante este proceso, el alimento no se calienta, como ocurre cuando se somete a microondas, ni retiene radiación. La irradiación no hace que los alimentos sean radiactivos. La ventaja principal de la irradiación de alimentos es que destruye las bacterias nocivas y otros microorganismos que pueden producir intoxicaciones alimentarias. Esta técnica tiene además otros efectos como el de retrasar la maduración, prolongando así la duración de los alimentos.

Los métodos más nuevos de conservación de alimentos son los CEPAL o campos eléctricos pulsantes de alta intensidad representan una de las tecnologías más prometedoras para la preservación de los alimentos. La pasteurización con CEPAL involucra la utilización de pulsos de alto voltaje en el alimento colocado entre dos electrodos. El tratamiento es conducido a temperatura ambiente o por debajo de ésta en milésimas de segundos y las pérdidas de energía por calor son minimizadas. Esta tecnología es considerada superior al tratamiento calórico convencional debido a que reduce grandemente los cambios que ocurren en las propiedades sensoriales (sabor, color), y físicas (textura, viscosidad) de los alimentos. Además de conservar los atributos sensoriales de los alimentos, los CEPAL no introducen cambios químicos significativos en los alimentos y puede que no sea considerada un aditivo alimentario. Por el contrario, es una tecnología efectiva, segura y limpia.

Otro método nuevo de conservación es la utilización de campos magnéticos oscilantes para la inactivación de microorganismos tiene el potencial de pasteurizar alimentos con un mejoramiento en la calidad y la vida de anaquel en comparación con

los procesos convencionales de pasteurización. Los campos magnéticos pueden ser estáticos (CMS) u oscilantes (CMO). En el campo magnético estático la intensidad del campo magnético es constante con el tiempo mientras que un campo magnético oscilante se aplica en forma de pulsos. La carga de los pulsos se revierte en cada pulso. El campo magnético puede ser homogéneo o heterogéneo. En un campo magnético homogéneo la intensidad del campo (B) es uniforme en el área envuelta por el campo magnético mientras que en un heterogéneo, B no es uniforme con las intensidades disminuyendo así como las distancias del centro del alambre aumentan. Los campos magnéticos oscilantes aplicados en forma de pulsos reversan la carga por cada pulso pero también la intensidad de cada pulso disminuye con el tiempo en un 10% de la intensidad inicial. La exposición a los campos magnéticos causa simulación o inhibición en el crecimiento y reproducción de los microorganismos.

El tratamiento con luz pulsada, es la aplicación de pulsos o destellos de luz de gran intensidad y de corta duración (entre microsegundos y un milisegundo) sobre la superficie del alimento que se quiere tratar. La aplicación de luz permite inactivar o inhibir los diferentes mecanismos de alteración de los alimentos así como descontaminar líquidos que dejen pasar la luz (trasparentes o claros) y la superficie de alimentos sólidos (Vanaclocha A. C).

2.3 Principios Fisicoquímicos de la Liofilización

El proceso de liofilización se realiza en tres etapas (Geankoplis, 1981):

1. **Pre-congelamiento**, la cual prepara el producto para el proceso de sublimación;
2. **Secado primario**, en el cual el hielo se sublima sin derretirse; y
3. **Secado secundario**, en el cual la humedad residual ligada al material sólido es extraída, dejando un producto seco. Este paso es esencial para la estabilidad de la muestra.

Las muestras se congelan en frascos, una vez que ya se ha congelado, esta lista para conectarse al sistema de liofilización. Los requerimientos básicos de un sistema de liofilización son:

- Una cámara de secado múltiple, un secador con bandejas en los cuales se conectan los contenedores con muestras precongeladas;
- Una fuente de calor para suministrar energía;
- Un colector de baja temperatura para maximizar la diferencia de presión del vapor y para retener la humedad antes de que contamine la bomba de vacío.

El secado primario y secundario se lleva a cabo cuando el contenedor es colocado en el sistema de liofilización o conectado a él. En la Figura 2.3.1 se puede observar una muestra de pulpa de aguacate congelada liofilizándose en la cual se ven partes color verde claro que ya fueron liofilizadas. La muestra es expuesta inmediatamente a un vacío para suspender la resistencia al flujo de vapor. Al mismo tiempo, se aplica calor para suministrar energía. La fuente de calor para los frascos y otros contenedores de vidrio en una cámara de secado múltiple es la temperatura ambiente. El vacío y el calor ayudan a que el vapor de agua sublime del hielo y fluya fácilmente fuera de la muestra y lejos del material de secado restante. La velocidad de sublimación de un producto congelado depende de varios factores, siendo lo más importante la diferencia de presión entre el producto congelado y el colector. Generalmente, la liofilización más efectiva ocurre cuando la muestra está a la temperatura más caliente que pueda tolerar y todavía permanecer congelada, y la temperatura del colector y el vacío del sistema son mantenidos a los valores más bajos conseguibles. Una vez terminado el secado primario, y todo el hielo se ha sublimado, todavía hay humedad ligada en el producto.

Durante el secado secundario, la fase final de la liofilización, el agua que estaba ligada fuertemente a los sólidos de la muestra, llamada agua sorbida, es convertida a vapor. Este proceso se llama desorción. La desorción es un proceso lento porque el agua sorbida tiene una presión más baja que el líquido a la misma temperatura. La liofilización termina cuando la presión del vapor entre la muestra y el colector se iguala. Si se extrae el producto del sistema demasiado pronto antes de que este completamente seco, se puede degradar rápidamente y sufrir la pérdida de las características estructurales y biológicas (Vanaclocha A. C).



Figura 2.3.1 Muestra de Aguacate Liofilizándose

2.4 Diagrama del Punto Triple

Durante el proceso de liofilización del aguacate únicamente se retira agua de la muestra por lo que es importante entender el diagrama de fases (Figura 2.4.1) del agua para explicar lo que sucede durante el proceso.

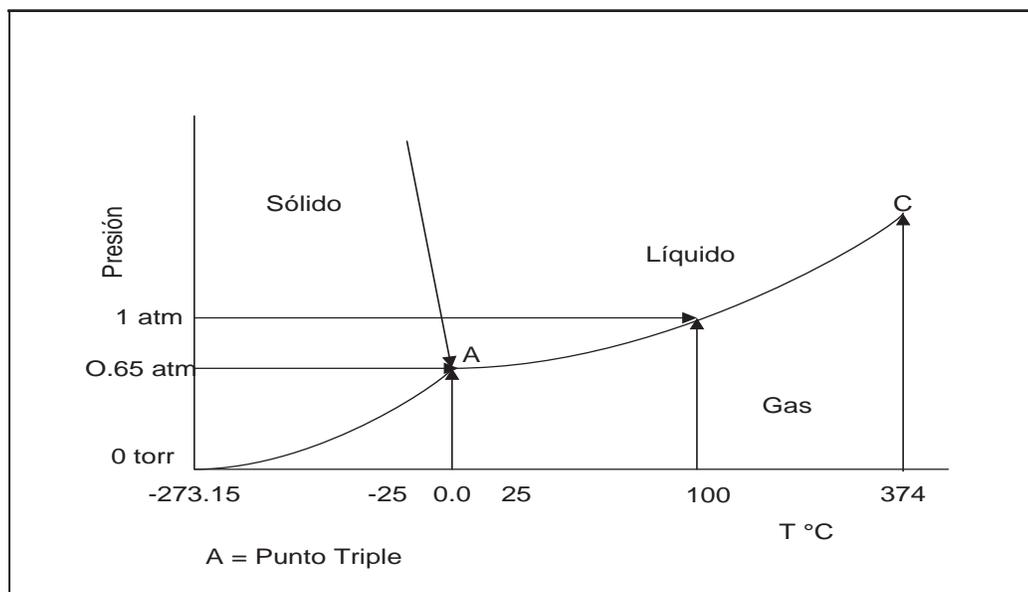


Figura 2.4.1 Diagrama de Fases del Agua

Para el proceso de liofilización es importante que durante la primera etapa se vigile que el proceso sobrepase el Punto Triple ya que de esto depende que se formen cristales de agua de mayor tamaño que puedan separarse durante la segunda etapa, de no ser así los cristales quedarán atrapados en las capas centrales de la muestra y aunque la segunda etapa se realice en un tiempo mayor no se podrá obtener un producto liofilizado de calidad.

En el diagrama de la Figura 2.4.2 se muestra el proceso de las dos etapas realizadas en el proceso de liofilización aplicado al aguacate, se marcan en color rojo (línea mas ancha) las etapas, la primera etapa se marca en la línea horizontal esta muestra las condiciones iniciales del proceso, a temperatura y presión normales, tomando como base los datos de temperatura y presión para la ciudad de Morelia tenemos que: $T = 25^{\circ}\text{C}$ (298 K) y $P = 0.940\text{ atm}$.

