



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

**PREPARACIÓN DE INGREDIENTES LIOFILIZADOS PARA LA
ELABORACIÓN DE POZOLE INSTANTÁNEO.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA EN ALIMENTOS

PRESENTA:

ERIKA GEORGINA CENTENO GADEA

ASESOR: DR. ENRIQUE MARTÍNEZ MANRIQUE

COASESOR: ING. FERNANDO SOTRES CARRERAS



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.



**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES**

UNAM
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLÁN
ASUNTO: VOTO APROBATORIO

**DRA. SUEMI RODRÍGUEZ ROMO
DIRECTORA DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE**



**ATN: L.A. ARACELI HERRERA HERNÁNDEZ
Jefa del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán**

Con base en el Art. 28 del Reglamento de Exámenes Profesionales nos permitimos comunicar a usted que revisamos la: **TESIS**

Preparación de ingredientes liofilizados para la elaboración de pozole instantáneo

Que presenta la pasante: **Erika Georgina Centeno Gadea**
Con número de cuenta: **30116899-3** para obtener el Título de: **Ingeniera en Alimentos**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

ATENTAMENTE
“POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU”
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 28 de febrero de 2013.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	M. en I. Fernando Beristain	
VOCAL	Dra. Elsa Gutiérrez Cortez	
SECRETARIO	Dr. Enrique Martínez Manrique	
1er SUPLENTE	M. en C. Julieta González Sánchez	
2do SUPLENTE	IA. Verónica Jiménez Vera	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 120).
HHA/pm

*A Dios, el gran Ingeniero,
gracias por permitirme existir*

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por su guía y apoyo, por encender en mí la llama de la curiosidad, de la perseverancia y la imaginación, por enseñarme a tener criterio para seguir mi camino.

A mi hermana Dul por su comprensión y su compañía, por ser una figura a seguir, gracias por siempre cuidarme.

A mis tías y tíos (Carmen, Ney, Chely, Lupe y Yayita, Chema, Juan, Rico, René, Pancho, Manuel, Mario y a sus respectivas familias), que me enseñaron desde ir en bicicleta hasta los nombres de las constelaciones.

A mis primos "grandes", por compartir todas esas travesuras conmigo (Josué, Marianella, Jesús, Manolo, Joselin Luis,) y a mis primos "chicos" por su curiosidad y alegría (Emilio, Ricardo, Omar, Gael, los que aun no llegan y todos los que están del otro lado)

A mis abuelos que ya no están, por su perseverancia e ingenio, por enseñarme que siempre hay una solución a los problemas. Y a mi abuela que aun está con nosotros, por consentirme y cuidar de mí con amor y dedicación.

A mis profesores por tener fe y confianza en mí, por enseñarme todo lo que ahora sé y ser una guía en mi camino. Por ayudarme a probarme a mi misma y a superar cada uno de los retos que significaron sus clases.

A mis asesores Dr, por su paciencia, respeto y por tenerme la confianza al realizar este proyecto.

Y finalmente pero definitivamente no menos importante a mis amigos, a quienes quiero mucho (Chicas: Tannia, Leslie, Flor Maribel, Dulce, Mariana, Dianita Vizuet, Yeni y Mariel y chicos: Said, Ricardo, Miguel, Posti, etc.) por su cariño desinteresado, por su ayuda y comprensión, por estar ahí en los momentos difíciles, por compartir desveladas, materias reprobadas y acreditadas, traumas y éxitos y muchas fiestas.

A mis compañeros de generación y los de otras generaciones con los que seguimos el camino durante todo el tiempo pasado en la carrera.

¡A todos gracias!

AGRADECIMIENTOS ESPECIALES

Al Ing. Fernando Sotres Carreras por su asesoría ayuda y consejo durante la experimentación, sin quien esta tesis no sería posible.

A la Dra. Susana Elisa Mendoza Elvira del laboratorio No 6 de Posgrado Campo 1 por las facilidades prestadas.

Todo el trabajo estadístico se realizó con la asesoría del Ing. Juan Rafael Garibai Bermúdez del departamento de Estadística de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán Campo 4.

Agradezco también a:

I.A. Verónica Jiménez Vera Profesora del Taller de Procesos Tecnológicos de Cereales en la realización de este trabajo.

Proyecto PAPIME- PE-200113

y

Proyecto PACIVE-DOC-19

INDICE

1. Antecedentes	1
1.1. El maíz.....	1
1.1.1. El pozole.....	4
1.2. Características generales de los ingredientes del pozole	5
1.2.1. Lechuga	5
1.2.2. Rábano.....	7
1.2.3. Carne De Cerdo.....	9
1.3. La deshidratación de alimentos.....	10
1.4. Liofilización	12
1.4.1. Equipo de liofilización.....	14
1.4.2. Etapas de la liofilización	15
1.4.2.1. Congelación	16
1.4.2.2. Secado primario	20
1.4.2.3. Secado secundario	22
1.4.3. Características y estabilidad de los alimentos liofilizados	23
1.4.3.1. Porosidad.....	23
1.4.3.2. Rehidratación	24
1.4.3.3. Color y Olor	24
1.4.3.4. Textura	25
1.4.4. Envasado y almacenamiento de productos liofilizados	27
2. Metodología Experimental	29
2.1. OBJETIVOS.....	29
2.2. Cuadro Metodológico	30
2.3. Preparación de las muestra.....	31
a. Lechuga y rábano.....	31
b. Carne.....	32
2.3.1.1. Congelación	32
2.3.2. Liofilización.....	32
2.3.2.1. Curvas de secado y Establecimiento de las condiciones del proceso	33
2.3.2.2. Potencia consumida.....	33

2.3.3.	Envasado	33
2.3.4.	Determinación de Humedad	33
2.3.5.	Porcentaje de Rehidratación	34
2.3.6.	Determinación de Color	34
2.3.7.	Determinación de Textura (Dureza)	35
2.3.8.	Análisis estadístico	35
3.	Resultados y discusión.....	36
3.1.	Determinación de Condiciones de Liofilización	36
3.2.	Determinación de Humedad Final	36
3.3.	Porcentaje de Rehidratación	42
3.4.	Determinación de Color	46
3.5.	Determinación de Textura (Dureza)	57
3.6.	Análisis costo v/s beneficio	62
4.	Conclusiones.....	64
ANEXO 1	Optimización de curvas y actividades previas	66
ANEXO 2	Equipo de Liofilización Utilizado	69
ANEXO 4	Algunos defectos en los rábanos liofilizados.....	75

Lista de Figuras

Figura	Página
Figura 1. Estructura del grano de maíz	1
Figura 2. Maíz cacahuazintle.....	3
Figura 3. Plato típico de pozole.....	4
Figura 4. Lechuga Iceberg.....	5
Figura 5. Rábano	7
Figura 6 Diagrama de fases del agua pura, la línea roja representa el proceso de liofilización.....	14
Figura 7 Esquema general de un sistema de liofilización	15
Figura 8. Evolución de la temperatura y algunos de los parámetros del proceso durante la liofilización de muestras de pechugas de pollo.	16
Figura 9. Comparación de curvas de congelación para agua pura y un alimento representativo con un soluto principal	17
Figura 10. Transferencia de calor y de masa en el secado por congelación	21
Figura 11. Liofilizadora utilizada	32
Figura 12. Sistema CIE Lab	34
Figura 13 Dinamómetro Digital Force.....	35
Figura 14. Curvas de proceso de liofilización de la lechuga para las condiciones A y B con diferentes áreas	38
Figura 15. Curva de secado del rábano a diferentes condiciones y grosores.....	39
Figura 16. Curva de secado de la carne a diferentes condiciones y grosores.....	41
Figura 17. Gráfico de las medias marginales estimadas del porcentaje de rehidratación de lechuga.	43
Figura 18. Gráfico de las medias marginales estimadas del porcentaje de rehidratación de rábano.....	44
Figura 19. Gráfico de las medias marginales estimadas del porcentaje de rehidratación de Carne.	46
Figura 20. Gráfico de las medias marginales estimadas del ΔE de lechuga.	47
Figura 21. Gráficas del cambio en los parámetros L^* , a^* y b^* en la Lechuga	48

Figura 22. Lechugas liofilizadas.....	49
Figura 23. Lechuga. Muestra fresca y vista al microscopio (100X).....	50
Figura 24. Gráfico de las medias marginales estimadas de ΔE del rábano.....	50
Figura 25. Efecto de la temperatura y grosor en los parámetros L^* , a^* y b^* del Rábano ...	51
Figura 26. Rábano, Muestra fresca y liofilizada vista en microscopio (10X).....	52
Figura 27. Rábanos liofilizados.	53
Figura 28. Gráfico de las medias marginales estimadas de ΔE de la carne	54
Figura 29. Carne liofilizada.	55
Figura 30. Vista en microscopio de las fibras de la carne en la liofilización B.	55
Figura 31. Efecto de la temperatura y grosor en los parámetros L^* , a^* y b^* de la Carne ...	56
Figura 32. Gráfico de las medias marginales estimadas del cambio de dureza en lechuga .	59
Figura 33. Gráfico de las medias marginales estimadas del cambio de fuerza de penetración de rábano.	60
Figura 34. Gráfico de las medias marginales estimadas del cambio de dureza en Carne. ...	61
Figura 35. Curvas de secado de lechuga en diferentes condiciones.	66
Figura 36. Curvas de secado del rábano.....	67
Figura 37. Curva de secado en base húmeda de carne de cerdo, las condiciones.	68
Figura 38. Cámara de liofilización del equipo utilizado	69
Figura 39. Condensador del equipo de liofilización.	70
Figura 40. Bomba de vacío.....	71
Figura 41. Alabes de la bomba de vacío LABCONCO.	71
Figura 42. Defecto en algunos rábanos	75

Índice de Tablas

Tabla 1. Composición química proximal de las partes principales de los granos de maíz. ...	2
Tabla 2. Composición química proximal de la lechuga.	7
Tabla 3. Composición química proximal del rábano	8
Tabla 4. Composición química proximal de cortes de cerdo en 100g	9
Tabla 5. Cortes de la lechuga	31
Tabla 6. Corte del rábano	31
Tabla 7. Corte de la carne de cerdo	32
Tabla 8. Condiciones de rehidratación.....	34
Tabla 9. Condiciones del proceso de liofilización para las diferentes muestras	36
Tabla 10. Humedades después de la liofilización.....	37
Tabla 11. Porcentajes de rehidratación de muestras liofilizadas	42
Tabla 12. Cambio de color en las muestras liofilizadas y rehidratadas	47
Tabla 13. Cambio de Dureza en muestras liofilizadas y rehidratadas	57
Tabla 14. Tabla comparativa del gasto de energía en los procesos de liofilización	63
Tabla 15. Resultados del ANOVA para el porcentaje de Rehidratación en lechuga.....	73
Tabla 16. Resultados del ANOVA para el porcentaje de Rehidratación en rábano.	73
Tabla 17. Resultados del ANOVA para el porcentaje de Rehidratación en carne	73
Tabla 18. Resultados del ANOVA del cambio de total de color (ΔE) en lechuga.	73
Tabla 19. Resultados del ANOVA del cambio de total de color (ΔE) en rábano.	74
Tabla 20. Resultados del ANOVA del cambio de total de color (ΔE) en carne.	74
Tabla 21. Resultados del ANOVA del cambio en la dureza de la lechuga.....	74
Tabla 22. Resultados del ANOVA del cambio en la dureza del rábano	74
Tabla 23. Resultados del ANOVA del cambio en la dureza de la carne	75

Resumen

Un producto ampliamente consumido en México es el pozole, aunque no existe en el mercado como comida instantánea, debido a que los ingredientes deshidratados de alta calidad son conseguidos solo con pocas técnicas, una de estas, es la liofilización que conserva las características con productos de larga vida útil; aunque es una operación compleja y poco estudiada. El objetivo de este trabajo fue determinar las condiciones de liofilización más favorables para la conservación de las características físicas del rábano, carne y lechuga; utilizados como ingredientes para un pozole instantáneo; evaluando la influencia de parámetros del proceso (2 niveles de temperatura de proceso [condiciones A y B]) y de la muestra (2 áreas en lechuga y 2 grosores en carne y rábano), en las características de calidad del producto (% de rehidratación [%Rh], cambio de color [ΔE] y cambio de dureza [ΔF]), se utilizó un diseño factorial 2 x 2 totalmente al azar con 6 repeticiones. Finalmente, se midió el consumo de energía del equipo para cada condición. Los resultados mostraron que la lechuga tuvo poca retención de propiedades debido a al área y su sensibilidad a las condiciones del proceso. Se logró un menor ΔE y ΔF , así como %Rh con temperaturas de -17° y -10° del secado primario (SP) y 5° de secado secundario (SS) con una muestra de área 2x2cm. En el caso del rábano, las condiciones afectaron notablemente sus características, debido a su estructura y composición, sobre todo a temperaturas de liofilización de -34° y -20° de SP y de -10° y 10° de SS. El rábano tuvo una mayor influencia de la temperatura para mantener los parámetros como %Rh y ΔE , hubo interacción con los niveles de variación del grosor, mientras que éste último fue la única variable que afectó significativamente el ΔF . Las mejores características se mantuvieron con temperaturas de -17 y -10° de SP y -5° de SS, con muestras de 4mm de grosor. Los parámetros de la carne se vieron influenciados en todos los casos por la temperatura, teniendo interacción con el grosor en el ΔE y ΔF ; se lograron las mejores características a -20° de congelación, -17° de SP y 5° SS con un grosor de 2.5mm, siendo la carne la que tuvo menor cambio en sus características. El consumo de energía varió según la temperatura, a mayor temperatura menor tiempo de proceso y por tanto menor consumo energético del equipo. Los análisis señalaron que los mejores resultados se obtuvieron en todos los casos con procesos menos intensos, un área mayor y menor grosor.

Palabras clave: *Liofilización, deshidratación, pozole, rábano, lechuga, carne de cerdo.*

INTRODUCCIÓN

Uno de los granos más utilizados en México es el maíz, base de la dieta del mexicano, el consumo de este grano ha crecido en las últimas décadas, llegando en el 2010 a casi 25.11 millones de toneladas anuales (Calva, 2007). De las variedades del maíz que se consumen, destaca el maíz cacahuazintle utilizado como base en la preparación de pozole, especie de caldo al que se le agrega carne de cerdo o pollo como ingrediente y saborizante; además de lechuga y rábano al momento de servirse (Arroyo y Echeverría, 1983). El pozole es considerado dentro de los platillos más representativos de la comida mexicana, sin embargo, es laborioso y muy tardado en su preparación.

En el mundo actual, el ritmo de vida cotidiano es muy rápido y las personas prefieren comprar “comidas listas para comer”, que se caracterizan por ser platillos de fácil preparación pero externos a nuestra cultura y de baja calidad nutrimental. Por lo tanto, desarrollar un alimento como el pozole, con alto grado nutrimental, alta aceptación y que sea de rápida preparación, sería una buena opción para el consumidor. Estos productos requieren procesos que mantengan las cualidades del alimento, para que en pocos minutos esté listo para comer. Sin embargo, la mayoría de estos procesos de conservación, no mantienen las propiedades estructurales, ni nutrimentales del alimento. Por lo que la elección del método correcto de preservación es la clave para mantener la calidad del producto. En el secado, la eliminación de agua de los materiales de proceso u otras sustancias se usa como técnica de preservación (Márquez de la R. y Arroyo, 2006); ya que los microorganismos que provocan la descomposición de alimentos no pueden crecer ni multiplicarse en ausencia de ella, además muchas reacciones enzimáticas y reacciones de deterioro no se pueden realizar sin agua (Geankoplis, 2006).

Desafortunadamente, la calidad de un producto secado convencionalmente (con aire caliente), es drásticamente reducida, comparada con el alimento original; en aspectos físicos tales como el color y la estructura y el sabor. Además de desarrollar reacciones bioquímicas indeseables como el deterioro de compuestos aromáticos o degradación de sustancias nutricionales (Ratti, 2001).

Una mejor técnica de deshidratación de alimentos es la liofilización, en la que la remoción de agua del producto se lleva a cabo por sublimación y desorción (Alzamora, 2008). Esta técnica mantiene las características sensoriales y nutrimentales del alimento al evitar altas

temperaturas, a pesar de que el proceso es caro, es ampliamente utilizado para alimentos de alto valor y para sopas instantáneas, aunque aún no se han estudiado todos los efectos y leyes que intervienen en ella (Snowman, 1997; Ratti, 2001).