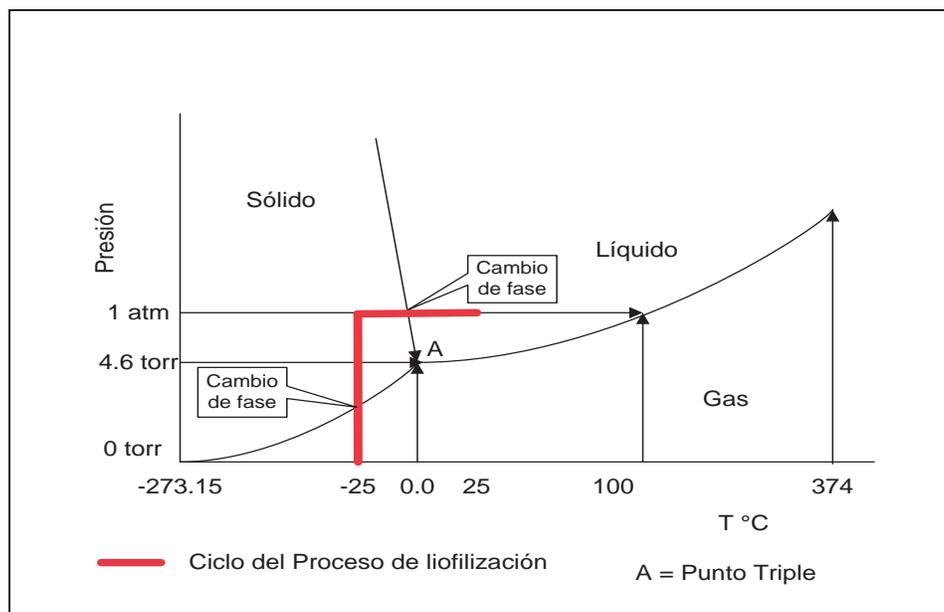


Figura 2.4.2 Diagrama de Fases Aplicado al Aguacate

A la primera etapa es llamada de enfriamiento, la cual comprende: enfriamiento–congelación–enfriamiento. Si se realiza esta primera etapa llevando el agua hasta -25°C se está sobrepasando el punto de 0°C , la presión se mantiene constante, la variable que se modifica es la temperatura de 25°C a -25°C , en el sistema de refrigeración empleado para el proceso, al llegar a los 0°C se retira calor latente del agua y se solidifica, enfriando un poco más hasta -25°C y se retira del congelador.

La muestra es llevada al liofilizador para continuar con la segunda etapa: En esta etapa se realiza depresión-sublimación–depresión, de la presión normal en la ciudad la bajamos hasta presión de vacío, la temperatura se mantiene constante, al llegar a una presión de 0.743×10^{-3} atm comienza el proceso de sublimación del agua.

2.5 Usos de la Liofilización

Algunos de los productos secados mediante el proceso de Liofilización son:

- Chile poblano (Conde Hernández L. A., 2003).
- Zanahorias (Mannheim L. C. H., 1998).
- Plasma, cartílago, vacunas, antibióticos, hormonas (Bruttini R., 1991).
- Vegetales, carne, leche, café y sopas (Bruttini R., 1991).
- Frutas como: Manzanas, platanos, kiwis (Tze Lee K., 2006)

2.6 Modelos Matemáticos existentes

Existen diferentes tipos de Liofilizadores en el mercado, de los cuales algunos ya han sido estudiados por investigadores los cuales propusieron modelos matemáticos que predicen el comportamiento de la Liofilización para cada equipo estudiado. A continuación se describen algunos de ellos.

1. **Modelo de Barbosa y Vega, 1996.** Según estos investigadores el perfil fenomenológico del proceso de liofilización se puede describir de la manera siguiente:

Transferencia de masa y calor durante la liofilización.

Los perfiles de temperatura y humedad en el interior del alimento durante la liofilización dependen de las velocidades de transferencia de masa y calor. El calor se transfiere a través del frente de sublimación o línea frontera entre las fases congelada y seca del producto. Dependiendo de la fuente de calor la transferencia podrá ser a través de la capa congelada, la capa seca o ambas.

Modelo en estado estacionario:

Según sea la forma de introducir el calor a la interfase de sublimación se tendrán distintas alternativas que modificarán la matemática involucrada a saber:

- Por conducción a través de la capa seca.
- Por conducción a través de la capa congelada.
- Por radiación desde cualquiera de las placas calefactores (superior o inferior)

En la Figura 2.6.1, se puede observar las tres etapas de transferencia de calor durante la liofilización. En ella, A) Se da por conducción a través de la capa seca, B) Por conducción a través de la capa congelada, y por último C) Generación interna de calor por microondas.

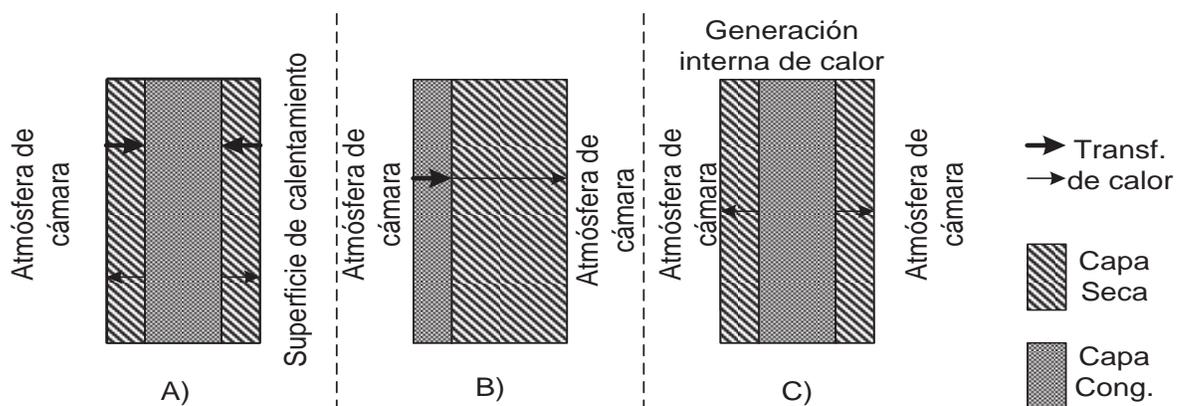


Figura 2.6.1 Diferentes Tipos de Transferencia de Calor

Se han desarrollado diversos modelos para describir en estado estable y en estado transitorio el proceso de liofilización para geometrías simples. En general estos modelos hacen las siguientes suposiciones:

- La transferencia de masa y calor son en una sola dirección (eje z).
- El flujo de calor y masa son unidimensionales y normales a la interfase ($z = Z$) y a la superficie ($z = 0$)
- La sublimación ocurre en la interfase paralela, a distancia Z de la superficie de la muestra
- El espesor de la interfase es infinitesimal
- A través de la capa seca fluye solamente el gas sublimado que es vapor de agua.

- En la interfase de sublimación, el vapor de agua está en equilibrio con el hielo.
- El medio poroso y el gas encerrado en él están en equilibrio térmico.
- La región congelada es homogénea, de propiedades físicas uniformes y contiene una insignificante proporción de gases disueltos.
- El recipiente que contiene la muestra ofrece una mínima resistencia a la transferencia de calor.
- Las resistencias de transferencia de masa y calor externas a la muestra son insignificantes.
- El volumen aparente inicial y final de la muestra son idénticos.

Modelamiento para liofilización simétrica y por una sola cara.

Este caso está esquematizado en la Figura 2.6.2. Las capas exteriores están secas y el frente de hielo en el centro se reduce con el tiempo; la sublimación del agua ocurre en la superficie del hielo, y el vapor de agua debe difundirse por los poros de la(s) capa(s) seca(s) hacia la atmósfera de la cámara. En este modelo no se tiene en cuenta el flujo de calor conductivo que pasa a través de la capa congelada.

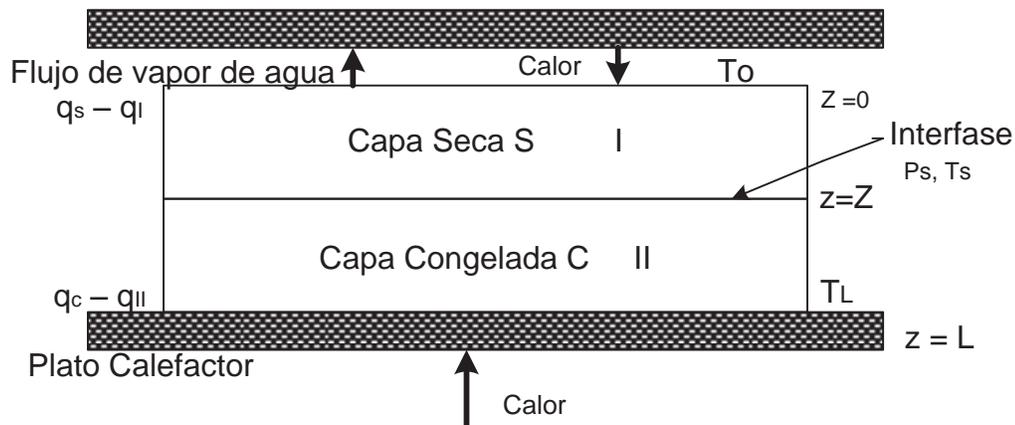


Figura 2.6.2 Flujo de Calor y Masa

El flujo de vapor de agua que sale del frente de sublimación es, desde la transferencia de masa a través de la capa seca o entre la superficie y el ambiente de la cámara:

$$G = -\frac{A}{A} \frac{dM}{dt} \quad (2.6.1.1)$$

Para $G(t)$ el flujo de vapor de agua, M masa de la muestra y A área de sublimación.