La liofilización se lleva a cabo en 3 etapas esenciales: el congelado inicial, secado primario y secado secundario (López-Malo & Palou, 2008). Cada una de las etapas tiene características únicas y variables que pueden afectar la calidad del producto (Franks, 1998), y es una operación compleja en que se llevan a cabo transferencias de calor y masa simultáneamente (Geankoplis, 2006).

Por otra parte, en el grupo de trabajo se ha desarrollado previamente la deshidratación de maíz cacahuazintle para elaborar un pozole instantáneo, pero la preparación de los demás ingredientes del pozole como la carne, el rábano y la lechuga no se ha hecho.

Es por eso que en este trabajo se plantea como objetivo estudiar el proceso de deshidratación por liofilización de carne, lechuga y rábano, al variar las condiciones del proceso y evaluar el efecto en sus características físicas, de textura y sensoriales, y determinar las condiciones más favorables para obtener productos de alta calidad para elaborar un pozole instantáneo.

1. ANTECEDENTES

1.1. EL MAÍZ

El maíz. *Zea mays* L., es uno de los granos alimenticios más antiguos que se conocen. Pertenece a la familia de las Poáceas (Gramíneas), tribu Maydeas, y es la única especie cultivada de este género (FAO, 1993), es el producto de la domesticación de una planta más parecida a un pasto llamado teosinte. El corte de grano de maíz se observa en la figura 1.

El maíz es un grano básico no solamente para el continente americano. México lo ha utilizado como alimento para su población desde tiempos antiguos. Podemos decir, con toda propiedad, que los agroecosistemas mexicanos surgen a partir de la domesticación del maíz, lo que aconteció hace 9,000 años. Cuando los humanos (cazadores y recolectores) consumían las cañas jóvenes de teosinte -masticándolas o succionándolas- para obtener los jugos azucarados de ellas o de su fermentación.

Posteriormente, una mega mutación genética -ocurrida hace unos 7,000 a 8,000 años- permitió la domesticación del maíz, al modificar su glumen externo. Esta modificación permitió la reducción de su tamaño y su suavización, factores que hicieron posible el consumo humano (González, 2008)

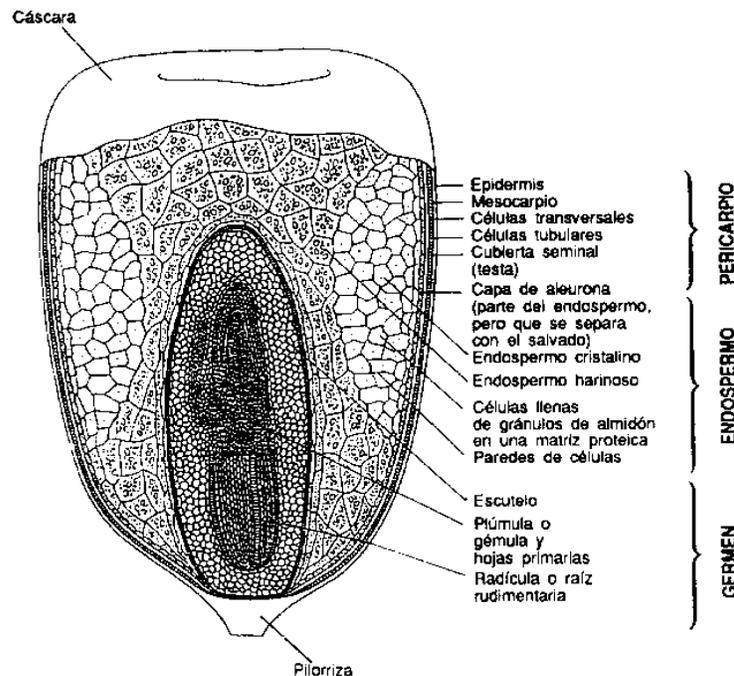


Figura 1. Estructura del grano de maíz. Fuente: Hosney, 1991.

El grano de maíz se denomina en botánica cariósipide; cada grano contiene el revestimiento de la semilla, o cubierta seminal, y la semilla, como se ve en la **Figura 1**, que muestra también las cuatro estructuras físicas fundamentales del grano: el pericarpio, el endospermo, el germen y la pilorriza (tejido inerte en que se unen el grano y el carozo).

Las partes principales del grano de maíz difieren considerablemente en su composición química (ver **Tabla 1**). La cubierta seminal o pericarpio se caracteriza por un elevado contenido de fibra cruda, aproximadamente el 87 %, la que a su vez está formada fundamentalmente por hemicelulosa (67 %), celulosa (23 %) y lignina (0,1 %). El endospermo, en cambio, contiene un nivel elevado de almidón (87 %), aproximadamente 8% de proteínas y un contenido de grasas crudas relativamente bajo.

Tabla 1. Composición química proximal de las partes principales del grano de maíz (%).

Componente químico	Pericarpio	Endospermo	Germen
<i>Proteínas</i>	3,7	8,0	18,4
<i>Extracto etéreo</i>	1,0	0,8	33,2
<i>Fibra cruda</i>	86,7	2,7	8,8
<i>Cenizas</i>	0,8	0,3	10,5
<i>Almidón</i>	7,3	87,6	8,3
<i>Azúcar</i>	0,34	0,62	10,8

Fuente: FAO, 1993

Por último, el germen se caracteriza por un elevado contenido de grasas crudas, el 33 por ciento por término medio, y contiene también un nivel relativamente elevado de proteínas (próximo al 20 por ciento) y minerales (FAO, 1993).

El maíz, desde un punto de vista nutricional, es superior a muchos otros cereales, pues es rico en grasa, hierro y fibra, pero es pobre en contenido de aminoácidos esenciales (Ripusudan, 2001).

Gran parte de la diversidad genética del maíz se concentra en América, principalmente en México, donde se consume en forma de “tortillas”, “pinoles”, “atoles”, “tostadas”, “botanas”, “tamales” y “elotes”, entre otros alimentos. La elaboración de cada uno de esos productos requiere de granos con características de color, tamaño y dureza específicas (Narváez, 2007). Un ejemplo de ello es el maíz cacahuazintle con el cual se produce el pozole. La figura 2 muestra mazorcas de esta variedad específica de maíz cacahuazintle.

El grano del maíz cacahuazintle se caracteriza por ser de color blanco, textura harinosa y de tamaño grande (**Figura 2**), y que se produce únicamente en localidades del Estado de México, Puebla y Tlaxcala. Su centro de origen y distribución se localizan en la Mesa Central. Por ser un tipo de maíz con un nicho ecológico muy específico, los productores que se dedican a su cultivo son únicos en su género.



Figura 2. Maíz cacahuazintle Fuente: CIMMYT, 2010

El grano de maíz Cacahuazintle para la preparación de pozole se comercializa principalmente en dos presentaciones: maíz entero y despuntado, que representan el 20 y 65% del volumen total producido, respectivamente. El maíz entero es absorbido por las agroindustrias que producen grano precocido, en tanto que el "despuntado" es consumido por las amas de casa que gustan del pozole preparado de manera tradicional.

No obstante, las características que debe poseer el grano del maíz cacahuazintle para elaborar un pozole no son bien conocidas. De manera empírica se considera que el grano tiene que tener un tiempo corto de cocimiento para reventado, y que una vez reventado no se desbarate, que el caldo no sea muy espeso, que el grano sea blanco y de textura agradable (Bonifacio, 2005).

Las características físicas del grano cacahuazintle son: una forma globosa y redondeada, con un peso hectolítrico de 60.4 Kg/hL y una densidad de 1.07g/mL que es menor que la de los maíces dentados (Bonifacio, 2005).

1.1.1. EL POZOLE

El *Diccionario breve de mexicanismos de la Academia Mexicana de la Lengua* señala: «*pozole*: del náhuatl *pozolli*, literalmente “espumoso”, de *pozol* “espuma”, o del *cahíta posoli* “cocer maíz”». Es una especie de sopa de un maíz especial llamado cacahuazintle al que se le agrega carne de cerdo o pollo como ingrediente y saborizante (Arroyo, 1983), se sirve con lechuga y/o col rebanados en tiras, cebolla picada, rábanos, orégano seco y salsa picante elaborada con chile de árbol y vinagre (**Figura 3**) (Castro, 2006).

Es un platillo ancestral y un claro ejemplo del mestizaje culinario que dio origen a lo que hoy es la comida mexicana más tradicional. El pozole parece haber sido, durante la época de los aztecas, un plato ceremonial destinado a las festividades religiosas que sólo podía ser ingerido por el emperador o los sacerdotes del más alto rango. Algunas leyendas cuentan que al conquistador español Nuño Beltrán de Guzmán se le dio de comer cuando conquistó a los mexicas (Castro, 2006).



Figura 3. Plato típico de pozole.

En su trayectoria de varios siglos por la historia de México, el pozole ha recorrido todo el territorio nacional, e incluso algo del internacional, recogiendo a su paso ingredientes novedosos que se han incorporado para hacerlo más exótico. De forma que al tradicional blanco se le puede añadir tomate verde molido para que adquiera ese color (como es preparado en el estado de Guerrero), o bien ponerle chicharrón (como en Michoacán), queso blanco (típico de Colima), o sardina (como en algunas regiones costeras); en gustos

se rompen géneros, pero la receta tradicional, o la que más se conoce, es la del estado de Jalisco, que se tiñe con una salsa de chile ancho o guajillo asado, despepitados, remojado y molido (Rosete, 2010).

Además es uno de los platillos más ampliamente conocidos de la comida tradicional mexicana, según la encuestadora Mitofsvky, el 96% de los mexicanos lo han probado por lo menos una vez (Mitofsvky, 2010). Es un platillo único en varios sentidos: por su sabor y por su proceso de elaboración que implica una serie de operaciones complejas como la nixtamalización, la cocción del grano y la carne; el corte, rebanado y desinfectado de la lechuga y el rábano. Y además es uno de los platillos representantes de la comida mexicana que fue declarada en el 2010 como patrimonio inmaterial de la humanidad por la UNESCO (Vargas & Montaña, 2010).

Debido a la gran aceptación del producto, el poderlo consumir sin invertir el tiempo normal de preparación sería una opción de estudio, que se puede llevar a cabo por diversos medios, por ejemplo la deshidratación; y aunque ya existe en el mercado el producto deshidratado con aire caliente, sus características dejan mucho que desear. Una alternativa a este problema es el uso de la liofilización, ya que mantiene en mejores condiciones las cualidades del producto.

1.2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS INGREDIENTES DEL POZOLE

1.2.1. LECHUGA

La lechuga es la hortaliza para ensaladas más popular y es de gran importancia comercial, es originaria de la región del mediterráneo (Salunkhe & Kadam, 2004). Es una planta anual perteneciente a la familia de las *Compositae*, cuyo nombre científico es *Lactuca sativa* L.

Se distinguen 4 diferentes especies botánicas de las cuales la utilizada en la presente tesis es la *L. sativa* var. *Capitata* L observa en la **Figura 4**, mejor conocida como Iceberg, que incluye los cultivares que forman un cogollo apretado de hojas, y su forma suele ser ancha, orbicular, etc.

La lechuga produce una raíz central que se desarrolla en la capa superficial del suelo, se producen un gran número de hojas; las hojas externas son normalmente verdes o verdes oscuras y las hojas interiores son de color ligeramente verde o blancuzco muy tiernas y crujientes.

La lechuga es una fuente rica en vitamina A, y minerales como el calcio y el hierro (Tabla 2). La composición química de la lechuga varía según el tipo, variedad, prácticas de cultivo y condiciones ambientales en la que se desarrolla. La lechuga también contiene proteínas, carbohidratos y vitaminas, aunque la vitamina C se pierde si se cuece. También se sabe que la lechuga actúa como un sedante, diurético y expectorante. (Salunkhe & Kadam, 2004).



Figura 4. Lechuga Iceberg Fuente: INFOAGRO, 2010

El daño mecánico es una de las principales causas de pérdida de la calidad y rechazo en la lechuga sin envolver. La lechuga es muy susceptible a la pérdida de agua, debido a que tiene una gran superficie expuesta al ambiente y un espesor muy delgado, los síntomas de pérdida de agua se reflejan como pérdida de firmeza y turgencia en las hojas y un deterioro en la apariencia de las mismas; pierden su apariencia fresca y se ven marchitas (Cerdas & Montero, 2004).

La lechuga es un producto muy perecedero y se deteriora rápidamente cuando se incrementa la temperatura, la velocidad de respiración se incrementa en gran medida y la vida en almacenamiento disminuye según se incremente la temperatura del almacén en un rango de 0° a 25° C, la hoja de la lechuga respira al doble de velocidad que la cabeza de la lechuga (Salunkhe & Kadam, 2004).

La desinfección de la lechuga es muy importante ya que se ha reportado que puede ser portadora de organismos patógenos como: *Escherichia Coli* O157 H7 del tipo enterotoxigénica y enteroinvasiva, algunas especies de *Shigella*, *Salmonella spp*, *Staphylococcus spp*, *Listeria monocytogenes*; parásitos como *Cyclospora cayentanesis* y virus como el de la hepatitis A (Murray, 2009; Luna *et al.*, 2008; Kader, 2007).

Tabla 2. Composición química proximal de la lechuga.

Componente químico	Cantidad
Calorías	18 Kcal
Agua	95.8 g
Proteína	0.9 g
Grasa	0.1 g
Cenizas	0.9 g
Carbohidratos	0.4 g
Fibra	1.7 g
Calcio	16 mg
Potasio	230 mg
Vitamina C	24 mg
B-Caroteno (Vit. A)	0.1mg

Fuente: Will et al, 1999

1.2.2. RÁBANO

Esta hortaliza es probablemente originaria de China y Asia Central (**Figura 5**). Las raíces de rábano crudo se comen en ensalada o cocinadas como hortalizas. Es una hortaliza de gran poder diurético y antiescorbútico (Maroto, 1992) y en la medicina antigua se usaba para el hígado y dolencias de la vesícula. El rábano pertenece a la familia *Cruciferae* y su nombre científico es *Raphanus sativus L.*, es una planta tanto anual como bianual.



Figura 5. Rábano Fuente: Intersemillas, 2012

La composición química del rábano se muestra en la Tabla 3. El rábano contiene glucosa como azúcar principal y cantidades menores de fructosa y sacarosa. También pueden estar

presentes la pectina y pentosas. Es una buena fuente de vitamina C, contiene 15-40mg por cada 100g de porción comestible y aporta una amplia variedad de minerales (Salunkhe & Kadam, 2004). El sabor picante característico del rábano es debido a la presencia de Isotiocianatos volátiles, el 4-metiltio-3-t-butenilisotiocianato (Fennema, 2010) y el color rosa de la piel es debido a la presencia de antocianinas.

Tabla 3. Composición química proximal del rábano

Componente químico	Cantidad
Calorías	20 Kcal
Agua	94 g
Carbohidratos	3.59 g
Grasas	0.54 g
Proteínas	0.6 g
Fibra	1.6 g
Cenizas	0.54 g
Calcio	21 mg
Magnesio	9 mg
Potasio	232 mg
Fósforo	18 mg
Sodio	24 mg
Hierro	0.29 mg
Tiamina	0.005 mg
Riboflavina	0.045 mg
Niacina	0.3 mg
Ácido ascórbico (Vit. C)	22 mg

Fuente: FAO, 2011.

Estas hortalizas y tubérculos contienen más de 90g de agua/100g de producto. Y está en función del contenido de agua que haya tenido disponible el tejido al efectuarse la cosecha. El contenido de humedad cobra importancia durante la deshidratación ya que nos da una idea de la pérdida de peso que se espera para el producto durante la liofilización.

Los carbohidratos de las hortalizas y tubérculos están constituidos por sacarosa, glucosa y fructosa; una parte sustancial de los hidratos de carbono de estos alimentos está formada por la fibra dietética, constituida por celulosa, sustancias pécticas y hemicelulosas. La lignina es un polímero complejo de compuestos aromáticos, ligados por unidades de propilo y se encuentran entre los principales componentes de fibra dietética (Will *et al.*, 1999). En el rábano la cantidad de lignina es de 0.04g por 100 de producto.

La flora microbiana de hortalizas y tubérculos reside en su superficie, como consecuencia de su contacto con el suelo, aire y animales. El pH de estos alimentos suele ser neutro, por

lo que entre su microflora son más frecuentes las bacterias que las levaduras. Las especies bacterianas que predominan pertenecen a los géneros: *Achromobacter*, *Flavobacterium*, *Alcaligenes*, *Micrococcus* y *Lactobacillus*. Entre los mohos, son frecuentes los géneros *Penicillium*, *Alternaria*, *Fusarium*, *Botrytis*, etc. En las raíces y tubérculos se encuentran formas esporuladas de los géneros *Bacillus* y *Clostridium*. Cuando se riegan con aguas fecales, *Salmonella*, *E. coli* y otras *Enterobacteriaceae*. El riego con aguas fecales puede ser, igualmente la causa de transmisión de parásitos que suponen un peligro en el caso de las hortalizas que se consumen crudas (Pascual y Calderón, 2000).

1.2.3. CARNE DE CERDO

La carne se define como el alimento procedente de la musculatura de los animales, resultante de la transformación de éste a través de una serie de procesos fisicoquímicos y bioquímicos que se desarrollan a consecuencia del sacrificio animal (Lawrie, 1998).

La carne de cerdo es un alimento excelente por su alto valor nutritivo, debido a su riqueza proteica. Las proporciones de cenizas, proteína, agua y grasa de la carne del cerdo están reguladas por la genética, así como por factores ambientales. Las de grasa y agua varían en la canal, en relación inversa, de modo que según avanza el engorde del animal, desciende su contenido de agua. Los porcentajes de proteína y cenizas permanecen casi constantes, aunque tienden a disminuir ligeramente en los animales cebados (Monge-Calvo, 2005). Del contenido total de nitrógeno del músculo, aproximadamente el 95% es proteína y el 5% pequeños péptidos, aminoácidos y otros compuestos. La calidad de la proteína es muy alta, aporta cantidades sustanciales de lisina y treonina y cantidades adecuadas de metionina y triptófano.

Tabla 4. Composición química proximal de pierna de cerdo en 100g

Componente químico	Pierna
Agua	59.8g
Proteínas	17.7g
Grasa	20.2g
Cenizas	0.9g

Fuente: Gil-Hernandez, 2010

La carne tiene un contenido de lípidos relativamente alto, sin embargo el contenido de colesterol en músculo magro es comparativamente bajo, y la saturación de las grasas para la carne de cerdo es menor que para carnes de ovino y vacuno (Varnam & Sutherland, 1998). Es importante resaltar el contenido de grasa en la carne ya que influirá directamente en las características obtenidas en el producto deshidratado y en su comportamiento durante el proceso de liofilización y su estabilidad en el almacenamiento. La carne de cerdo constituye también una fuente notable de algunos elementos minerales, aunque es deficiente en otros. Es rica en fósforo, potasio, hierro, zinc, manganeso y magnesio. Carece casi totalmente de calcio y es pobre en sodio, además la disponibilidad biológica de minerales es muy elevada (Monge-Calvo, 2005).

Para la elaboración de pozole, se utilizó, carne magra de cerdo, que es corte de pierna. En la Tabla 4 se enlista la composición química de éste corte.

La carne es uno de los alimentos más perecederos. Debido a sus características de composición, pH y actividad de agua, constituye un medio muy favorable para la mayor parte de las contaminaciones microbianas. Las cuales generalmente son generadas por las condiciones higiénicas de la manipulación, del matadero y del almacenaje. Algunos de los microorganismos importantes en estos productos son; *Escherichia coli*, *Salmonella*, *Staphylococcus aureus* y *Clostridium perfringens*. (Pascual y Calderón, 2000).

1.3. LA DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS

El agua es, por mucho, el principal constituyente de todos los tejidos vivos, ya que representa generalmente al menos el 60% de su composición y hasta un 96- 97% en algunas frutas y hortalizas. El agua influye en las propiedades de los alimentos y, a su vez, los componentes de los alimentos influyen en las propiedades del agua. Y sus propiedades fisicoquímicas influyen también en el diseño de procesos para conservación y transformación de los alimentos.

Uno de los métodos más antiguos para la conservación de los alimentos es la deshidratación, que en general se refiere a la eliminación de la mayor parte del agua contenida en el alimento. Y la razón principal de la deshidratación de alimentos es aumentar su vida útil, más allá que la del material fresco, sin la necesidad de transporte o

almacenamiento refrigerado, también reduce el peso del alimento lo que conduce a un ahorro substancial en los costos de transporte y almacenamiento.

Esto se logra reduciendo la humedad disponible o la actividad de agua hasta un nivel que inhibe el crecimiento y desarrollo de microorganismos patógenos de los procesos de deterioro, reduciendo la actividad de las enzimas y la velocidad a la que ocurren los cambios químicos no deseables (Badui, 2006).

Cabe resaltar que en los alimentos, tanto tejidos animales como vegetales, el agua no está uniformemente distribuida por muchas razones, por ejemplo, por los complejos hidratados que se producen con proteínas, los hidratos de carbono, las diversas estructuras internas propias de cada tejido, las propiedades hidrofílicas de las moléculas de las células u organelos del alimento. Por estas razones, en los alimentos existen diferentes estados energéticos en los que se encuentra el agua, lo cual afecta procesos como la congelación y la deshidratación de alimentos (Badui, 2006).

Comúnmente secar un material se logra por evaporación del agua líquida que este contiene, la salida forzada del agua rompe estructuras a su paso, con la consiguiente pérdida de volumen. Esto frecuentemente resulta en cambios profundos en apariencia, sabor y la rehidratación es difícil.

En general la deshidratación se describe como una operación de transferencia simultánea de energía y materia. La evaporación del agua viene provocada por la transferencia de calor sensible y de calor latente al alimento. Los procesos de secado se clasifican de acuerdo con las condiciones físicas usadas para adicionar calor y extraer vapor de agua como sigue (Geankoplis, 2006):

- Añadiendo calor por contacto con aire caliente a presión atmosférica, y el vapor de agua formado se elimina por medio del mismo aire.
- En el secado al vacío, la evaporación del agua se verifica con mayor rapidez a presiones bajas y el calor se añade indirectamente por contacto con una pared metálica o por radiación.
- En la liofilización, el vapor de agua se sublima directamente desde el alimento congelado.

Es importante resaltar que la aceptación del producto, está en función de la conservación de las características de los ingredientes. La liofilización produce alimentos que conservan sus

mejor sus propiedades físicas, nutrimentales y sensoriales, durante y después del proceso de deshidratación; es por eso que se ha elegido como método de secado de los ingredientes del pozole instantáneo en este trabajo.

1.4. LIOFILIZACIÓN

La liofilización como proceso industrial se desarrolló en los años 50 del siglo XX, pero sus principios eran ya conocidos y empleados por los incas en los Andes cerca del 200 a. C. para conservar papas y carne de llama. Estos eran dejados congelar con el frío de la noche y en el día con los primeros rayos del sol y las bajas presiones de las elevadas montañas andinas, se producía la sublimación del hielo (Rangel, 2004).

Aunque E. W. Flosdorf y S. Mudd introdujeron el término liofilizar en 1935, no fue sino hasta 1943 que el profesor Alexander Fleming propuso formalmente el término liofilización, que proviene de los términos griegos “luen”, solvente y “phileo”, amigo (Ramírez - Nava, 2006). Una definición en base a estos términos no existe; sin embargo, según una interpretación personal significaría la separación de componentes unidos íntimamente (solvente-disolvente).

La liofilización cobra importancia durante la Segunda Guerra Mundial donde se utiliza para conservar plasma sanguíneo y la preparación de los primeros antibióticos, y posterior a la guerra en los años 50's y 60's cuando hubo grandes desarrollos. Se esperaba que el proceso fuera en aumento en esos años, pero debido a su alto costo y a que en Estados Unidos y Europa se establecieron sistemas de distribución y de almacenaje de alta eficiencia para productos congelados y refrigerados se restringió el mercado para los productos liofilizados (Alzamora, 2008).

Sin embargo, en los últimos años ha vuelto a tomar importancia debido a la alta calidad de los productos obtenidos y como por ejemplo para secar café, enzimas, algunos ingredientes alimenticios y otros alimentos de alto valor agregado.

La liofilización evita muchos de los problemas del secado en fase líquida. Hay una buena retención del aroma, sabor, nutrientes y el encogimiento es pequeño. La textura es aceptable, especialmente en vegetales, debido a que la red molecular espacial está posicionada durante todo el proceso. Los productos liofilizados pueden ser almacenados a temperatura ambiente por periodos largos y la rehidratación es fácil (Snowman, 1997).

A continuación se enumeran las principales características de los productos alimenticios liofilizados.

1. Deshidratación total (99 %).
2. Rápida y completa rehidratación
3. La red molecular espacial está posicionada.
4. Eficaz para la mayor parte de los alimentos Se emplea cuando los otros medios resultan ineficientes
5. Temperaturas inferiores a las del punto de congelación
6. Presiones inferiores a la atmosférica (27-133 Pa)
7. El agua se sublima desde el frente de hielo
8. Migración de solutos mínima
9. Sólo elimina agua y algunos solventes.
10. Posibilidad de trabajar en esterilidad.
11. Posibilidad de dejar el producto en alto vacío.
12. Preservación incrementada exponencialmente
13. No altera la estructura fisicoquímica del material original crudo a diferencia de los procesos con calor, la liofilización incrementa el aspecto, textura, sabor y aroma del alimento ya que no se pierden sino que se intensifican.
14. Las partículas del material deshidratado poseen menos densidad que el alimento original
15. Olores, colores y aromas generalmente normales

(Fellows, 2007)

La liofilización se lleva a cabo en tres diferentes etapas. El primero es una pre-congelación hasta una temperatura donde el material es completamente sólido. La segunda etapa es la sublimación o primer secado, en la que todo el hielo libre es removido, dejando un material aparentemente seco, el cual sin embargo, puede contener una cantidad significativa de agua ligada. La tercera y última etapa es la desorción o segundo secado, donde el agua ligada es removida (Snowman, 1997).

El principio de la liofilización, es producir una presión de vapor tan grande como sea posible, la sublimación se logra con un gradiente de presión de vapor entre el entorno del producto y el frente del hielo del interior del mismo (Brennan, 1998). La sublimación

ocurre cuando la presión y la temperatura están por debajo del punto triple, esto es 4.58mmHg (610.61 Pa, 0.006 atm) y 0.01° C (**Figura 6**). El diagrama de fases está separado por líneas en tres regiones, las cuales representan los estados termodinámicos del agua; sólido, líquido y gaseoso, en un sistema cerrado.

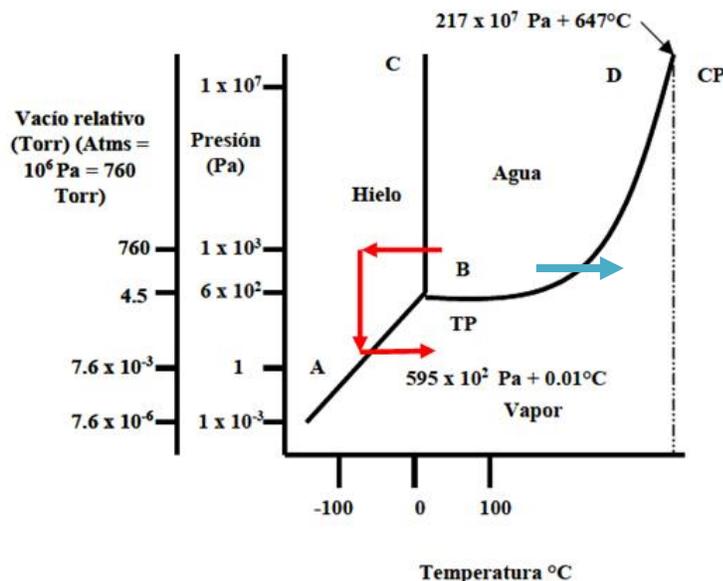


Figura 6 Diagrama de fases del agua pura, la línea roja representa el proceso de liofilización. Fuente: Rangel, 2004.

Los puntos a lo largo de las líneas de separación, representan la combinación de temperatura y presión en la cual dos estados están en equilibrio: equilibrio líquido-gas (B-D), equilibrio líquido-sólido (B-C) y equilibrio sólido-gas (A-B), condiciones donde tiene lugar la liofilización. La sublimación es endotérmica y el calor de sublimación es del orden de 680Kcal/kg (2838KJ/Kg). El punto TP representa la única combinación de temperatura y presión en la cual los 3 estados, están simultáneamente en equilibrio y es llamado el punto crítico (Alzamora, 2008).

La liofilización está representada en la **Figura 6**, donde las líneas rojas muestran el proceso desde la congelación y la sublimación, y la línea azul representa la evaporación del agua en el proceso de secado con aire caliente.

1.4.1. EQUIPO DE LIOFILIZACIÓN

Existen muchas formas de liofilización, según la muestra a trabajar, como también existen diferentes modelos de liofilizadores, para laboratorio, planta piloto o industriales. En general los equipos de liofilización son como el mostrado en la **Figura 7**, consiste de tres

partes principales, una cámara de secado, un sistema de condensación y un sistema de vacío (Ramírez - Nava, 2006):

- La cámara de secado puede tener o no un sistema de refrigeración que mantenga la muestra a la temperatura deseada y agregar energía para generar la sublimación del hielo de la muestra.
- El condensador que atrapa todo el vapor de agua generado durante la liofilización, condensándolo para evitar que el vapor migre de regreso a la cámara o llegue al sistema de vacío.
- El sistema de vacío, es una bomba que puede coleccionar los gases no condensables, y que mantiene el agua congelada y favorece la sublimación del agua de la muestra. Ver anexo 2 para las características específicas.

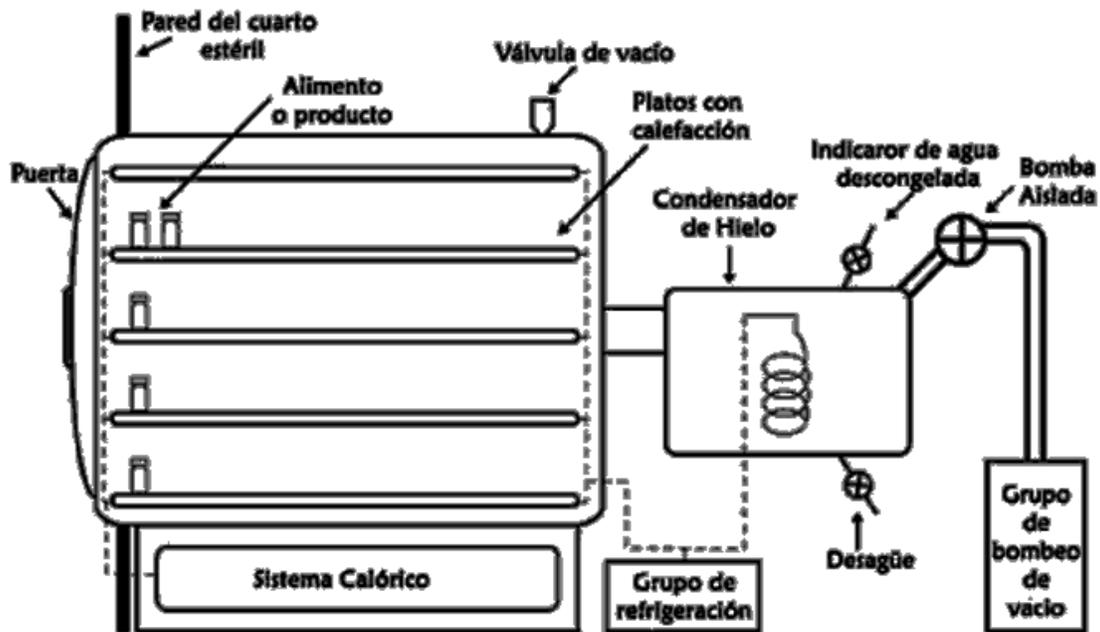


Figura 7 Esquema general de un sistema de liofilización. Fuente: Ramírez-Nava, 2006.