Si se llama ρ_c a la densidad de la capa congelada (densidad inicial), ρ_s a la densidad de la capa seca (densidad final), L al espesor de la placa (si se calienta por ambos lados L es el semiespesor), y Z a la distancia entre el borde de la placa y el frente de sublimación, la Ecuación (2.4.1.1) quedarían de la siguiente forma:

$$M = AZ\rho_s + A(\rho_c - \rho_s)Z \quad (2.6.1.2)$$

$$\frac{dM}{dt} = A(\rho_s - \rho_c) \frac{dZ}{dt} \quad (2.6.1.3)$$

$$G = A(\rho_c - \rho_s) \frac{dZ}{dt} \quad (2.6.1.4)$$

Considerando ahora la transferencia de masa a través de la capa seca. K_p es la permeabilidad del vapor de agua en la zona seca, P_s la presión del vapor de agua en la superficie de sublimación, P_o la presión de vapor del agua en la superficie exterior de la muestra k_g el coeficiente externo de transferencia de masa y P_A la presión en el ambiente de la cámara.

$$G = \left[\frac{K_p}{Z} \right] A(P_s - P_o) = K_g A(P_s - P_A) \quad (2.6.1.5)$$

$$K_p = \frac{KM_w}{RT} \quad (2.6.1.7)$$

Donde:

K_p : Permeabilidad del vapor en la capa seca

M_w : Peso molecular del agua

R : Constante universal de los gases

T : Temperatura media de la capa seca

2. Modelo de L. A. Conde, J. Nungaray y E. Arriola.

Estos investigadores desarrollaron un modelo que describiera el mecanismo de secado y la transferencia de masa durante la rehidratación. Para el análisis matemático del secado, se supuso que la fuerza motriz durante el secado es un gradiente de concentración. Se supuso, asimismo, que el coeficiente de masa es el mismo en todas las direcciones (material isotropico) y que el encogimiento de la muestra es despreciable. Bajo estas condiciones, la transferencia de humedad del sólido, en el periodo de velocidad decreciente, puede ser descrita satisfactoriamente por la ecuación de difusión de la ley de Fick en estado no-estacionario:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \quad (2.6.2.1)$$

Para resolver la Ecuación 2.4.2.1 suponemos que la concentración de humedad inicial es uniforme, que el movimiento de la humedad esta controlado por la resistencia interna y que la concentración en la superficie exterior no está variando con el tiempo. Bajo estas condiciones iniciales y de frontera, se pueden usar las soluciones analíticas, para una placa de geometría infinita, dadas en la literatura (Crack, 1975). Así entonces, se tiene que la solución de la Ecuación 2.4.2.1 está dada por:

$$\frac{W_t - W_e}{W_0 - W_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(n-1)^2} \exp\left[-\frac{(n-1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right] \quad (2.6.2.2)$$

Para tiempos de secado suficientemente largos, solamente el primer término de la Ecuación 2.4.2.2, para $n = 1$, puede ser usado sin gran error. Así mismo, en este estudio, la geometría de los chiles poblanos utilizados como muestra pudiera considerarse como una placa finita de dos dimensiones. Bajo estas condiciones se puede aplicar la regla de Newman (Treybal, 1968) y obtener:

$$\frac{W_t - W_e}{W_0 - W_e} = \frac{64}{\pi^2} \exp\left[-\left(\frac{\pi^2}{4L_1^2} + \frac{\pi^2}{4L_2^2}\right) D_{eff} t\right] \quad (2.6.2.3)$$

Para todos los experimentos realizados, se obtuvieron los valores del contenido de humedad adimensional,

$$(W - W_e)/(W_0 - W_e) \quad (2.6.2.4)$$

Se observa que el proceso de secado esta gobernado únicamente por la difusión dentro de los chiles. En sus estudios Conde, Nungaray y Arriola encontraron que la capacidad de rehidratación de chiles poblanos fue alta, mientras que el tiempo de rehidratación fue corto.

3. Modelo de R. J. Litchfield y A. I. Liapis, 1979.

Las siguientes suposiciones se tomaron para el desarrollo del modelo matemático:

- (1) Se considera flujo de masa y calor en una sola dimensión, normal a la interfase y la superficie.
- (2) La sublimación ocurre en una interfase paralela, y a una distancia X , de la superficie
- (3) El espesor de la interfase es tomado como infinitesimal.
- (4) Una mezcla binaria de vapor de agua y gas inerte fluye a través de la capa seca.
- (5) En la interfase de hielo, la concentración de vapor de agua se encuentra en equilibrio con el hielo.
- (6) A medida que la interfase retrocede, deja una capa parcialmente seca que tiene un contenido de vapor sustancialmente más grande que el valor del equilibrio a esa presión y temperatura. En la región porosa, la matriz dolida y el gas atrapado están en equilibrio. Como sea, la presión parcial del vapor de agua no esta necesariamente en equilibrio con la concentración en la fase sólida.
- (7) Se considera que la región congelada es homogénea, de conductividad térmica uniforme, densidad y calor específico, y que contiene una insignificante proporción de gases disueltos.
- (8) Se asume que los lados y el fondo de la cámara están perfectamente aislados de la transferencia de masa y calor.

El modelo consiste en un balance de masa y energía en estado inestable para la zona seca (I) y la región congelada (II):

$$\frac{\partial T_I}{\partial t} = \alpha_{Ie} \frac{\partial^2 T_I}{\partial x^2} - \frac{N_t C_{pg}}{\rho_{Ie} C_{ple}} \frac{\partial T_I}{\partial x} - \frac{T_I C_{pg}}{\rho_{Ie} C_{ple}} \frac{\partial N_t}{\partial x} + \frac{\Delta H \rho_I}{\rho_{Ie} C_{ple}} \frac{\partial C}{\partial t}, 0 \leq x \leq X \quad (2.6.3.1)$$

$$\frac{\partial T_{II}}{\partial t} = \alpha_{II} \frac{\partial^2 T_{II}}{\partial x^2}, X \leq x \leq L \quad (2.6.3.2)$$

Las ecuaciones de continuidad son:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{P_w}{T} \right) = - \frac{1}{M_w \varepsilon} \frac{\partial N_w}{\partial x} - \frac{\rho_I}{\varepsilon M_w} \frac{\partial C}{\partial t} \quad (2.6.3.3)$$

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{P_{in}}{T} \right) = - \frac{1}{M_{in} \varepsilon} \frac{\partial N_{in}}{\partial x} \quad (2.6.3.4)$$

$$\frac{dC}{dt} = K_g (C^* - C) \quad (2.6.3.5)$$

Donde C^* es la fracción en peso del agua en el sólido cuando se encuentra en equilibrio con la presión parcial del vapor de agua.

Las Ecuaciones de difusión de Evans y de D'Arcy para flujo viscoso, pueden ser usadas para desarrollar las siguientes ecuaciones para los flujos N_w y N_{in}

$$N_w = - \frac{M_w}{RT} \left[k_1 \frac{\partial P_w}{\partial x} + k_2 P_w \left(\frac{\partial P_w}{\partial x} + \frac{\partial P_{in}}{\partial x} \right) \right] \quad (2.6.3.6)$$

$$N_{in} = - \frac{M_{in}}{RT} \left[k_3 \frac{\partial P_{in}}{\partial x} + k_4 P_{in} \left(\frac{\partial P_{in}}{\partial x} + \frac{\partial P_w}{\partial x} \right) \right] \quad (2.6.3.7)$$

El modelo se encuentra completamente especificado con el balance de materia en la interfase cuando se define la velocidad como:

$$V = \frac{dX}{dt} = - \frac{N_w}{\rho_{II} - \rho_I} \quad (2.6.3.8)$$

El modelo fue resuelto con Fortran IV para la liofilización de la carne de pavo y se encontró que el modelo reproduce de manera satisfactoria los resultados encontrados experimentalmente por Sandall en 1966.

3. Modelo de E. A. Boss, R. M. Filho y E. C. Vasco de Toledo, 2004.

El modelo matemático se basa en ecuaciones fundamentales de balance de masa y energía.