1.4.2. ETAPAS DE LA LIOFILIZACIÓN

La liofilización involucra 3 etapas esenciales: el congelamiento inicial o pre-congelación, secado primario, y secado secundario.

La **Figura 8**, muestra el proceso de liofilización de cortes de pechuga de pollo, se aprecia la separación para cada una de las etapas del proceso, la congelación, el primer y segundo secado.

La naturaleza del material húmedo inicial, ejerce una mayor influencia en el proceso, la selección y preparación de los alimentos antes del proceso es importante, sólo se deberá usar material de alta calidad y sin daño alguno.

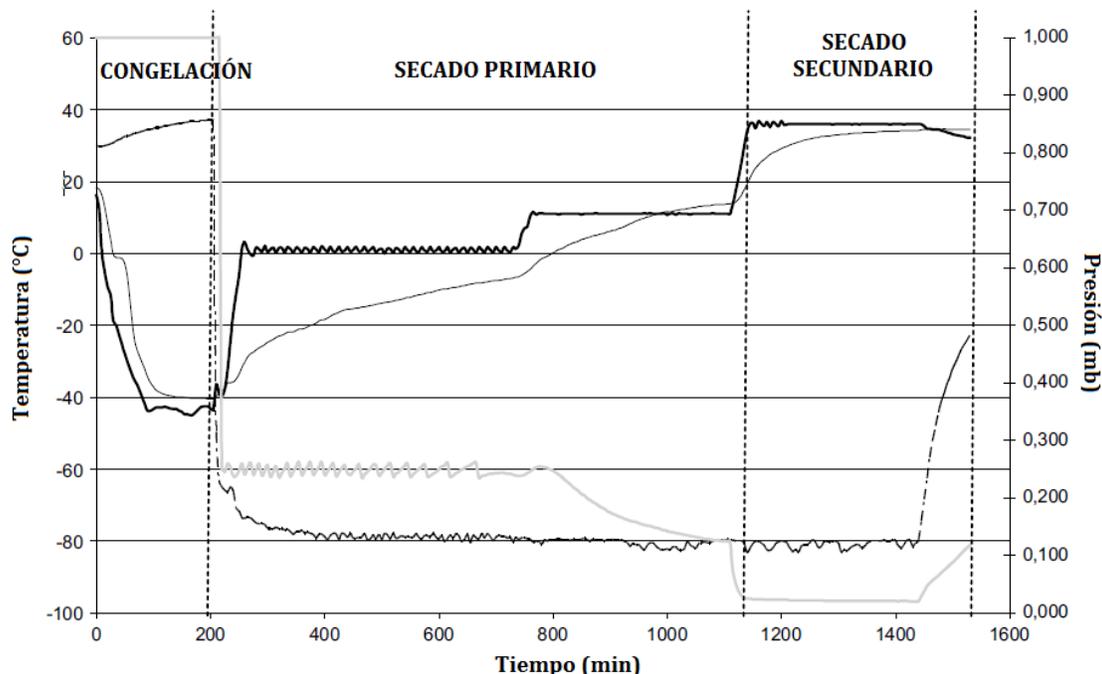


Figura 8. Evolución de la temperatura y algunos de los parámetros del proceso durante la liofilización de muestras de pechugas de pollo en liofilizadora Lyobeta 25, — Temperatura del fluido, - · - Temperatura del condensador, — · — Temperatura del producto y — Presión de la cámara. Fuente: (Babic *et al.*, 2009).

Además, pretratar y congelar un producto y desarrollar un óptimo ciclo de secado son actividades que interactúan mutuamente, las cuales a menudo requieren varias iteraciones antes de que se encuentren un proceso y producto satisfactorios (Alzamora, 2008)

1.4.2.1. CONGELACIÓN

Un alimento es un sistema fisicoquímico de alta complejidad que involucra numerosas variables física y químicas (Hernández, 2007). Una de las propiedades más relevantes del agua en alimentos es el descenso del punto de congelación. Casi todos los productos alimenticios contienen cantidades de humedad o agua relativamente grandes en las que varios solutos están presentes, el punto de congelación real o inicial del agua en el producto es abatido hasta un nivel que está por debajo del esperado para el agua pura. La magnitud de este abatimiento se convierte en una función directa del peso molecular y concentración

del soluto en el alimento y en solución con el agua. El proceso real de congelación en productos alimenticios es un poco más complejo que la congelación del agua pura, como es de esperar (Heldman y Singh, 1981). Este proceso se puede visualizar en la **Figura 9**, que compara la curva de congelación del agua con un alimento. En el agua pura, la temperatura desciende cuando el calor es removido del sistema hasta que se alcanza el punto de congelación y desciende por debajo de él en el proceso de súper-enfriamiento resultando eventualmente en la nucleación del hielo. La liberación del calor de cristalización eleva la temperatura otra vez hasta $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, y permanece constante mientras el calor latente es removido del sistema agua. Siguiendo a la remoción de calor latente, la temperatura desciende otra vez mientras la energía es removida.

Sin embargo el proceso inicial de congelación y cristalización que se lleva a cabo en un producto alimenticio es diferente del que ocurre en la congelación del agua pura. Si se monitorea la temperatura en el punto de enfriamiento más bajo, en el centro térmico de un alimento, se obtiene una curva característica mostrada en la **Figura 9**. La porción AB de la curva indica que el alimento se enfría por debajo de su punto de congelación T_f , el cual es siempre menor que $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

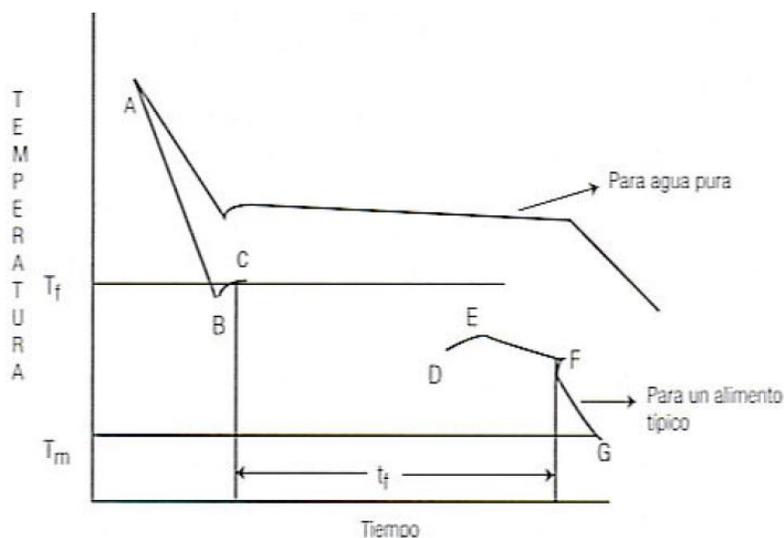


Figura 9. Comparación de curvas de congelación para agua pura y un alimento representativo con un soluto principal: t_f =tiempo de congelación, T_f = temperatura de congelación, T_m = temperatura del medio de congelación.

Fuente: (Sharma *et al.*, 2003)

En el punto B, el agua permanece en estado líquido, aunque la temperatura podría estar por abajo del punto de congelación, esto es el súper-enfriamiento y podría alcanzar hasta $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ por abajo del punto de congelación. Durante BC, la temperatura aumenta de forma rápida hasta el punto de congelación, cuando empiezan a formarse los cristales de hielo y se libera el calor latente de cristalización. Durante CD, el calor continúa siendo eliminado del alimento conforme se forman cristales de hielo. El punto de congelación disminuye debido a que aumenta la concentración del soluto en el líquido sin congelar y el punto de congelación baja. En esta parte de la operación se forma una cantidad importante de hielo. Durante DE, uno de los solutos se vuelve supersaturado y cristaliza. El calor latente de cristalización se libera y la temperatura aumenta ligeramente hasta la temperatura eutéctica T_e , de ese soluto. La importancia de esta temperatura reside en que es la máxima temperatura para llevarse a cabo la liofilización sin provocar un daño grave al producto. Durante EF, continúa la cristalización del agua y el soluto y finalmente durante FG, la temperatura de la mezcla hielo-agua disminuye hasta igualar la del congelador. Una porción del agua permanece sin congelar y ello depende del tipo de alimento, su composición y la temperatura de almacenamiento (Sharma *et al*, 2003).

Desafortunadamente, en la mayoría de los casos prácticos, el soluto no cristaliza realmente. La solución continúa concentrándose mientras que el agua es congelada, y su viscosidad se incrementa rápidamente, eventualmente se hace almibarado y gomoso. El reducir aún más la temperatura finalmente causa la formación de un estado vítreo amorfo que contiene, como ya se dijo, algo de agua ligada. Esto ocurre en la temperatura de transición vítrea T_g . En tal caso, no habrá temperatura eutéctica como tal, pero hay una temperatura máxima característica del producto para la liofilización, llamada temperatura de colapso. (Snowman, 1997). En este sentido, los valores de T_g para muchos grupos alimenticios (productos lácteos: -23 a $-41\text{ }^{\circ}\text{C}$, frutas y jugos de fruta: -35 a $-43\text{ }^{\circ}\text{C}$, vegetales: -8 a $-27\text{ }^{\circ}\text{C}$), son un indicador de la temperatura mínima para comenzar el proceso de liofilización (Alzamora, 2008).

Durante la etapa de congelación, el objetivo es la congelación del agua libre del producto. En este paso, más del 95% del agua libre es congelada. La temperatura del producto tiene que ser mucho más baja del verdadero punto de congelación del producto antes que la congelación ocurra.

El método más favorecido en la mayoría de las aplicaciones actuales es el congelar las muestras del producto cerca de los $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ en un congelador convencional de ráfaga o de flujo y luego transferirlo rápidamente al liofilizador (Snowman, 1997).

La velocidad de enfriamiento influirá en la estructura de la matriz congelada. Si el agua se congela rápidamente, los cristales de hielo serán pequeños. Esto puede causar poros de estructura más fina en el producto liofilizado con alta resistencia al flujo de vapor y mayor tiempo de secado primario. Si la congelación es más lenta, los cristales de hielo crecerán desde la superficie de congelación y serán más grandes. El producto resultante puede tener poros con estructura más gruesa y tal vez un tiempo más corto de secado primario (López-Malo & Palou, 2008).

El tipo de congelación y la velocidad de cristalización durante la congelación tienen importantes efectos en la estructura de los productos alimenticios liofilizados. Los factores involucrados son muy complejos, porque la distribución del tamaño del poro depende de la distribución del tamaño del cristal de hielo. El método de enfriamiento también afectará la estructura y la apariencia de la matriz alimenticia y del producto final. Esto debido a que algunos materiales forman una capa vítrea, las condiciones de enfriamiento deben ser controladas para evitar la formación de una cubierta densa en la superficie del producto congelado que pueda obstruir la salida del vapor de agua durante las subsecuentes fases del secado. Una consecuencia secundaria de la concentración por congelación se relaciona con su efecto en la velocidad de las reacciones en la fase de la solución residual.

Se considera una congelación rápida, al proceso que permite congelar el producto en al menos 90 minutos o menos, sin embargo también se ha definido como la congelación que progresa a través del material a la velocidad de 0.3cm por minuto o más (Barreto, 1966).

Contrariamente a la predicción de la cinética de Arrhenius, la velocidad de las reacciones de hecho se acelera durante la congelación de la solución acuosa. El fenómeno, referido equivocadamente como desnaturalización por congelación de proteínas, debería ser llamado más correctamente como desnaturalización por concentración. Durante esta concentración los solutos en la mezcla precipitan al estado cristalino en varias etapas durante el proceso de concentración por congelación cuando se alcanzan la concentración de saturación causando cambios de pH que no pueden ser detectados (López-Malo & Palou, 2008).

1.4.2.2. SECADO PRIMARIO

Durante esta etapa se elimina aproximadamente el 90% del total del agua en el producto, principalmente toda el agua libre y algo del agua ligada, es decir toda el agua congelada del alimento (Cheffel *et al.*, 1977)

El producto congelado es calentado bajo condiciones de vacío, la presión de la cámara se reduce para remover el agua congelada por sublimación mientras el producto es mantenido por debajo de la temperatura T_g (Alzamora, 2008).

Cuando en el proceso de liofilización comienza con el aumento de temperatura de las charolas, empieza a formarse un frente de sublimación o interfase (**Figura 10**) entre la capa seca y la capa congelada de la muestra, este frente avanza progresivamente, y en un determinado instante, a una temperatura de interfase le corresponde una determinada presión de saturación. La transferencia de masa ocurre por la migración de vapores a través de la capa seca de la muestra bajo la acción de una diferencia de presión, esta transferencia es alta cuando la diferencia de presión es grande (Ramírez - Nava, 2006).

El calor debe ser transferido al frente del hielo a través del material congelado, el cual usualmente tiene una pobre conductividad térmica. La energía requerida para mantener la sublimación se supone es igual al flujo de calor por conducción, convección y/o radiación, suministrado por el gradiente de temperaturas entre el producto congelado y la fuente de calor en la cámara de secado (López-Malo & Palou, 2008).

Debido a que la sublimación es un proceso endotérmico, al sublimarse el agua, el producto se enfría. Por lo tanto, a través de esta fase la sublimación se irá haciendo más lenta y el producto permanecerá más frío que la temperatura de las charolas, hasta que la velocidad de ganancia de calor hacia el material sea igual a la velocidad de pérdida de calor debida a la sublimación y remoción de las moléculas más energéticas (Snowman, 1997).

La velocidad de sublimación del hielo en el producto congelado, depende sobre todo de la diferencia existente entre la presión de vapor en el producto y la presión de vapor del condensador. Las moléculas migran desde una mayor presión de vapor de agua hacia una menor en el condensador (Heldman & Hartel, 1997).

El vapor de agua extraído es recolectado en la superficie del condensador. El cual tiene que tener suficiente área superficial y capacidad de enfriamiento para retener toda el agua sublimada del lote a una temperatura menor a la del producto. Si la temperatura del hielo en

el condensador es más caliente que la del producto, el vapor de agua tenderá a moverse hacia el producto y el secado se detendría.

Al final del secado primario, la temperatura del producto aumentará asintóticamente hasta la temperatura de la charola. Sin una fuente de calor el proceso se detendría eventualmente. Este y otros métodos pueden ser usados para determinar el punto final del secado primario (López-Malo & Palou, 2008).

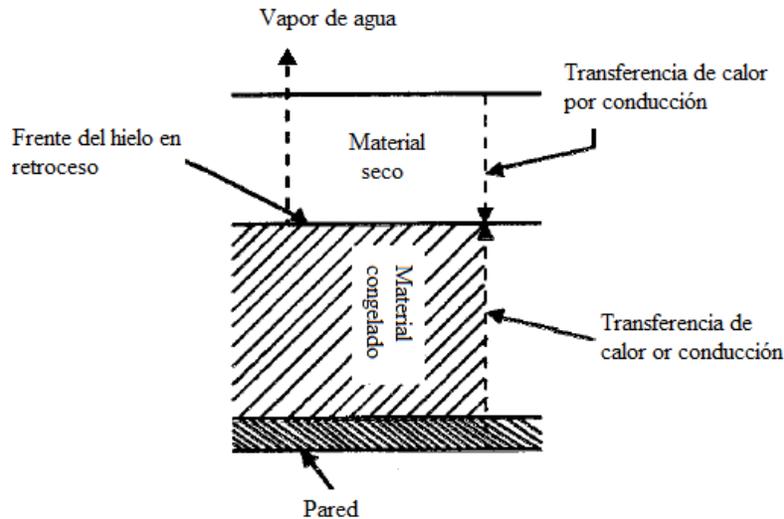


Figura 10. Transferencia de calor y de masa en el secado por congelación

Fuente: Geankoplis, 2006.

El secado primario se lleva a cabo tradicionalmente a presiones de cámara de 40-400 mmHg (5333.28 – 53 3328 Pa ó 0.053 – 0.53 atm) y temperaturas útiles de -30 °C a +10 °C. Desde -7 °C para manzanas hasta -23 °C para extractos de café y -25 °C para zanahorias (López-Malo & Palou, 2008).

A través de esta etapa el producto se mantiene en estado sólido, por debajo de la temperatura de colapso del producto (temperatura de transición vítrea T_g , en el caso de productos amorfos o la temperatura eutéctica T_e , en el caso de productos cristalinos) para secarlo con la retención de la estructura establecida en la etapa de congelación, las moléculas de agua que se escapan dejan huecos, lo cual resulta en una estructura seca, porosa y esponjosa (Potter, 1970).

Si la temperatura T_e del eutéctico más bajo, exhibido por el material, es excedido durante el secado, entonces la fusión del hielo puede ocurrir, dando lugar a graves defectos en el

material, tales como encogimiento. Estas a veces son confundidas con el colapso, haciéndolo poco atractivo y difícil de reconstituir (López-Malo & Palou, 2008).

A una temperatura por debajo de la del colapso, T_c , el soluto se mantendrá rígido durante el secado primario. Sin embargo, si el secado es llevado a cabo por arriba de la temperatura T_c , el soluto será viscoso. Mientras éste es soportado por los cristales de hielo puro, parecerá rígido, pero cuando éste se sublime, ya no sostendrá el soluto y aparentemente el material seco colapsará para formar una masa impermeable (Snowman, 1997).

Cualquier restricción en el flujo puede causar un incremento en la temperatura del producto. El grosor de la capa seca tiene un impacto directo en la velocidad de secado: el proceso de secado es más lento cuando el grosor aumenta. La mayor limitación para la velocidad de secado ocurre cuando el material tiene una piel o contenga agua en venas. Por ejemplo la grasa es muy difícil de liofilizar, para propósitos de estudio, si está en forma de hojas completas, porque el vapor de agua tiene que pasar a través de toda la longitud de las venas impermeables para escapar (Snowman, 1997).

1.4.2.3. SECADO SECUNDARIO

En el secado secundario el agua no congelada es removida por desorción de la capa seca del producto, logrando que el producto contenga menos del 1 al 3% de agua residual (Alzamora, 2008). Esta es la remoción del agua ligada, la cual puede ser agua de cristalización, agua dispersa al azar en el material vítreo, agua intracelular o agua de absorción (Snowman, 1997).

Durante esta etapa, la temperatura de la charola y del producto es incrementada para promover la velocidad adecuada de desorción y lograr la humedad residual deseada para mantener un producto óptimo y estable. Y debido a que después del primer secado el producto ya no tiene agua libre, se puede aumentar la temperatura sin peligro de fusión. Sin embargo la temperatura no debe aumentarse rápidamente ya que algunos productos aun contienen un 10% o menos de agua y aun se puede rebasar la temperatura de transición. Además, los productos que contienen cantidades considerables de proteínas, requieren agua para mantener sus estructuras secundarias y terciarias, y sin agua éstas pueden desnaturalizarse y perder su actividad. Por lo que el contenido de agua debe ser controlada cuidadosamente, asimismo de la temperatura para evitar daños por calor (López-Malo & Palou, 2008).

1.4.3. CARACTERÍSTICAS Y ESTABILIDAD DE LOS ALIMENTOS LIOFILIZADOS

Muchos factores pueden afectar la estabilidad del material liofilizado, dos de los más importantes son la humedad (de 1 a 3% remanente) y el oxígeno. La estructura física está relacionada con la textura, capacidad de rehidratación y colapso e involucra conceptos tales como porosidad, tamaño de poro, distribución de este, área superficial específica y densidad. Las propiedades sensoriales incluyendo el color, aroma y flavor, y la estabilidad, son función de la degradación de nutrientes como proteínas y lípidos, además de la actividad de agua.

En la carne la principal degradación es generación de rancidez en la grasas. Los vegetales deshidratados se deterioran principalmente por reacciones de oxidación de lípidos en el caso que los contenga como el aguacate (provocando pérdidas de flavor y rancidez), reacciones de obscurecimiento no enzimático (provocando obscurecimiento, dureza y pérdida de disponibilidad de proteínas) y oxidación (pérdida de vitaminas, oxidación de pigmentos que acarrearán colores inaceptables). La liofilización afecta poco a la tiamina, ácido ascórbico y las pérdidas que provoca en otras vitaminas son mínimas (López-Malo & Palou, 2008).

1.4.3.1. POROSIDAD

La porosidad, distribución del tamaño del poro y por lo tanto la superficie específica, tienen roles importantes en la capacidad de rehidratación y en las propiedades mecánicas y texturales del alimento liofilizado, así como en las reacciones de deterioro y las propiedades de transporte.

En general se ha observado que la velocidad de congelación determina el tamaño del cristal de hielo y por lo tanto la porosidad final del producto. King et al., (1968), experimentó con la porosidad en la carne de pollo, sus experimentos se llevaron a cabo en diferentes temperaturas de congelación, mostrando que a mayores velocidades de congelación, se obtenían cristales de hielo más pequeños, produciendo más pequeños poros en la carne que generaban valores considerablemente altos de área superficial y porosidades. Además poros más pequeños generan mayores tiempos de secado (Valdez-Fragoso, 2008).

1.4.3.2. REHIDRATACIÓN

La rehidratación se puede considerar una medida del daño en el alimento ocurrido durante la deshidratación. La velocidad en que se realiza también sirve como medida de la calidad del producto deshidratado (Weerts *et al.*, 2006). La rehidratación, es un complejo proceso que ayuda a restaurar las propiedades del alimento fresco, sin embargo es importante considerar que la rehidratación no es el proceso inverso a la deshidratación, ya que ambos fenómenos tienen diferentes mecanismos de transferencia de materia y dependen de factores distintos. Los alimentos deshidratados en condiciones óptimas, son aquellos que se deterioran menos y se rehidratan de forma normal. Deben, rehidratarse lo más rápido posible y mostrar las características estructurales, químicas, nutricionales y sensoriales lo más parecidas a las del alimento fresco. No obstante, el aumentar la temperatura de la solución rehidratante sigue siendo el método más utilizado para reducir el tiempo de rehidratación sin incurrir en mayores costos de operación (Marín, *et al.*, 2006).

La velocidad de rehidratación de los alimentos liofilizados es, en general 4 a 6 veces mayor que para los alimentos secados con aire, haciendo a los productos liofilizados excepcionales para comidas instantáneas listas para comer o sopas.

Es conocido que la liofilización genera productos con alta capacidad de rehidratación, la primera razón es la alta porosidad. Los valores de rehidratación de carne de pollo y pavo liofilizados han sido reportados por Farkas y Singh (1991) de 94 a 98% y King *et al.*, (1968), del 87 al 95%. Estos resultados concuerdan bien con la gran porosidad de la carne de ave liofilizada (>70%). En contraste, las muestras deshidratadas con aire caliente muestran valores en el rango de 33-45% de rehidratación.

1.4.3.3. COLOR Y OLOR

El color de las hojas y frutas se debe a las clorofilas *a* (verde azulado) y *b* (verde amarillento) que se encuentran en relación 3:1 (Maiocchi & Avanza, 2004). Las clorofilas *a* y *b* presentan en sus estructuras 4 anillos pirrolíticos con un núcleo de magnesio, el cual es fácilmente removible por efectos de los ácidos, formándose las correspondientes feofitinas *a* y *b* de color marrón oscuro. La degradación de la clorofila es afectada por factores tales como la temperatura, pH, luz y oxígeno. La clorofila puede degradarse por acción de la enzima clorofilasa, que se encuentra ampliamente distribuida en los tejidos vegetales y se

activa en condiciones de estrés fisiológico, esta enzima degrada la clorofila en fitol y clorofilina. Existen varios procedimientos para inactivar las enzimas, el más usual es el escaldado con agua hirviente o vapor por un periodo corto, normalmente de 2 a 10 minutos, dependiendo de las dimensiones, tipo y condiciones del producto; es una operación previa al procesamiento que además elimina el aire ocluido, fija el color y el reblandece el tejido (Barreiro & Sandoval, 2006).

En la carne, el color rojo es dado por la hemoglobina y mioglobina, sin embargo, la hemoglobina es eliminada durante el desangrado de los animales en el proceso de matanza. La mioglobina es la que tiene mayor importancia dentro del procesado de carnes. Durante la cocción la globina se desnaturaliza y a 80-85°C se destruye totalmente dando el color marrón característico de la carne cocida. Durante la cocción, ocurre además la caramelización de los azúcares y reacciones tipo Maillard (Boles & Pegg, 2011).

Los alimentos se pueden deteriorar por reacciones no enzimáticas que causan obscurecimiento, la oxidación de pigmentos genera colores inaceptables. Kapsalis *et al.*, (1967) determinó que la tiamina es más sensible a los cambios de temperatura, el caroteno tiene una más rápida degradación solo cuando la A_w y la temperatura son altas, mientras que la clorofila se degrada respecto al tiempo y condiciones de almacenamiento (López-Malo & Palou, 2008). Sin embargo el color se mantiene generalmente normal después de la rehidratación (Fellows, 2007).

Como los componentes del aroma no se encuentran ni en el agua pura ni en los cristales de hielo, no son arrastrados durante la sublimación por el vapor de agua y quedan por consiguientes retenidos en la trama del alimento liofilizado. Por este sistema se consigue retener el 80% del aroma del alimento (Fellows, 2007). Sin embargo, algunos de los componentes orgánicos responsables del flavor, tienen presiones de vapor altas, mayores al del agua, por lo que son susceptibles a la evaporación y a la pérdida durante el secado.

1.4.3.4. TEXTURA

La textura aparece como una percepción psicoquímica compleja y multidimensional (Kramer, 1973). Se puede definir como la unión de las propiedades reológicas y de la estructura de un producto alimenticio perceptible por los receptores mecánicos, táctiles y eventualmente visuales y auditivos, condicionando la apetencia de un alimento. Mientras

que la dureza es definida como la propiedad de la textura manifestada por una alta y persistente resistencia a la rotura en la masticación (Christensen, 1984).

Las hortalizas y los productos cárnicos son derivados de organismos vivos que están compuestos de células. La estructura de estas células es uno de los contribuyentes principales de las características de textura de un alimento. El modelo de rotura del alimento a medida que se muerde, así como el tamaño y composición de las partículas producidas por la masticación son responsables de la textura del alimento que se percibe en la boca. Estos factores se determinan por la estructura inicial del material alimenticio y los cambios producidos por el procesado y cocinado que modifican los planos de debilidad de los tejidos (Edwards, 2001).

En el caso de las hortalizas, una de las características de las células vegetales es que la pared celular está compuesta de fibras de celulosa y hemicelulosa en una matriz de agua y pectinas, estas últimas cementan las paredes celulares vecinas y juntas imparten un grado de rigidez, pero el principal significado del mantenimiento de la forma del tejido de la planta es la presión de turgencia dentro de las células individuales. La presión de turgencia es la presión hidrostática producida por los constituyentes osmóticamente activos, como azúcares y sales. Cuando la presión de turgencia se pierde, la estructura colapsa en menor o mayor grado como en una planta que se marchita por falta de agua. Los diferentes órganos de las plantas tienen diferentes grados de susceptibilidad, estos factores pueden ser la rigidez inherente de la pared celular y el grado de soporte desde dentro de la célula debido a estructuras tales como los gránulos de almidón y de otros tejidos. Por consiguiente, una estructura bidimensional con doble pared tal como una hoja de lechuga pierde su textura característica con mucha más facilidad que una patata que tiene una estructura tridimensional de las paredes celulares más grandes. Además de la influencia de la relación superficie/volumen.

La textura de la carne depende del tamaño de los haces de fibras musculares, es decir, del número y diámetro de las fibras, así como la cantidad de tejido conjuntivo que forma el perimio tisular. Su dureza o blandura depende de la mayor o menor dificultad que presente a ser troceada durante la masticación. En la carne cocida, Dransfield, (1984) señalan que la textura lleva consigo dos componentes principales: terneza y jugosidad. Las carnes menos jugosas son consideradas menos tiernas. Las proteínas del tejido conjuntivo

que envuelve el músculo formado principalmente por colágeno constituyen un elemento negativo que limita la ternura.

La liofilización apenas afecta a la textura de los alimentos, casi no provoca en ellos retracción alguna y no endurece su capa superficial. La estructura porosa de los alimentos liofilizados hace que su rehidratación sea muy rápida. No obstante, son alimentos frágiles que deben protegerse de eventuales daños mecánicos. El efecto de la liofilización sobre las proteínas, los almidones y otros carbohidratos es mínimo. Sin embargo, su estructura porosa los hace accesible al oxígeno, lo que puede provocar alteraciones por oxidación de sus lípidos. Además, las etapas preparatorias del alimento pueden afectar su valor nutritivo y calidad global. (Fellows, 2007). En la congelación es donde mayores cambios se pueden presentar si no se lleva a cabo correctamente, además de una temperatura de inicio del secado mayor a la crítica, puede provocar colapso y pérdida de la estructura (López-Malo & Palou, 2008).

1.4.4. ENVASADO Y ALMACENAMIENTO DE PRODUCTOS LIOFILIZADOS

La humedad residual del material es un factor crítico que afecta la vida de anaquel del producto (Snowman, 1997). Por naturaleza los productos liofilizados son higroscópicos y la exposición a humedad durante el almacenamiento puede desestabilizar el producto. (López-Malo & Palou, 2008). Almacenar los productos en ambientes con bajas humedades puede reducir el riesgo de degradación.

El oxígeno es también determinante en la estabilidad de la mayoría de los materiales, los efectos de degradación del oxígeno y la humedad son dependientes de la temperatura, pues a una mayor temperatura durante el almacenaje, más rápidamente se degrada un producto (López-Malo & Palou, 2008).

Los productos liofilizados deben ser almacenados en empaques sellados (Snowman, 1997). El empaque usado debe ser impermeable a estos factores. Una práctica actual es el almacenado bajo un gas inerte seco, usualmente nitrógeno puro seco en un empaque de baja permeabilidad. La calidad y apariencia del alimento liofilizado depende de su composición, geometría, envase y otros muchos parámetros del equipo y del proceso, que a pesar de su complejidad, son determinantes para una liofilización exitosa (Franks, 1998).

De esta manera la liofilización sigue siendo la operación de secado que mantiene mejor las características físicas y sensoriales de los alimentos, sumamente importantes en la aceptación de un producto alimenticio. Por esto podría usarse para obtener los ingredientes necesarios para elaborar un pozole instantáneo.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1. OBJETIVOS

Objetivo General

Determinar las condiciones de liofilización de lechuga, rábano y pierna de cerdo, evaluando la influencia de la temperatura y forma, en sus características de textura, color y rehidratación para elaborar un pozole instantáneo