Las consideraciones para el modelo matemático son:

- La transferencia de masa y calor es en una sola dimensión.
- La sublimación ocurre en la interfase paralela a la superficie.
- La capa de sólido es semi-infinita.
- La mezcla binaria de vapor de agua y gas inerte fluye a través de la capa seca.
- En la interfase, la concentración de vapor de agua se encuentra en equilibrio con el hielo.
- En la región porosa, la capa sólida y el gas atrapado se encuentra en equilibrio térmico.
- La región congelada es considerada como homogénea, con una conductividad térmica, densidad y calor específico uniforme y que contiene una cantidad significativa de gases disueltos.

El modelo matemático que se obtuvo es:

$$\frac{\partial T_I}{\partial t} = \frac{\Delta H_v \rho_I}{\rho_{le} C_{Pe}} \left(\frac{\partial C_{sw}}{\partial t} \right) - \frac{C_{Pg}}{\rho_{le} C_{Pe}} \left(\frac{\partial N_w T_I}{\partial x} \right) - \frac{C_1 P}{9.5 C_2 \rho_{le} L} \quad 0 \leq x \leq X \quad (2.6.4.1)$$

$$\frac{\partial T_{II}}{\partial t} = \alpha_{II} \frac{\partial T_{II}}{\partial x^2} \quad X \leq x \leq L \quad (2.6.4.2)$$

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{P_w}{T_I} \right) = - \frac{1}{M_w \varepsilon} \frac{\partial N_w}{\partial x} - \frac{\rho_I}{M_w \varepsilon} \frac{\partial C_{sw}}{\partial t} \quad 0 \leq x \leq X \quad (2.6.4.3)$$

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{P_{in}}{T_1} \right) = - \frac{1}{M_{in} \epsilon} \frac{\partial N_{in}}{\partial x} \quad 0 \leq x \leq X \quad (2.6.4.4)$$

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\Delta H_v \rho_1}{\rho_{1e} C_{P_{1e}}} \left(\frac{\partial C_{sw}}{\partial t} \right) - \frac{C_{P_s}}{\rho_{1e} C_{P_{1e}}} \left(\frac{\partial (N T_1)}{\partial x} \right) \frac{C_1 P}{9.5 C_2 \rho_{1e} L} \quad 0 \leq x \leq L \quad (2.6.4.5)$$

La solución del modelo fue encontrada al resolverlo por colocación ortogonal y aproximación polinomial.

Este modelo se uso para la optimización del proceso de la obtención del café soluble y la leche, los resultados que se obtuvieron fueron satisfactorios reduciéndose los tiempo de liofilizado y con esto los costos de energía.

CAPITULO 3. Metodología

Para obtener un modelo Matemático que prediga de manera segura el comportamiento del proceso de la Liofilización enfocado al aguacate utilizando un liofilizador Freeze Dry System/Lyph Lock 4.5 litros, se desarrollo un diseño de experimentos para obtener resultados experimentales con los cuales se pueda comparar los datos obtenidos al resolver el modelo matemático siguiendo la técnica descrita mas adelante para la Liofilización del Aguacate.

3.1 Equipo de Liofilización

El equipo que utilizado para la liofilización del aguacate es un liofilizador Freeze Dry System/Lyph Lock 4.5 litros, tipo consola, con colector de acero inoxidable y capacidad para retirar hasta 2 litros de agua en 24 horas de la muestra, el sistema de refrigeración contiene un refrigerante del tipo CFC con una potencia de 1.3 hp que disminuye la temperatura de las muestras hasta $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, está capacitado para ocho muestras, tiene un sistema para manejo manual y automático para activar la bomba de vacío, además tiene una pantalla pequeña en la que se indica el vacío en Mbar y la temperatura del serpentín. Este equipo se muestra en la Figura 3.1.1.



Figura 3.1.1 Liofilizador

3.2 Técnica para la Liofilización

Los experimentos se realizaran por triplicado, para observar el comportamiento de los resultados. El orden aleatorio para realizar la experimentación se muestra en la Tabla 3.2.1. Técnica a seguir para la liofilización del aguacate:

- Primero lavar y secar el aguacate.
- Retirar la cáscara y el hueso, y triturar hasta formar una pasta que no contenga grandes grumos.
- Colocar la muestra al espesor de liofilizado requerido (1 cm.).
- Congelar de acuerdo al tiempo de liofilizado (2 hrs.).
- Para la primera etapa tapar el matraz con papel aluminio y colocar en el equipo de liofilización.
- Antes de que se cumpla el tiempo de la primera etapa se enciende el equipo de liofilizado para que al cumplirse el tiempo de la primera etapa el equipo ya se haya estabilizado en sus funciones, ya que tarda en alcanzar la temperatura de -40°C que es el momento en el que se activa la bomba de vacío.
- Al cumplirse el tiempo óptimo (2 hrs.) se retira del congelador y se lleva al equipo de liofilizado.
- Al conectar la muestra al equipo de liofilizado se sella con cinta parafilm en las orillas para evitar caídas de presión.
- Liofilizar por el tiempo descrito en el diseño de experimentos a temperatura y presión de vacío (743 Mbar = 0.733 atm.) constantes.
- Retirar la muestra del liofilizador y pesar inmediatamente.

Tabla 3.2.1 Diseño de Experimentos

Tiempo (Hrs)	Exp1	Exp2	Exp3
2	6	9	3
4	5	1	8
6	4	2	7

Los experimentos se realizaron de forma aleatoria y cada uno de ellos por triplicado.

CAPITULO 4. Resultados

A partir de la experimentación podemos observar el comportamiento de la humedad en el Aguacate que se esta liofilizando. De esta forma tenemos datos con los cuales comparar y validar el modelo matemático propuesto.

4.1 Resultados Experimentales

La experimentación se realizo de acuerdo con la metodología especificada en el Capítulo 3, los resultados se muestran en la Tabla 4.1.1.

Se puede observar que existen pequeñas variaciones en los resultados, esto se debe a que como todo experimento se pueden tener pequeñas variaciones a la hora de pesar la muestra, sin embargo los experimentos se realizaron con mucho cuidado para evitar al máximo los errores de medición y es por eso que la diferencia entre una y otra muestra tomada al mismo tiempo no es mucha.

Tabla 4.1.1 Resultados Experimentales

Experimento	Tiempo de experimentación	Peso inicial (gr.)	Peso final (gr.)	Diferencia	Masa final / Masa inicial	Fracción Agua retirada
6	2 Hrs	20	12.4551	7.5449	0.6058	0.3942
9	2 Hrs	20	12.0275	7.9725	0.6628	0.3372
3	2 Hrs	20	12.5179	7.4821	0.5977	0.4023
5	4 Hrs	20	8.6746	11.3254	0.4337	0.5663
1	4 Hrs	20	8.2384	11.7616	0.4119	0.5881
8	4Hrs	20	8.7459	11.2541	0.4373	0.5627
4	6 Hrs	20	7.6339	12.3661	0.3817	0.6183
2	6 Hrs	20	7.403	12.597	0.3702	0.6288
7	6 Hrs	20	7.8548	12.1452	0.3927	0.6073

De la Tabla 4.1.1 se pueden obtener los promedios de los datos experimentales para cada uno de los tiempos, estos promedios se muestran en la Tabla 4.1.2.

Tabla 4.1.2 Resultados Experimentales Promedio

Tiempo de experimentación	Peso inicial (gr.)	Peso final (gr.)	Diferencia	Masa final / Masa inicial	Agua retirada
2 Hrs	20	12.3335	7.6665	0.6221	0.3779
4 Hrs	20	8.552967	11.44703	0.427633	0.572367
6 Hrs	20	7.630567	12.36943	0.381533	0.618133

4.2 Análisis Estadístico

En la Tabla 4.2.1 se muestra la media y la desviación estándar de los experimentos realizados a diferentes tiempos y se puede observar que la desviación estándar es del orden del 2-5% de la media por lo que se considera que no hay un error significativo al realizar la experimentación.

Tabla 4.2.1 Masa final / Masa inicial

Horas	Media	Varianza	Desv. Estándar
0	1		
2	0.62210	0.0012587	0.0354791
4	0.427633	0.0001888	0.0137438
6	0.381533	0.0001265	0.0112509

Al graficar la media (Figura 4.2.1) se puede ver la tendencia que tiene la fracción de masa seca con respecto del tiempo y los resultados obtenidos son como los que se esperaban antes de iniciar la experimentación ya que al ir retirando agua la fracción de masa seca va disminuyendo hasta permanecer constante debido a que ya no se retira más agua del sistema, lo cual sucede porque el total del agua que contenía la muestra original ya ha sido retirada y aunque el proceso de liofilización continúe por mas horas ya no cambia el peso de la muestra liofilizándose.

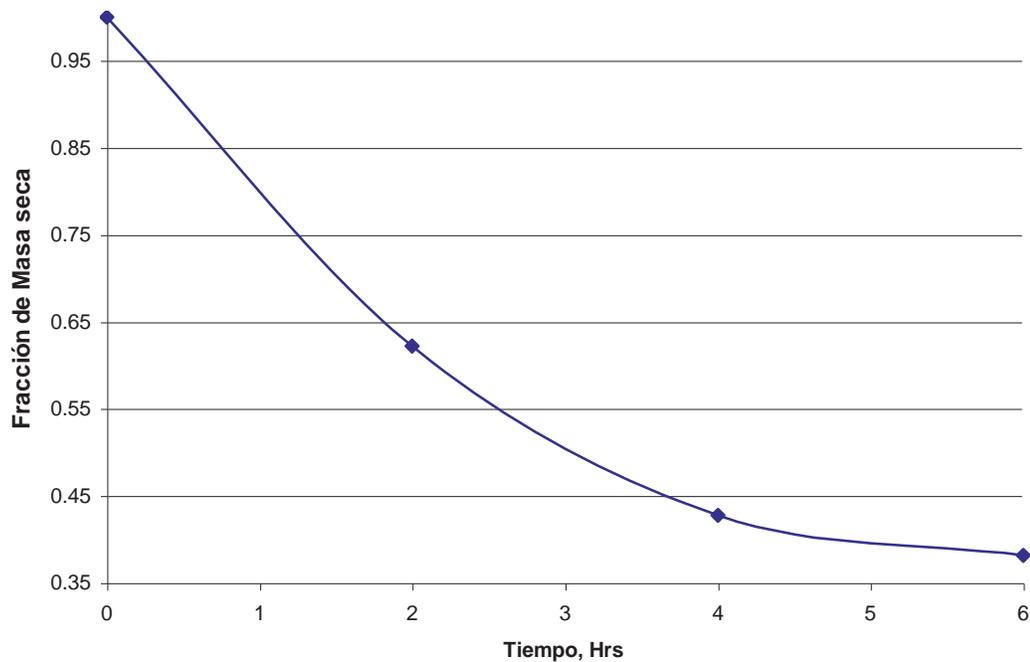


Figura 4.2.1 Fracción de Masa Seca a través del Tiempo

En la Tabla 4.2.2 y en el Figura 4.2.2 se observa el porcentaje de agua que es retirada del sistema con respecto del tiempo. Como se puede ver en las primeras horas del proceso se retira la mayor cantidad de agua y en las horas siguientes la velocidad con la que se retira el agua es menor hasta que ya no se retira más agua (esto es después de las 6 horas de liofilizado) debido a que toda el agua libre es retirada y solo queda el agua ligada al material.

Tabla 4.2.2 Porcentaje de Agua Retirada

Horas	Media	Varianza	Desv. Estándar
0	0		
2	0.3779	0.001258	0.035479
4	0.572366	0.0001888	0.013743
6	0.618133	0.0001155	0.010750

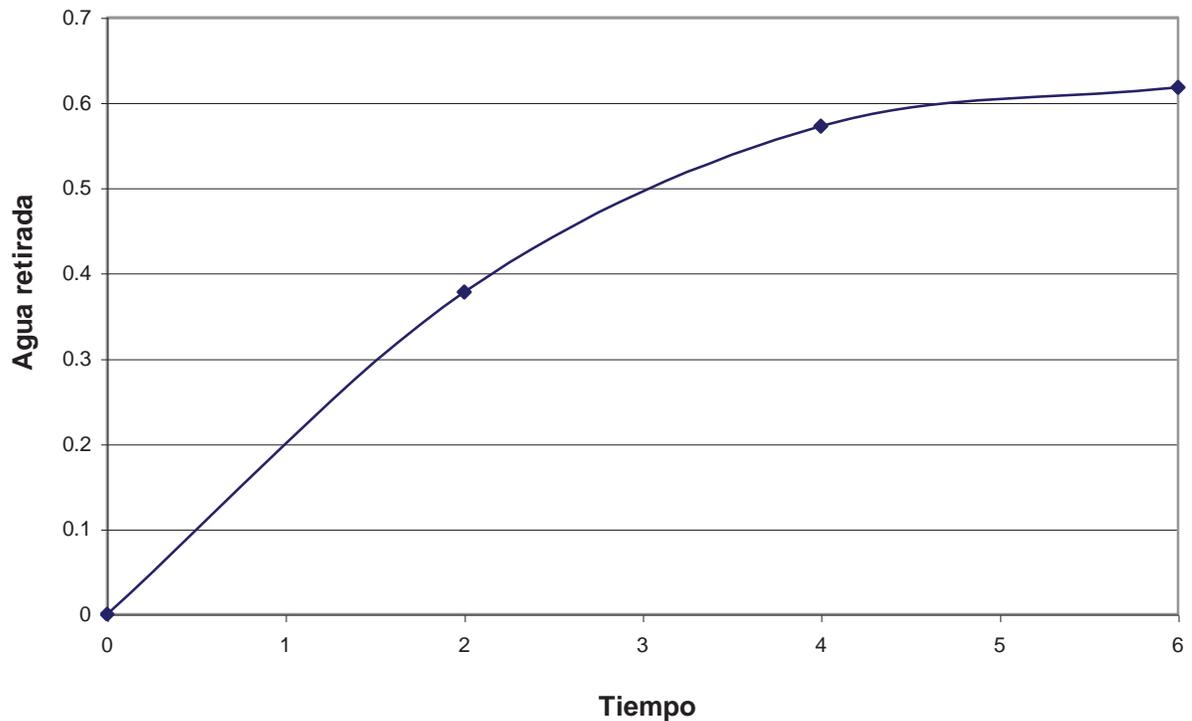


Figura 4.2.2 Cantidad de Agua Retirada

4.3 Modelo Matemático Propuesto

Suposiciones tomadas para el desarrollo del modelo:

- Se considera que la región congelada tiene una masa y propiedades de transferencia de calor uniformes y no contiene gases disueltos aparte del agua.
- Se considera flujo de masa en una sola dirección, normal a la interfase.
- La sublimación ocurre en la interfase entre la masa seca y la masa congelada, a una distancia Z de la superficie de la muestra (Figura 4.3.1).
- El espesor de la interfase entre la masa seca y la masa congelada es infinitesimal.
- A través de la capa seca fluye solamente el vapor de agua.
- En la interfase de sublimación, el vapor de agua está en equilibrio con el hielo.
- El volumen inicial y final de la muestra son idénticos.
- El balance de energía no se realiza debido a que la cámara se mantiene a temperatura constante.
- Las resistencias de transferencia de masa y calor a través de la interfase son insignificantes.

- La Difusión del vapor del agua ocurre a partir de la interfase, a través de los poros.
- La concentración del vapor de agua en la interfase es cero.
- La interfase entre la capa seca y la capa congelada siempre es paralela a la superficie.

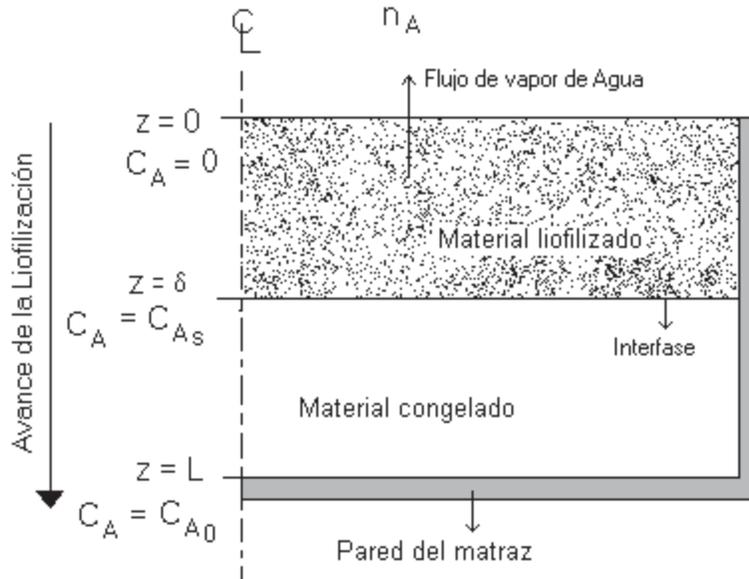


Figura 4.3.1 Diagrama Propuesto

Al realizar un balance de masa para la capa seca, se obtiene

$$\left(\begin{array}{c} \text{Masa de A} \\ \text{que entra} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Masa de A} \\ \text{que sale} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Masa que se} \\ \text{produce de A} \end{array} \right) = 0 \quad (4.3.1)$$

En donde, la especie A es el agua que se extrae a través del sólido poroso (aguacate seco, especie B).