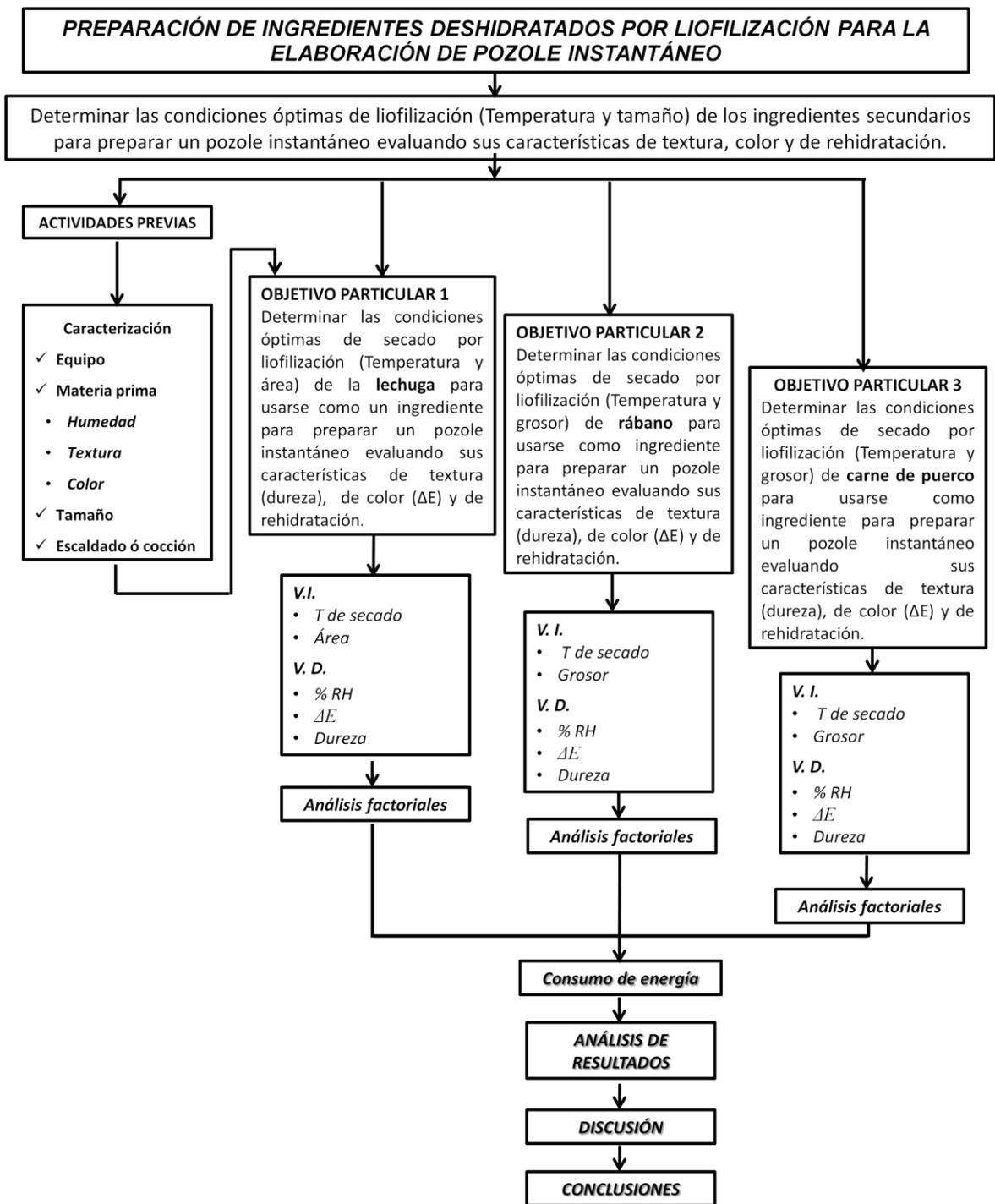
Objetivos Particulares

1. Determinar las condiciones óptimas de secado por liofilización (Temperatura y área) de la lechuga para usarse como un ingrediente para preparar un pozole instantáneo evaluando sus características de textura (dureza), de color (ΔE) y de rehidratación.
2. Determinar las condiciones óptimas de secado por liofilización (Temperatura y grosor) de rábano para usarse como ingrediente para preparar un pozole instantáneo evaluando sus características de textura (dureza), de color (ΔE) y de rehidratación.
3. Determinar las condiciones óptimas de secado por liofilización (Temperatura y grosor) de carne de puerco para usarse como ingrediente para preparar un pozole instantáneo evaluando sus características de textura (dureza), de color (ΔE) y de rehidratación.

Determinar las condiciones óptimas de liofilización de los ingredientes secundarios para preparar un pozole instantáneo evaluando el impacto en sus características de textura, color y rehidratación debidas a la variación de temperatura y tamaño de la muestra.

2.2. CUADRO METODOLÓGICO

A continuación se esquematiza el plan de trabajo para la experimentación.



2.3. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRA

a. LECHUGA Y RÁBANO

Los rábanos y las lechugas se obtuvieron en un mercado local del Estado de México, se seleccionaron las muestras que presentaban mayor frescura sin coloraciones extrañas, con tamaño y color uniforme y se mantuvieron en refrigeración hasta su uso (máximo 48 h).

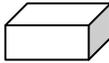
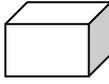
La lechuga se deshojó y se lavó con agua corriente. Para evaluar el efecto de área en el proceso de liofilización, se plantearon 2 niveles de variación **Tabla 5**.

Tabla 5. Cortes de la lechuga

Área	muestra
3 cm ² (1 × 3cm)	
4 cm ² (2 × 2cm)	

El grosor es una de las variables más importantes en la liofilización, principalmente en la transferencia de calor, y en el tiempo de secado. Con la finalidad de evaluar su influencia en las características del secado del rábano, el área se mantuvo constante en 1.3cm² para ambos grosores y se plantearon los grosores mostrados en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Corte del rábano

Grosor	Muestra
4mm	
8mm	

El rábano se corto con ayuda de un cortador de papas EURO line JUMBO y una navaja quirúrgica ambos de acero inoxidable y se escogieron las muestras sin cáscara. Posteriormente, tanto la lechuga como el rábano, se desinfectaron en una solución de 2L de agua con 15 gotas de desinfectante con base de semilla de toronja durante 10 min.

A continuación las muestras fueron escaldadas, la lechuga se escaldó químicamente con ácido ascórbico en una solución al 0.2% durante 2 min y el rábano se escaldó térmicamente (92.8 °C) durante 1.5min. Después del escaldado se escurrieron para retirarles el exceso de agua.

b. CARNE

La carne se obtuvo en un obrador con certificación TIF del municipio de Tultepec, Estado de México, la carne fue maciza de cerdo, la cual fue lavada y posteriormente cocida en agua con sal durante 1.5h, se dejó escurrir para retirar el exceso de caldo durante 30 min y se cortó transversalmente al tejido con área de 1.3 cm², con el mismo procedimiento y equipo que el rábano, en los grosores mostrados en la **Tabla 7**.

Tabla 7. Corte de la carne de cerdo

Grosor	Muestra
2.5mm	
5 mm	

2.3.1.1. CONGELACIÓN

La congelación se llevó a cabo en un congelador de laboratorio marca REVCO con una temperatura de -20°C, durante 3h. Y para muestras congeladas a -34° se hizo en un congelador a -40°C.

2.3.2.LIOFILIZACIÓN

La liofilización se llevó a cabo en una liofilizadora de cámara, modelo Freeze 6, LABCONCO (**Figura 11**), con control de temperatura de la cámara. La liofilizadora está conectada a un condensador y un sistema de vacío (Ver anexo 2). Las muestras fueron puestas en cajas petri desechables. En el caso de las lechugas de 1×3cm se colocaron 8 muestras por caja y en todos los demás casos fueron 6 muestras por caja, lo cual aseguraba al menos un centímetro de separación entre muestras.



Figura 11. Liofilizadora utilizada

2.3.2.1. CURVAS DE SECADO Y ESTABLECIMIENTO DE LAS CONDICIONES DEL PROCESO

Se pesaron las muestras antes, durante y después del proceso, por lo que se colocaron muestras testigo, que eran extraídas del equipo cada 24h para pesarse. Grificándose la fracción de agua v/s el tiempo. Se realizaron corridas previas a la experimentación definitiva para determinar el tiempo y las condiciones de liofilización que presentaban los mejores productos secos. A partir de estos ensayos se establecieron 2 diferentes temperaturas de proceso, A y B para el estudio. En la Tabla 9 se muestran las condiciones a las que se llevaron a cabo el primer y el segundo secado para las diferentes muestras. En la condición A, las muestras se congelaron a -40°C , posteriormente se colocaron en la liofilizadora y el primer secado se inició a -34°C . El tiempo promedio para estas condiciones fueron de 63h. Para la condición B, las muestras se congelaron a -20°C , llevándolas a la liofilizadora e iniciando la liofilización a -17°C para lechuga y carne, y -15°C para rábano. El tiempo promedio de estos procesos fue de 45h.

2.3.2.2. POTENCIA CONSUMIDA

Se midió el amperaje durante los procesos de liofilización con una pinzas amperimétrica marca *Triplett modelo 10*. El consumo se calculó con la siguiente ecuación en base a un voltaje de 122Volts y un costo de \$0.747Kwh:

Donde:

$$P = V \times I$$

V = Voltaje [Volts]

I = Intensidad [Amp]

P = Potencia [Watts]

2.3.3. ENVASADO

Las muestras se envasaron en cajas petri selladas con *parafilm*, en bolsas *Ziploc* a vacío parcial. Se almacenaron a temperaturas no mayores de 25°C , y evitando la exposición al sol. Hasta que las muestras fueron evaluadas, no se rompió el vacío.

2.3.4. DETERMINACIÓN DE HUMEDAD

La humedad se determinó con estufa a una temperatura de 103°C durante 1h para la lechuga y el rábano, y $100-102^{\circ}\text{C}$ por 16-18h para la carne (AOAC, 2000), la prueba se realizó para las muestras frescas y liofilizadas.

2.3.5. PORCENTAJE DE REHIDRATACIÓN

La rehidratación se hizo en diferentes condiciones para cada tipo de muestra, esto debido en primer lugar a la manera en que se sirven cada una en el plato típico de pozole y en segunda el tiempo que tarda en rehidratarse hasta ya no generarse cambios significativos en los valores de rehidratación, todas se rehidrataron en agua corriente. Las condiciones son las presentadas en la **Tabla 8**.

Tabla 8. Condiciones de rehidratación

	Temperatura	Tiempo
Lechuga	Ambiente	5min
Rábano	Ambiente	10min
Carne	T de ebullición	10min

El peso de las muestras fue medido con una balanza analítica marca Bueco Germny y el porcentaje de rehidratación se evaluó mediante el coeficiente deshidratación definida por Meda & Ratti, (2005).

donde:

$$\%Rh = \frac{(W_r - W_l)}{(W_0 - W_l)} \times 100$$

W_r = Peso de muestra rehidratada

W_l = Peso de muestra liofilizada

W_0 = Peso de muestra fresca

2.3.6. DETERMINACIÓN DE COLOR

Se midió el cambio de color (ΔE) con un colorímetro marca *MiniScan XE modelo 545* usando el sistema CIELab (**Figura 12**), que evalúa los parámetros: L^* (brillo-sombra), a^* (rojo-verde) y b^* (amarillo-azul) (Gowen *et al.*, 2007).

$$\Delta E^* = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2}$$

Donde

L_0^* , a_0^* y b_0^* se refieren a los valores de color antes de la liofilización y L^* , a^* , b^* a los valores posteriores a la rehidratación de las muestras.

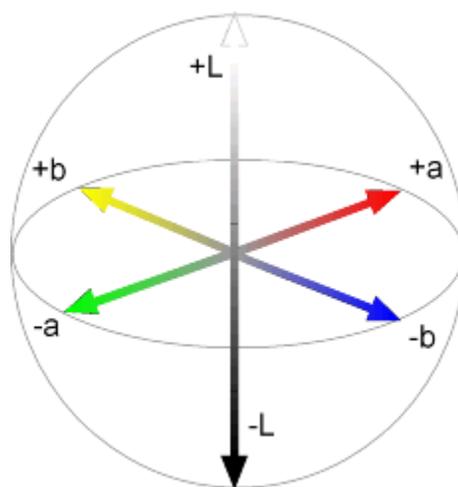


Figura 12. Sistema CIE Lab

2.3.7.DETERMINACIÓN DE TEXTURA (DUREZA)



Figura 13. Dinamómetro Digital Force.

La dureza de las muestras se evaluó con un dinamómetro Digital Force Gauge marca SHIMPO con una geometría de punción (cónica) con área de 1.5cm^2 para determinar la fuerza necesaria para penetrar la muestra. Reportándose los datos en Kg_f/cm^2 . Los datos obtenidos fueron diferenciales de fuerza de penetración, valores negativos representan pérdida de dureza y valores positivos un aumento de la fuerza necesaria para penetrar la muestra. Mientras que un 0 representaría ningún cambio (**Figura 13**).

2.3.8.ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se utilizó el software SPSS versión 5.0 con un diseño factorial 2×2 totalmente al azar con 6 repeticiones para evaluar la influencia de la temperatura y el grosor en el cambio de color, dureza y rehidratación de los diferentes tipos de muestras.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. DETERMINACIÓN DE CONDICIONES DE LIOFILIZACIÓN

Las condiciones en las que se llevó a cabo el proceso de liofilización se presentan en la **Tabla 9**, con presiones menores a 50 mmHg (6000 Pa ó 0.059 atm), estas condiciones fueron elegidas después de realizar varias corridas de prueba como actividades previas y se reportan en el anexo 1.

Tabla 9. Condiciones del proceso de liofilización para las diferentes muestras

Condiciones		Congelación	Secado primario	Secado secundario	Tiempo		
Lechuga							
A	T [°C]	-40°C	-34°C	-15°C	5°C	10°C	49h
	t [h]	1.5 h	24h	20h	3h	2h	
B	T [°C]	-20°C	-17°C	-10°C	5°C		45h
	t [h]	2.5 h	22h	20h	3h		
Rábano							
A	T [°C]	-40°C	-34°C	-20°C	-10°C	10°C	68h
	t [h]	1.5 h	24h	20h	18h	2h	
B	T [°C]	-20°C	-15°C	-10°C	5°C		45h
	t [h]	2.5 h	22h	20h	3h		
Carne							
A	T [°C]	-40°C	-34°C	-20°C	-10°C	10°C	71h
	t [h]	1.5 h	18h	48h	3h	2h	
B	T [°C]	-20°C	-17°C		-5°C		45h
	t [h]	2.5 h	40h		5h		

3.2. DETERMINACIÓN DE HUMEDAD FINAL

El contenido de humedad después de la liofilización, determina la estabilidad del producto después del proceso y durante el almacenamiento, por lo que es importante para determinar la vida de anaquel del producto.

Los resultados indicaron un máximo de 5.77 % de humedad (rábano 8mm), para las muestras evaluadas y un promedio general de 2.63% (**Tabla 10**), lo cual está dentro de los valores reportados cercanos al 3% para alimentos liofilizados (Alzamora, 2008; Ratti, 2001)

Tabla 10. Humedades después de la liofilización

Humedad de las muestras liofilizadas			
Muestra	Variación	Condiciones A	Condiciones B
Lechuga	Área 1 (1x3)	2.42% ^{a A*}	1.07% ^{b A}
	Área 2 (2x2)	0.79% ^{a B}	2.23% ^{b B}
Rábano	Grosor (4mm)	0.80% ^{a A}	3.36% ^{b A}
	Grosor (8mm)	2.40% ^{a B}	5.77% ^{b B}
Carne	Grosor (2.5mm)	2.35% ^{a A}	3.98% ^{b A}
	Grosor (5mm)	3.13% ^{a B}	3.24% ^{a B}

Letras diferentes (a ó b) entre columnas indican diferencia estadísticamente significativa ($P \leq 0.05$)

Símbolo diferente (A ó B) entre renglones indica diferencia estadísticamente significativa ($P \leq 0.05$).

La **Figura 14** muestra la gráfica de la operación de liofilización de la lechuga, en esta se observa la disminución del contenido de humedad en función del tiempo, además del cambio de temperatura en los secado primario y secundario.

La liofilización en condiciones A, se realizó a una menor temperatura (-34 °C), se observó que su curva tiene una pendiente mayor lo que significa una mayor velocidad de secado en las primeras 24h, en comparación con las condiciones B. Sin embargo, disminuyó en la parte final, lo que también se reflejó en un aumento de tiempo de proceso.

Para las condiciones B se aumentó la temperatura del proceso a -17 °C para comenzar el secado primario; aunque la curva obtenida tuvo una menor pendiente al principio, una alta velocidad de secado se mantuvo durante un tiempo mayor, lográndose disminuir el tiempo de proceso.

En las condiciones A el contenido de humedad final fue mayor para las muestras con menor área (1x3 cm), a diferencia de las condiciones B, donde la situación se invierte (**Tabla 10**), esta contradicción puede ser debida a que la pérdida de humedad fue afectada por la estructura de la hoja, esto es, la presencia o no de venas, que están diseñadas para evitar la pérdida de agua de la hoja y además pueden engrosarla ligeramente o si la muestra fue

tomada de una parte más cercana al tronco de la lechuga, todo esto pudo haber disminuido la difusión del vapor durante en el proceso.