En el sistema de liofilización no se produce A, por lo tanto la ecuación anterior se convierte en:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Masa de A} \\ \text{que entra} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Masa de A} \\ \text{que sale} \end{array} \right) = 0 \quad (4.3.2)$$

Sustituyendo términos obtenemos

$$Sn_A|_z - Sn_A|_{z+\Delta z} = 0 \quad (4.3.3)$$

Donde S es el área superficial.

Cambiando signos, dividiendo entre $S\Delta z$ y tomando el límite $\Delta z \rightarrow 0$

$$\lim_{\Delta z \rightarrow 0} \left(\frac{Sn_A|_{z+\Delta z} - Sn_A|_z}{S\Delta z} \right) = 0 \quad (4.3.4)$$

La ecuación de transferencia de masa se reduce a:

$$\frac{dn_{A,z}}{dz} = 0 \quad (4.3.5)$$

Aplicando la Ley de Fick para la difusión del agua (especie A) a través del sólido poroso (aguacate seco, especie B).

$$n_{A,z} = -D_{AB} \frac{dC_A}{dz} + \frac{C_A}{C} n_{A,z} \quad (4.3.6)$$

La concentración del agua en la capa seca del aguacate es muy pequeña, por lo tanto el término C_A/C es muy pequeño comparado con los otros términos. De esta forma, la Ecuación de Fick se reduce a:

$$n_{A,z} = -D_{AB} \frac{dC_A}{dz} \quad (4.3.7)$$

Integrando la ecuación (4.3.7) por separación de variables:

$$\int_0^{\delta} n_{A,z} dz = -D_{AB} \int_0^{C_{As}} dC_A \quad (4.3.8)$$

$$n_{A,z} \left[\delta - 0 \right] = -D_{AB} \left[C_{As} - 0 \right] \quad (4.3.9)$$

$$n_{A,z} = -\frac{D_{AB}C_{AS}}{\delta} \quad (4.3.10)$$

Conforme pasa el tiempo δ crece lentamente y esto se sabe debido a que solo cambia de 0 cm a 1 cm en 6 horas por lo que se puede considerar que el proceso se mantiene casi en estado estacionario por transcurrir tan lentamente con el tiempo, o dicho de otra forma el sistema opera bajo la suposición de un pseudo estado estacionario.

Para encontrar como δ se incrementa con el tiempo, se considera un balance de masa en estado inestable para el Aguacate seco dentro de todo el volumen de materia.

Se conoce de datos experimentales que la muestra total pesa 20 gramos, de los cuales 12.3694 gr corresponden al agua y 7.6306 gr corresponden al resto del material que compone al Aguacate. Por lo tanto, para obtener la relación que existe entre la masa seca de aguacate y la cantidad de agua total que tienen dicha muestra realizamos la siguiente operación:

$$\frac{\text{Gramos del resto de los componentes del Aguacate } (g_B)}{\text{Gramos de agua en la muestra } (g_A)} = \frac{7.6306 \text{ g}}{12.3694 \text{ g}} \quad (4.3.11)$$

$$\frac{g_B}{g_A} = 0.6169 \quad (4.3.12)$$

La Ecuación 4.3.12 nos indica la relación de masa seca de aguacate con respecto del agua total que contiene es 0.6169 o dicho de otra forma, por cada gramo de masa seca de aguacate se tienen 0.6169 gramos de agua.

Realizando el Balance de Materia para la formación de la capa seca:

$$0.6169 \left(\begin{array}{l} \text{Velocidad masica} \\ \text{de formación de} \\ \text{la capa seca de} \\ \text{Aguacate} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{Velocidad masica} \\ \text{de acumulación de} \\ \text{la capa seca de} \\ \text{Aguacate} \end{array} \right) \quad (4.3.13)$$

Al sustituir términos para la velocidad másica de acumulación de la capa seca tenemos:

$$\left(\begin{array}{l} \text{Velocidad masica} \\ \text{de acumulación de} \\ \text{la capa seca de} \\ \text{Aguacate} \end{array} \right) = \frac{d \rho_B S \delta}{dt} \quad (4.3.14)$$

Donde ρ_B es la densidad del Aguacate y S es el área superficial.

La velocidad de formación de la capa seca de aguacate se determina a partir del calculo del flux másico y el área superficial.

$$\left(\begin{array}{l} \text{Velocidad masica} \\ \text{de formación de} \\ \text{la capa seca de} \\ \text{Aguacate} \end{array} \right) = n_{A,z} S = \frac{D_{AB} C_{As}}{\delta} S \quad (4.3.15)$$

Sustituyendo las Ecuaciones (4.3.14) y (4.3.15) en la Ecuación (4.3.13):

$$0.6169 \rho_B \frac{d\delta}{dt} = \frac{D_{AB} C_{As}}{\delta} \quad (4.3.16)$$

Separando variables e integrando:

$$0.6169 \int_0^{\delta} \delta d\delta = \frac{D_{AB} C_{As}}{\rho_B} \int_0^t dt \quad (4.3.17)$$

Obtenemos

$$\frac{0.6169 \delta^2}{2} = \frac{D_{AB} C_{As}}{\rho_B} t \quad (4.3.18)$$

Al reacomodar términos obtenemos la Ecuación que representa nuestro modelo matemático.

$$0.30845 \delta^2 = \frac{D_{AB} C_{As}}{\rho_B} t \quad (4.3.19)$$

4.4 Solución del Modelo Matemático Propuesto.

Para calcular el espesor de la capa seca a través del tiempo se utilizan los datos obtenidos de forma experimental debido a que el espesor de la muestra de aguacate liofilizada fue de 1 cm de espesor y no es posible obtener el dato a simple vista, por otra parte, no se puede sacar la muestra liofilizada del matraz porque una vez que el proceso de liofilización ha concluido el aguacate seco se encuentra en forma de polvo y al tratar de separarlo de las paredes del matraz se deshace.

Cálculo del volumen de la muestra a Liofilizar.

Para calcular el volumen de la muestra a liofilizar se utiliza la ecuación del volumen de un cilindro:

$$V = \pi r^2 h \quad (4.4.1)$$

Donde V es el volumen total de la muestra en cm^3 , r es el radio del matraz en el cual se realizó la liofilización en cm y h es la altura o espesor de la muestra liofilizada en cm.

Para resolver la Ecuación 4.4.1 se usaron los valores de r igual a 3.8 cm y h igual a 1 cm. El volumen de la muestra a liofilizar es igual a:

$$V = \pi (3.8 \text{ cm})^2 (1 \text{ cm}) = 45.3647 \text{ cm}^3 \quad (4.4.2)$$

Cálculo del Volumen Equivalente

El cálculo del volumen equivalente nos permitirá determinar el espesor r de la capa seca con respecto al tiempo

$$V_{eq} = \frac{V \overline{H_2O}_R}{\overline{H_2O}_X} \quad (4.4.3)$$

Donde V_{eq} es el volumen al cual equivale al retirarle una cantidad de agua determinada $(H_2O)_R$ en un periodo de tiempo del total del agua que contiene la muestra $(H_2O)_T$ igual a 12.3694 gr.

Cálculo del Espesor Equivalente

El espesor equivalente, h_{eq} , es el espesor de la capa seca calculado con los datos experimentales para cada periodo de tiempo determinado.

$$h_{eq} = \frac{V_{eq}}{\pi r^2} \quad (4.4.4)$$

La Tabla 4.4.1 muestra los resultados obtenidos en las Ecuaciones (4.4.3) y (4.4.4) para los datos experimentales. En esta tabla se puede observar que el espesor equivalente en un tiempo igual a 6 horas es igual a 1.0 cm el cual es igual al espesor de la capa de aguacate usada para liofilizar, por lo que se considera que esta forma de calcular el espesor de δ es confiable y aunque arroje un pequeño error en los datos intermedios (debido a que se realiza con los datos experimentales de la liofilización), el error es pequeño y se pueden usar estos datos para resolver el modelo matemático.

Tabla 4.4.1 Volumen y Espesor Equivalente de la Capa Seca

Horas	Peso inicial (g)	Peso Final (g)	Gramos de agua retirada	V_{eq}	h_{eq}
0	20	20	0	0	0
2	20	12.3335	7.6665	28.1122	0.63
4	20	8.5529	11.4470	41.9832	0.92
6	20	7.5283	12.3694	45.3647	1.0

En la Figura 4.4.1 podemos ver el comportamiento del espesor de la Capa seca con respecto del Tiempo y observamos que al igual que la concentración ambas tienen un comportamiento no lineal.