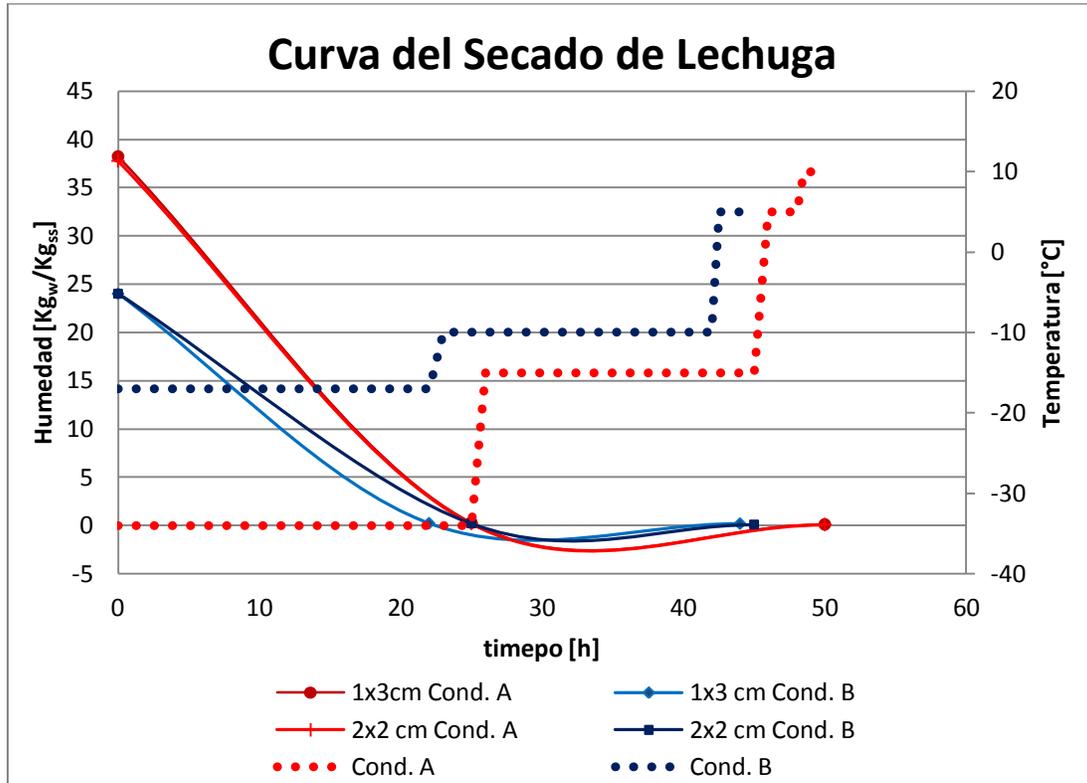


Figura 14. Curvas de proceso de liofilización de la lechuga para las condiciones A y B con diferentes áreas de la lechuga.

En la lechuga, ni el área ni las condiciones del proceso fueron un factor determinante para obtener el contenido de humedad deseado (<3%). A pesar que la muestra de 1x3cm liofilizada en las condiciones A tuvo menor humedad (Tabla 10), la muestra con área 2x2cm tratada con las condiciones B, fue la que tuvo menor daño visible, como se observa en los resultados de las otras características estudiadas.

En el *rábano*, el contenido de humedad después del proceso de liofilización presentó diferencias significativas en función al grosor (Tabla 10); las muestras más delgadas (4mm) tuvieron menor humedad que las gruesas (8mm). Se puede observar en la Figura 15, como las curvas de secado son diferentes dependiendo del grosor de la muestra, teniendo una alta velocidad el *rábano* delgado, y una menor para las muestras gruesas, en particular cuando la temperatura era más baja (condiciones B). Una explicación a esto es que la transferencia de calor desde la base y hasta el frente de sublimación es menos efectiva en un grosor mayor (Alzamora, 2008), debido a que el área de contacto con la

placa calefactora es menor en relación al área superficial específica de la muestra, el rábano con un corte más delgado tenía una mayor área superficial específica que las gruesas. Hua (2010) refiere la importancia que tiene disminuir el tamaño de la muestra; ya que al aumentar el grosor se dificulta el paso del vapor, que tiene que recorrer una distancia mayor desde el frente de sublimación hasta la superficie, a través de la estructura porosa. De la misma manera, durante la desorción es más difícil la difusión de las partículas, Hua (2010) también menciona que como resultado del aumento de tamaño, también se incrementa el tiempo de secado debido a la disminución del área de sublimación.

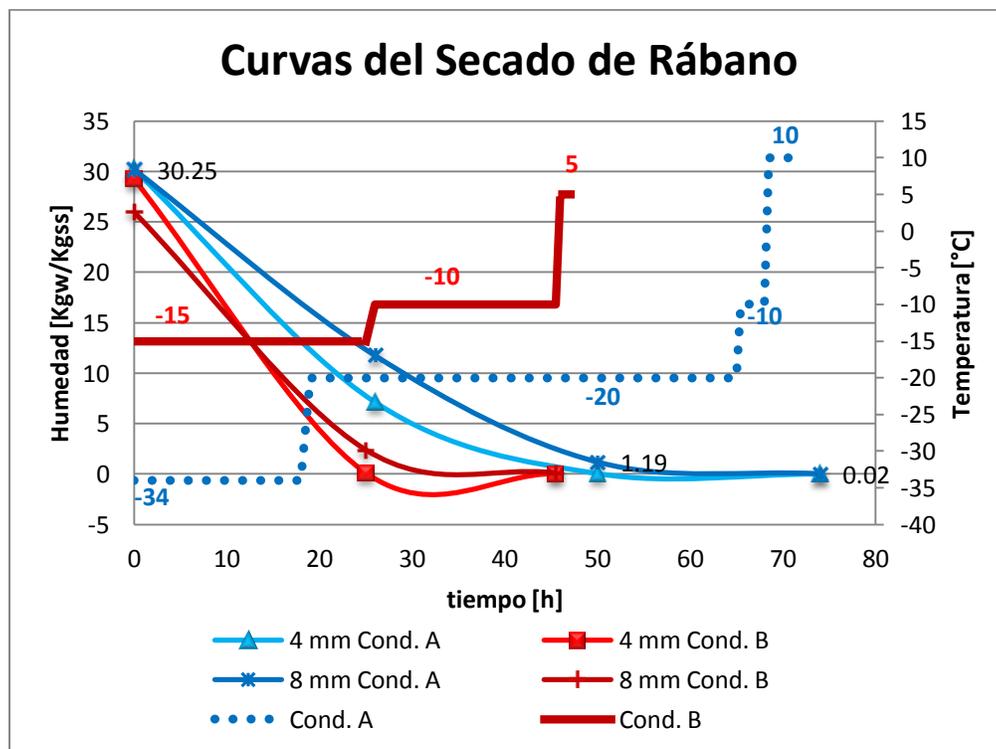


Figura 15. Curva de secado del rábano a diferentes condiciones y grosores.

Siendo el rábano un alimento con alto contenido de humedad (95%) la cantidad de agua liofilizada fue muy grande, en relación con su tamaño y con otros productos, como la carne, por lo que se tuvo un aumento en el tiempo de secado, como se observa en la **Figura 15**.

En el rábano, se presentó una diferencia significativa en la humedad final en función de las condiciones del proceso (**Figura 15**); las muestras de condiciones A (-34 °C) (**Tabla 9**) tuvieron menor humedad que las de condiciones B (-15 °C) (**Tabla 9**). En el proceso de liofilización con las condiciones A, el rábano fue congelado a -40 °C durante 2h, una

congelación rápida, que produjo cristales pequeños y por lo tanto poros pequeños que dificultaron la difusión del vapor del agua entre la estructura porosa del producto hasta la superficie, esto pudo haber disminuido la velocidad de sublimación, reflejándose en el mayor tiempo que tomó el proceso (aproximadamente 68h), sin embargo, entre más baja la temperatura inicial y más tiempo de proceso, más bajas fueron las humedades finales.

En el proceso con las condiciones *B*, se congeló la muestra a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la liofilización se comenzó a $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$; produciendo una congelación lenta la cual provocó que los cristales de hielo crecieran, Babic (2009) reporta que al irse sublimando los cristales de hielo, producto de una congelación lenta, se deja una estructura en forma de panal con poros grandes, que favorecen el paso del vapor sublimado a través de la estructura y su posterior desorción. En este caso, el tiempo total de secado fue de 45h; las humedades aumentaron ligeramente, llegando hasta un 6% para las muestras gruesas, esto significa que esta liofilización en particular pudo no haberse completado, pues un producto con esta humedad es probable que presente mayor A_w y una menor vida de anaquel. Kapsalis (1967), reporta que el contenido de humedad residual de productos liofilizados tiene un rango el cual depende del tipo de alimento y no debe ser mayor al 5%, porque puede generar reacciones de deterioro durante el almacenamiento.

El rábano de 4mm liofilizado en las condiciones *A*, tuvo el menor contenido de humedad, sin embargo, presentó un colapso de la estructura, reflejado en las características evaluadas más adelante; en cambio con las condiciones *B*, se consiguió un rábano más aceptable, que mantuvo su estructura espacial con el menor daño, aunque su contenido de humedad fue ligeramente mayor, es adecuado para un producto liofilizado.

La *carne*, fue la muestra estudiada con menor humedad inicial (60%). Sin embargo, tiene un alto contenido de lípidos (20%), estas láminas de grasa intermuscular pueden actuar como una barrera que impide el paso del vapor de agua, por lo que el corte de las muestras de carne fue, en lo posible, perpendicular a estas y a las fibras musculares para acelerar la sublimación del hielo.

Las humedades finales en la carne, al igual que en el rábano, fueron menores cuando el tratamiento fue a menor temperatura de secado ($-34\text{ }^{\circ}\text{C}$) y mayor tiempo (condiciones *A*) y también menores cuando la muestra era delgada (**Tabla 10**). Sin embargo, al aumentarse la

temperatura (-17 °C), la humedad fue mayor para las muestras delgadas que para las muestras gruesas (5mm).

Las humedades variaron en función del grosor en valores bajos, pero significativos. Con un grosor de 5mm, no hubo diferencia significativa entre las diferentes condiciones de proceso (A y B); pero éstas si afectaron la muestra de 2.5mm. En general lo más probable es que la estructura porosa generada desde la cocción de la carne, congelación y posterior sublimación, así como el corte favorecieron en gran medida a la sublimación del hielo en la carne.

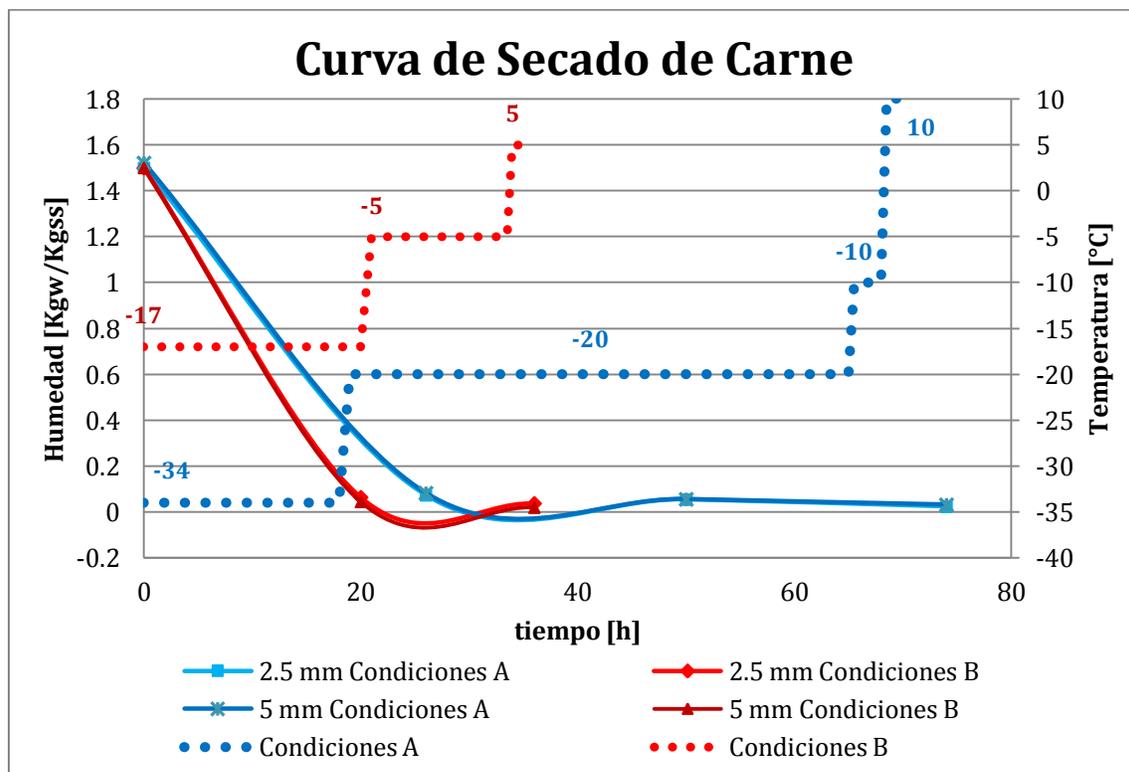


Figura 16. Curva de secado de la carne a diferentes condiciones y grosores.

La temperatura de inicio del proceso y por tanto la de congelación, no influyeron significativamente en los resultados de humedad de la carne, a diferencia de lo que sucedió en los otros productos estudiados.

En la carne como en la lechuga, se observó que la mayor disminución de humedad se dio en las primeras 20h (**Figura 16**) para las condiciones A y B, sin embargo, para una menor temperatura (condiciones A) la prolongación del tiempo de secado fue mayor para alcanzar una humedad aceptable y pues se perdió sólo el 10% de humedad en las últimas 24h del

secado secundario. Mientras que en las condiciones *B* (-17°C) se perdió en las ultimas 10h. Al observar la gráfica se puede ver que la diferencia entre las curvas para los dos grosores fue muy poca, compartiendo casi la misma velocidad de secado.

Por lo que se obtuvo una carne de buenas características, poca humedad y sobre todo con un proceso más rápido, con las condiciones *B* y un grosor de 5mm.

3.3. PORCENTAJE DE REHIDRATACIÓN

El porcentaje de rehidratación es una de las variables más importantes del producto deshidratado, es el reflejo del daño generado durante el proceso y es determinante para algunas de las demás características estudiadas en este trabajo (**Tabla 11**).

Tabla 11. Porcentajes de rehidratación de muestras liofilizadas

Porcentajes de rehidratación			
Muestra	Variación	Condiciones A	Condiciones B
Lechuga	Área 1 (1x3) ^s	40.49% a A	61.08% b A s*
	Área 2 (2x2)	55.30% a B	73.89% b B
Rábano ⁱ	Grosor (4mm) ^s	50.90% a A	91.02% b A s
	Grosor (8mm)	26.79% a B	88.48% b A
Carne	Grosor (2.5mm)	86.27% a A	97.19% a A s
	Grosor (5mm)	89.29% a A	98.02% a A

* Letras diferentes (a ó b) entre columnas indican diferencia estadísticamente significativa ($P \leq 0.05$)

Símbolo diferente (A ó B) entre renglones indica diferencia estadísticamente significativa ($P \leq 0.05$).

s Indica significancia de la variable donde se encuentre

i Indica interacción entre ambas variables.

La rehidratación de la *lechuga* liofilizada, se vio influenciada tanto por la temperatura del inicio de la liofilización como por el área, el análisis estadístico muestra diferencias significativas en ambos casos, sin haber interacción (Tabla 15, Anexo 3). Una de las particularidades de la lechuga es que se rehidrató rápidamente (5min) en comparación con el rábano y la carne (10min), pero en menor medida (**Tabla 8**).

La **Figura 17** muestra el comportamiento de los promedios del porcentaje de rehidratación de la lechuga. La **Figura 17a** representa la influencia de la temperatura de secado en la rehidratación, se pueden observar rectas más separadas que en **Figura 17b**, lo que significa una mayor influencia de la temperatura en la obtención de un mayor porcentaje de rehidratación, que el área, (**Figura 17b**), donde las rectas están más cercanas.

En las condiciones A, la temperatura fue menor desde la congelación, produciendo una congelación rápida, aunque a primera vista pareciera que generó menores daños a la estructura de la muestra, también formó poros de menor tamaño que no favorecieron mucho el secado ni la posterior rehidratación; pues se obtuvo un bajo porcentaje, siendo entre 40% y 55% para el área de 1x3mm y 2x2mm respectivamente. Marques (2009), obtuvo porcentajes mayores de 58% para acerola y 62% en guayaba liofilizada. Cabe resaltar que entre las muestras estudiadas en este trabajo la lechuga fue la que tuvo un menor porcentaje de rehidratación (**Tabla 11**), es probable que el tipo de alimento haya afectado, debido a que la hoja de lechuga sufre daño de ya sea por la manipulación, corte o congelación.