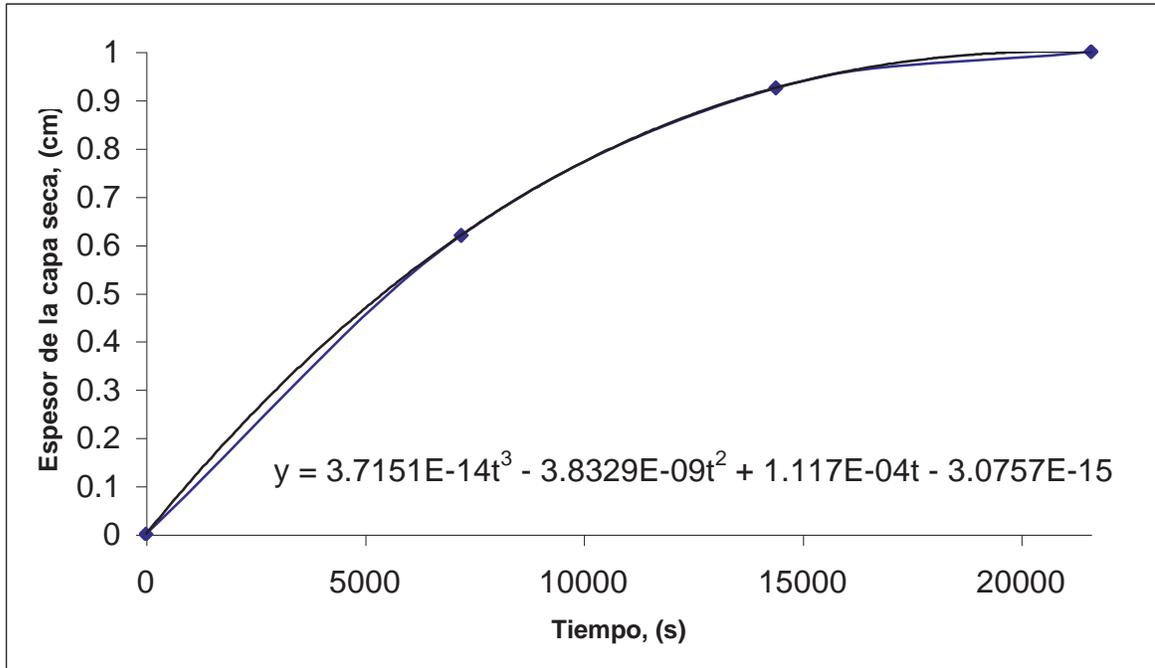


Figura 4.4.1 Espesor de la Capa Seca

Como A partir de la línea de tendencia obtenida en la Figura 4.4.1 se pueden calcular los valores del espesor de la capa seca:

$$\delta = 3.715135E-14 t^3 - 3.832948E-09 t^2 + 1.117546E-04 t - 3.075708E-14 \quad (4.4.5)$$

Los valores que se obtienen se muestran en la Tabla 4.4.2 en la cual se puede apreciar que la ecuación de la línea de tendencia se ajusta perfectamente a los datos calculados experimentalmente, esto es debido a que solo se cuentan con cuatro puntos en el gráfico y la línea de tendencia se aproxima a un polinomio de tercer orden por lo que el error es prácticamente igual a cero.

Tabla 4.4.2 Cálculo del Espesor de la Capa Seca

Tiempo (s)	Espesor, real (cm)	Espesor, calc. (cm)
0	0	0,00
7200	0,63	0,63
14400	0,92	0,92
21600	1	1,00

Calculo de la Densidad del Aguacate

Para obtener el valor de la densidad del Aguacate se utilizo un método experimental que consiste en sumergir la muestra de Aguacate previamente pesada en un recipiente con agua y medir la cantidad de líquido que fue desplazado, con esto se tienen los gramos de la muestra por volumen desplazado.

Los resultados que se obtenidos se muestran en la Tabla 4.4.3

Tabla 4.4.3 Densidad del Aguacate

g de Muestra	ml desplazados	Densidad, calc.
20	14,5	1,37931
20	14,4	1,38889
20	14,2	1,40845

A partir de los datos anteriores, se toma el valor promedio de los resultados experimentales para concluir que:

$$\rho = 1.39222 \text{ g/cm}^3 \quad (4.4.5a)$$

Donde ρ es la densidad promedio experimental de la muestra de aguacate a liofilizar.

Calculo de la difusividad

Podemos calcular la Difusividad con los datos experimentales que conocemos partiendo de la Ecuación 4.3.19 para $t = 0$ y despejando D_{AB} :

$$D_{AB} = 0.30845 \frac{\delta^2 \rho_B}{t C_{As}} \quad (4.4.6)$$

Los datos con los que se resuelve la ecuación 4.4.6, son los datos para un tiempo igual a cero, dicho de otra forma, con los valores iniciales para la liofilización del aguacate.

Datos:

$$t = 1\text{s}$$

$$\delta = 0.0001\text{ cm}$$

$$\rho_B = 1.3922\text{ gr/cm}^3$$

$$C_{As} = 0.000048\text{ gr/cm}^3 \approx 0\text{ g/cm}^3$$

Sustituyendo los datos en la Ecuación 4.4.6:

$$D_{AB} = 0.30845 \frac{(0.0001)^2 (1.3922)}{(0.000048)} \quad (4.4.6a)$$

$$D_{AB} = 8.9463 \times 10^{-5}\text{ cm}^2/\text{s} \quad (4.4.7)$$

Solución del Modelo Matemático para C_{As} .

Partiendo de la Ecuación 4.3.14, despejamos C_{As} :

$$C_{As} = 0.30845 \frac{\delta^2 \rho_B}{t D_{AB}} \quad (4.4.8)$$

La Tabla 4.4.4 nos muestra los resultados obtenidos para C_{As} al sustituir los datos en la Ecuación 4.4.8 manteniendo un valor de D_{AB} igual a $8.9463 \times 10^{-5}\text{ cm}^2/\text{s}$ constante y ρ_B igual a 1.3922 g/cm^3 constante. La variable que cambia con respecto al tiempo es δ (espesor de la capa seca).

Tabla 4.4.4 Solución del Modelo Matemático

Tiempo (s)	δ (cm)	C_{As} calc.
1	0,0001	0.000048
7200	0,63	0,2646
14400	0,92	0,2821
21600	1	0,2640

La concentración C_{As} esta dada en unidades de masa sobre volumen (g/cm^3) por lo que multiplicamos los resultados obtenidos con el modelo matemático por el volumen al cual equivale cada una de las concentraciones para de esta forma obtener los gramos de agua retirados en función del tiempo y poder comparar con los resultados experimentales. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 4.4.5.

Tabla 4.4.5 Valores de C_A calculados

Tiempo (s)	C_{As} calc. (g/cm^3)	V_{eq} (cm^3)	C_A calc. (g)
0	0.000048	0	0
7200	0,2646	28.1122	7.4385
14400	0,2821	41.9832	11.8448
21600	0,2640	45.3647	11.9773

En la Tabla 4.4.6 se pueden apreciar los valores de la Concentración del vapor de Agua retirado en función del tiempo que fueron calculados con el Modelo Matemático y los valores obtenidos de forma experimental en el liofilizador Freeze Dry System/Lyph Lock y se observa que no existe mucha variación entre los resultados numéricos mostrados.

Tabla 4.4.6 Valores de C_A calculada y valores de C_A experimentales

Tiempo	C_{As} calc (g/cm^3)	C_A calc (g)	C_A real (g)
0	0.000048	0	0
7200	0,2646	7.4385	7,6665
14400	0,2821	11.8448	11,4470
21600	0,2640	11.9773	12,369

En la Tabla 4.4.6 se observan los resultados numéricos sin embargo, a simple vista los valores son muy parecidos pero no se observa cual es la diferencia real de los valores obtenidos con el modelo matemático con respecto de los obtenidos de forma experimental. En la Tabla 4.4.7 se puede apreciar de forma resumida los valores de la concentración de vapor de agua retirada en función del tiempo y los valores calculados con el Modelo Matemático, así como el % de error absoluto de los datos y se observa que el por ciento de error es del orden del 3%.

Tabla 4.4.7 Valores Experimentales y Calculados

Tiempo (s)	Ca, calc. (g)	Ca, real (g)	% Error
0	0	0	0
7200	6,91639	7,6665	2.97
14400	11.4470	11,447	3.48
21600	11.3779	12,369	3.17

En la Figura 4.4.2 se puede apreciar de mejor manera la comparación de los resultados experimentales con los resultados obtenidos por el Modelo Matemático, de esta forma se tiene una idea grafica del proceso y se visualiza de mejor manera el comportamiento de la curva de cantidad de vapor de agua retirada del sistema calculada y experimental.

Como se puede apreciar existe una pequeña diferencia entre los valores experimentales y los calculados con el Modelo Matemático, una de las posibles razones para esta diferencia que existe entre los datos obtenidos con el modelo matemático y los resultados experimentales se debe a que algunos de los datos requeridos como la densidad del aguacate, la difusividad en la capa seca, el espesor de la capa seca, etc. fueron calculados a partir de los datos obtenidos experimentalmente, también tienen que ver las suposiciones que se hicieron para obtener el Modelo Matemático ya que con estas el sistema se considera casi ideal.

Sin embargo, el error que se muestra es menor del 4% y por lo tanto se puede considerar que el modelo matemático predice de forma satisfactoria el comportamiento de la liofilización del aguacate.

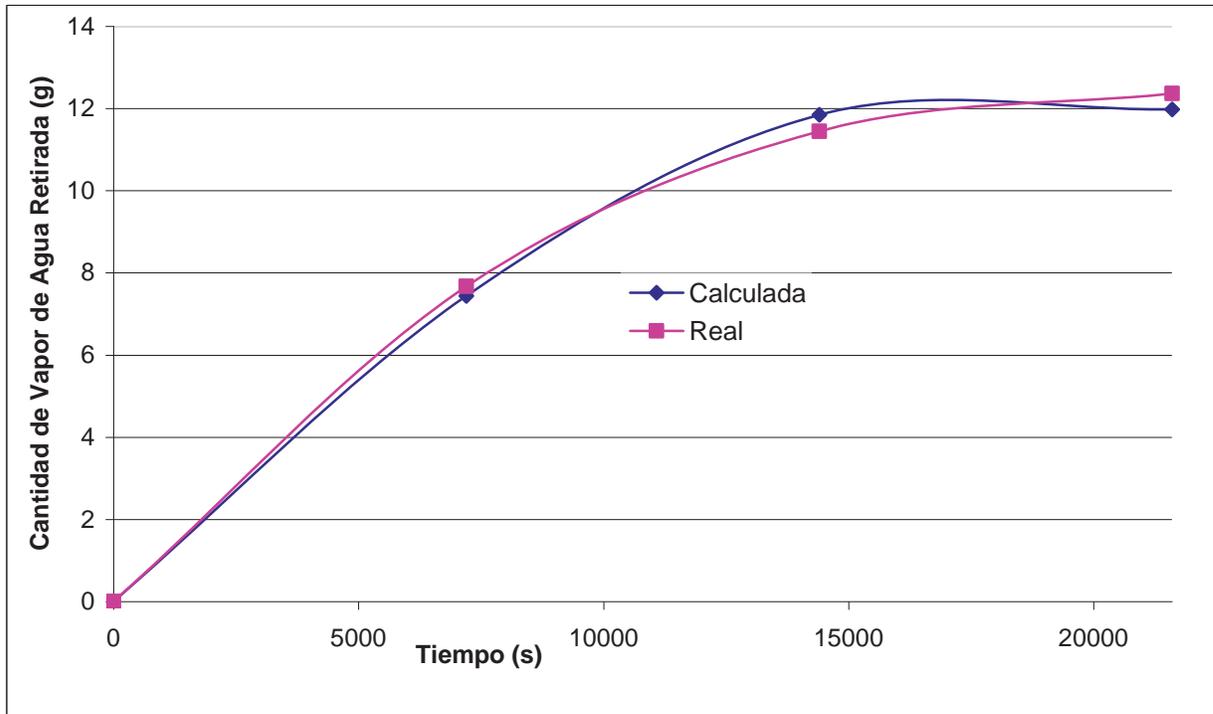


Figura 4.4.2 Comparacion de Resultados para C_A

CONCLUSIONES

Una vez que se ha concluido con este trabajo podemos darnos a la tarea de analizar los resultados obtenidos y resaltar algunos puntos importantes que se pueden destacar:

- A partir de la experimentación se pudo apreciar que la liofilización del aguacate es un proceso que nos permite conservar por mucho tiempo este producto ya que de forma natural el aguacate se madura en pocos días y se oxida en solo un par de horas una vez que se ha partido.
- La cantidad de agua retirada al aguacate fue del 62 % en peso con lo cual se obtiene un producto seco que es fácil de conservar, transportar e incluso de comercializar.
- Se determinó que la principal variable que afecta el proceso de liofilización es el tiempo, debido a que si la muestra de aguacate no se liofiliza el tiempo suficiente se puede obtener un producto pastoso en donde la humedad que no fue retirada hará que el material se deteriore en menor tiempo. Otra variable importante es el espesor de la muestra (δ) ya que si es muy grande es más difícil de extraer el agua que se encuentra más alejada de la superficie de la muestra.
- Se logró el objetivo general del trabajo al obtener un Modelo Matemático en el cual se incluyeron las principales variables que afectan la liofilización para determinar la cantidad de agua retirada.
- Las principales variables incluidas en el Modelo Matemático fueron calculadas a partir de los datos obtenidos experimentalmente, debido a que no se contó con el equipo necesario para obtenerlas directamente y a que el espesor de la muestra fue muy pequeño (1 cm) con lo cual se hacía más difícil medir algunos de los parámetros requeridos como el espesor de la capa seca con respecto del tiempo.

- Al resolver el Modelo Matemático se puede observar que los valores se ajustan satisfactoriamente con respecto de los obtenidos de forma experimental en un 97 % aproximadamente a excepción del tiempo igual a 0 en donde se ajusta en un 100 %.
- Es posible que la pequeña desviación de los datos obtenidos de forma experimental con respecto de los datos obtenidos con el Modelo Matemático se deba principalmente a la forma en como se obtuvieron los valores de las variables que intervienen en el Modelo.
- Las ecuaciones del Modelo Matemático son fácilmente de resolver ya que no requieren de otro software para solucionarlas por tener solución analítica.

RECOMENDACIONES

Para futuros trabajos se hacen las siguientes recomendaciones, con ellas se podrán obtener mejores resultados del modelado y simulación del proceso de liofilización.

- Se recomienda que se propongan métodos para calcular los parámetros de la Difusividad (D_{AB}), espesor de la capa seca de Aguacate (δ) y la densidad del aguacate (ρ_B), para de esta forma tener los datos reales de estas variables y descartar cualquier error que se pueda producir a causa de trabajar con valores calculados con los datos obtenidos experimentalmente.
- Por otra parte, tanto la temperatura como la presión afectan al proceso por lo que se puede realizar la experimentación a diferentes condiciones e incluirlas en el Modelo Matemático considerando que no se mantienen constantes para observar el comportamiento del proceso.
- También se recomienda continuar trabajando con el Modelo Matemático para determinar si alguna de las consideraciones propuestas no es aplicable para este tipo de sistema de proceso. Y de esta forma modificar el Modelo Matemático para que se ajuste de mejor forma a datos experimentales.

BIBLIOGRAFÍA

Artículos de revistas especializadas:

- **Boss E. A., Filho R. M. y Vasco de Toledo E. C., 2004**, “Freeze drying process: real time model and optimization”, Chemical Engineering and Processing, 43, 1475-1485.
- **Bruttini R., Rovero G. y Baldi G., 1991**, “Experimentation and modelling of pharmaceutical lyophilization using a pilot plant”, The Chemical Engineering Journal, 45, B67-B77.
- **Conde H. L. A., Nungaray A. J. y Arriola G. E., 2003**, “Modelado del secado por liofilización y de la rehidratación del “chile poblano” (Capsicum Annuum L. Var. Grossum Sendt Solanáceas)”, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Guadalajara, Memorias del XXIV Encuentro Nacional de la AMIDIQ 2003, 74.
- **Lee K. T., Farid M., Nguang S. K., 2006**, “The matematical modelling of the rehydratation characteristics of fruits”, Journal of Food Engineering, 72, 16-23.
- **Litchfield R. J. Y Liapis A. I., 1979**, “An adsortion-sublimation model for a freeze dryer”, Chemical Engineering Science, 34, 1085-1090.
- **Mannheim S. L. C. H. y Miltz J., 1998**, “Dehydration of Carrot by a Combination of Freeze Drying, Microwave Heating and Airo for Vacuum Drying”, Journal of Food Engineering, 36, 103-111.
- **Sánchez S. S., Zapata A. G. y Campos R. E., 1997**, “Producción Nacional de aguacate y su comercialización”, avocadosource.com /Journals/ CICTAMEX / CICTAMEX_1997/Prod_Nal_Agua.pdf, 2-8
- **Vanaclocha A. C. y Requena J. A., 2002**, “Procesos de conservación de alimentos”, Segunda Edición, Editorial CV., 13, 347-352.

Libros y catalogos:

- **Geankoplis C. J., 1981**, “Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias”, Editorial CECSA, 3ª Edición.

- Sistema de Liofilización Free Zone, Catalogo de Ventas de Equipos.

Paginas Web visitadas:

- botanical-online.com
- bus.sld.cu/revistas/sint/vol4_1_98
- invap.net/indus/liofilización
- monografias.com/trabajos15/
- www-soyentrepreneur.com/pagina

Periódicos revisados:

- El Financiero en línea; 18 de Diciembre de 2006.
- Periódico MILENIO; 8 de Enero de 2007.
- Periódico: La Jornada Michoacán, miércoles 14 de Noviembre de 2007.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación); Boletín, 8 de Enero de 2007.