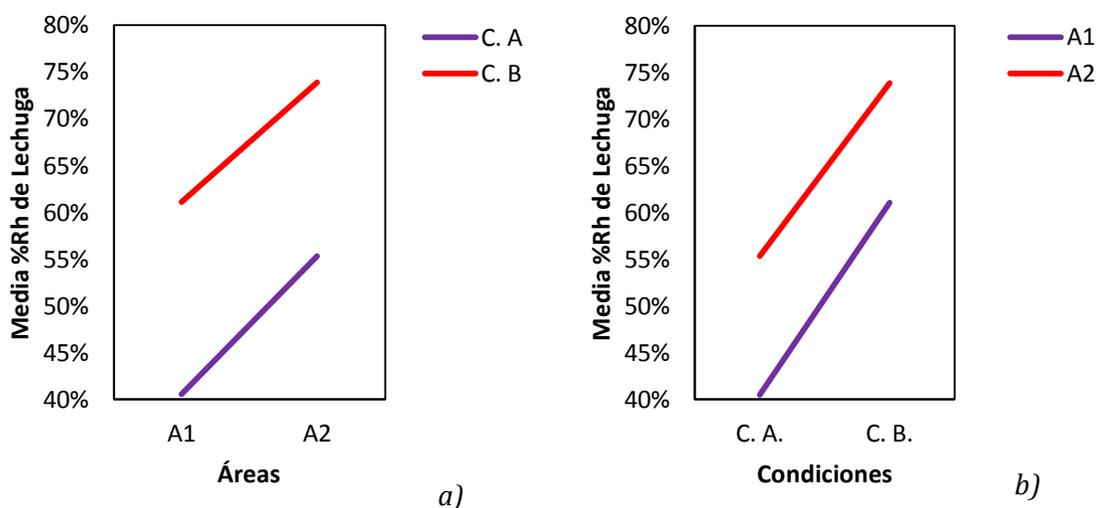


Figura 17. Gráfico de las medias marginales estimadas del porcentaje de rehidratación de lechuga. a) Influencia de la temperatura según el área de la muestra. b) Influencia del área según la temperatura del proceso.

Marques *et al.*, (2009) reportan que puede generarse una modificación del arreglo estructural de las pectinas durante la rehidratación la cual puede contribuir en la solubilización de polímeros pécticos; lo que además de generar disminución en las propiedades hidrofílicas de la muestra, es decir, de la capacidad de rehidratación, también favorece la pérdida de textura debido a que las pectinas tienen un papel esencial en la estabilidad de la pared celular al actuar como agente aglutinador de las fibras de celulosa (López-Aguilar, 2008).

En cambio, cuando la congelación y el secado se llevaron a cabo a mayores temperaturas, se favoreció la rehidratación debido a los grandes poros que se generaron durante la

sublimación, haciéndola más rápida y reduciendo el tiempo de secado, esto se ha reportado en otros trabajos (Krokida & Marinos, 2003; Witrowa-Rajcharet & Lewincki, 2006).

La **Figura 17b** muestra la variación de la rehidratación para las 2 áreas, se observa que hay diferencias significativas y el porcentaje de rehidratación es mayor para el área de 2x2cm que la de 1x3cm, tal vez esta última, al tener mayor área superficial específica, también fue más susceptible a recibir daño. Por lo tanto la mejor rehidratación se logró con el área de 2x2cm y condiciones B.

En el caso del *rábano*, tanto la temperatura del proceso como el grosor influyeron en la capacidad de rehidratación (**Tabla 11**). Como en la lechuga, el rábano se vio influenciado en mayor parte por la temperatura; siendo las condiciones B, a temperatura mayor, las que obtuvieron una mayor rehidratación, 91.02% y 88.48% para 4 y 8mm de grosor respectivamente; mientras que en las condiciones A, solo se obtuvieron 50.89% para las muestras delgadas y 26.79% para las gruesas, una diferencia de hasta 61 puntos entre temperaturas en las muestras de 8mm de grosor (**Figura 18**).

La disminución del porcentaje de rehidratación en las condiciones A, fue sobre todo debido al colapso de la estructura, que a pesar del proceso a una menor temperatura (-34°C), se provocó durante el cambio de temperaturas en el primer secado (de -34°C a -20°C), generando una matriz impermeable, que además de evitar una completa liofilización, también dificultó la rehidratación.

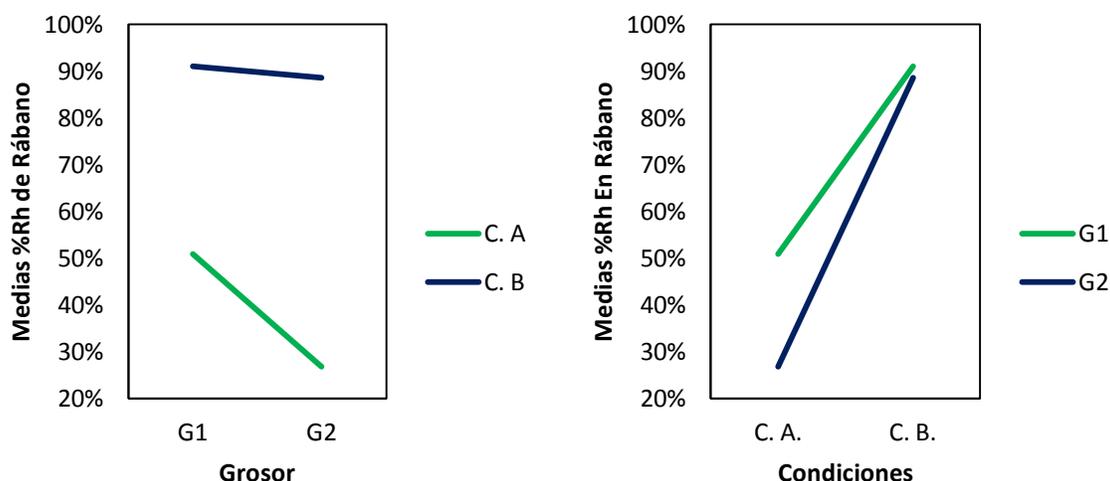


Figura 18. Gráfico de las medias marginales estimadas del porcentaje de rehidratación de rábano. a) Influencia de la temperatura según el grosor de la muestra. b) Influencia del grosor según la temperatura del proceso.

Este efecto es mayor en las muestras más gruesas y se puede observar en las fotografías de la **Figura 27d**), en el apartado de color, donde se presenta el rábano que exhibe colapso. También es probable que la baja temperatura de congelación no generara poros de tamaño suficiente para facilitar la rehidratación, tal como Ratti (2001) menciona, existe una mayor resistencia a la difusión para el escape del vapor en un proceso donde la congelación tuvo lugar a una mayor velocidad.

El grosor influyó en menor medida; el rábano de mayor grosor tuvo menor rehidratación que el delgado, la diferencia fue mayor para las condiciones A por el colapso ya mencionado. El grosor cobra importancia durante la sublimación del hielo; probablemente la transferencia de energía desde la fuente calórica, a través de la muestra congelada y hasta el frente de sublimación fuera más difícil, al igual que la transferencia del vapor desde el frente de sublimación hasta la superficie del producto, todo esto aumentó el tiempo de sublimación. Existe una interacción entre las 2 variables, es decir, los mejores resultados se lograron con grosores pequeños, pero solo en combinación con una temperatura que no provocara colapso.

Un alto porcentaje de rehidratación no siempre significa que el alimento no haya tenido algún daño, puesto que no toda el agua rehidratada es contenida por el alimento Vega (2003) encontró que un mayor daño de los tejidos vegetales (membrana y pared celular), puede implicar una mayor capacidad de rehidratación pero también una menor capacidad de retención de agua, es decir, que los tejidos al estar más dañados son capaces de absorber más agua pero no pueden retenerla, como en el caso del rábano liofilizado a (-15°C), y también al comparar los datos de rehidratación (**Tabla 11**) con los de dureza (**Tabla 13**).

A pesar de esto, se puede decir que el rábano liofilizado con las condiciones B y grosor 4mm fue el mejor producto, en base a su mayor porcentaje de rehidratación, aunque además conservó mejor el arreglo espacial de su estructura, sobre todo si se compara con lo que se obtendría con cualquier otro método de secado.

Los resultados de la *carne* se presentan en la figura 19, se observa que al igual que las otras muestras, la temperatura fue el factor que más influyó en su rehidratación (**Figura 19a**), y en este caso fue el único.

El grosor no fue una variable que tuviera un efecto significativo, según el análisis estadístico ANOVA (Tabla 17, Anexo 3), se puede observar también en la cercanía entre

las rectas de la **Figura 19b**), que representan los promedios de rehidratación de la carne. Esto podría ser debido a la estructura obtenida desde el pretratamiento, es decir la alta porosidad lograda por la cocción y posterior liofilización, facilitó desde el proceso de secado hasta la rehidratación y ayudó a que se presentara un proceso completo sin daños significativos en la muestra. Uno de los problemas citados en la liofilización de carne es el encogimiento; en la muestra estudiada, se presentó encogimiento pero fue de muy baja magnitud, lo que influyó en que la rehidratación se llevara a cabo sin dificultades.

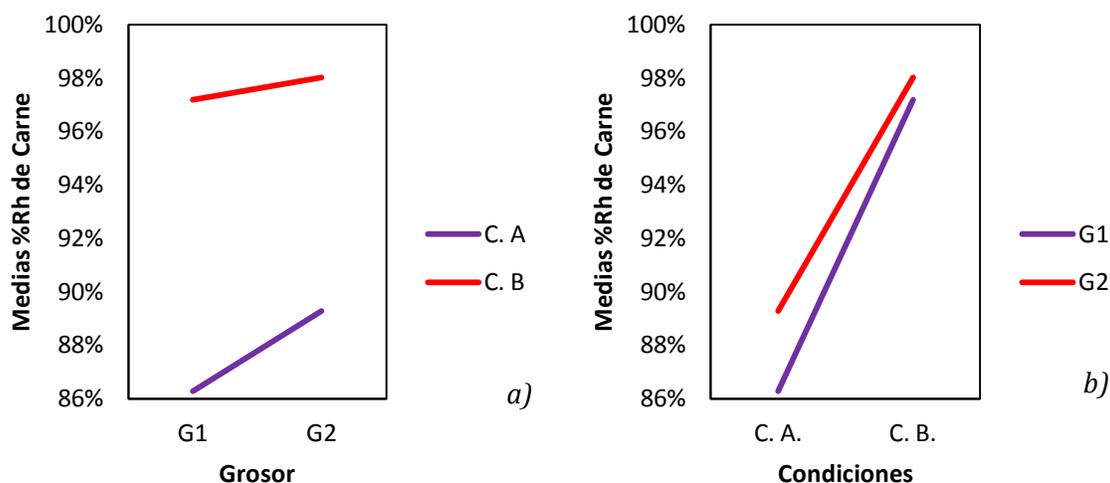


Figura 19. Gráfico de las medias marginales estimadas del porcentaje de rehidratación de Carne. a) Influencia de la temperatura según el área de la muestra. b) Influencia del área según la temperatura del proceso.

Realmente, la rehidratación fue muy buena para la carne, en todos los casos; siendo mayor de 85%, aunque se alcanzaron valores cercanos al 98% con las condiciones B, siendo de 97.18% en el de 4mm y 98.02% para 8mm. Esto concuerda con el 94- 98% reportado por Fark y Singh (1991) para el pollo y 87-95% de King *et al.* (1968) para el pavo (Hui 2008). Por lo tanto las mejores condiciones de secado para obtener una mayor rehidratación en la carne fue con un grosor de 8mm y las condiciones B.

3.4. DETERMINACIÓN DE COLOR

El primer juicio que se hace de la calidad de un alimento, es generalmente, su apariencia física, particularmente el color es un importante atributo sensorial.

Para la determinación del cambio en las características de color entre la muestra fresca y la rehidratada, se midió la magnitud ΔE , el cual mide el cambio integral de color en el

producto con los valores L^* (brillo-sombra), a^* (rojo-verde) y b^* (amarillo-azul); pero también se evaluó el cambio individual.

Tabla 12. Cambio de color en las muestras liofilizadas y rehidratadas

Muestra	Variación	ΔE Condiciones A	ΔE Condiciones B
Lechuga	Área 1 (1x3)	28.89 ^{aA}	13.69 ^{bA s}
	Área 2 (2x2)	34.15 ^{aB}	16.82 ^{bA}
Rábano ⁱ	Grosor (4mm)	21.19 ^{aA}	15.52 ^{bA s}
	Grosor (8mm)	23.73 ^{aB}	13.64 ^{bB}
Carne ⁱ	Grosor (2.5mm) ^s	4.11 ^{aA}	2.07 ^{bA s}
	Grosor (5mm)	8.07 ^{aB}	3.21 ^{bB}

* Letras diferentes (a ó b) entre columnas indican diferencia estadísticamente significativa ($P \leq 0.05$).

Símbolo diferente (A ó B) entre renglones indica diferencia estadísticamente significativa ($P \leq 0.05$).

s Indica significancia de la variable donde se encuentre

i Indica interacción entre ambas variables

La **Figura 20** muestra el promedio del cambio total de color en la lechuga. Se observó que el área no fue un factor que afectara el color, no existe diferencia significativa en el ΔE entre las muestras con áreas mayores y menores (**Tabla 12**).

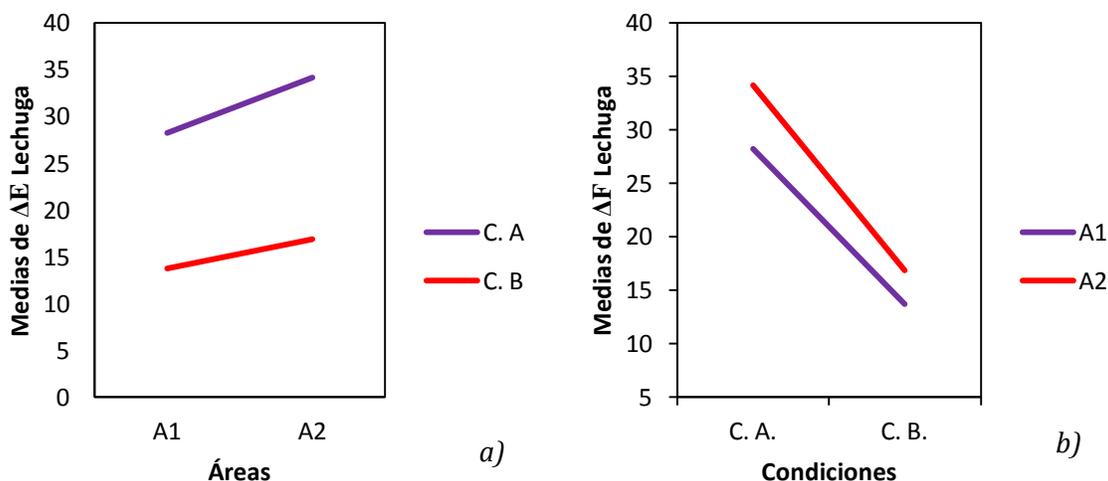


Figura 20. Gráfico de las medias marginales estimadas del ΔE de lechuga. a) Influencia de la temperatura según el área de la muestra. b) Influencia del área según la temperatura del proceso.

En contraste, las condiciones del proceso es la variable que más influyó en el ΔE ; esto a causa sobre todo del aumento en el parámetro L^* y la disminución de a^* y b^* . Puesto que la transferencia de calor durante la liofilización sólo se vio afectada por la temperatura del

proceso y por el grosor. Al ser similar el grosor, también la velocidad de congelación y la posterior sublimación, por lo que el daño fue de manera parecido entre ambos niveles de áreas.

Sin embargo, la afectación del color por la temperatura fue notoria como se observa en las **Figura 22a** y **b** contra las **Figura 22c** y **d**. Al contrario de lo reportado en la mayoría de los trabajos, el color tuvo un mayor cambio al disminuir la temperatura de secado, es probable que este daño haya sido producto de un cambio brusco en la temperatura en la meseta del secado primario (de -34 a -15°C) (**Figura 15** **Figura 22**), dando como resultado una elevada velocidad de sublimación que pudo haber dañado la estructura de la muestra, siendo la lechuga un producto altamente sensible al daño.

El parámetro L^* que define la brillantez de la muestra, ésta tuvo un ligero aumento con las condiciones A, sobre todo en las de mayor área, como se observa en la figura 21.

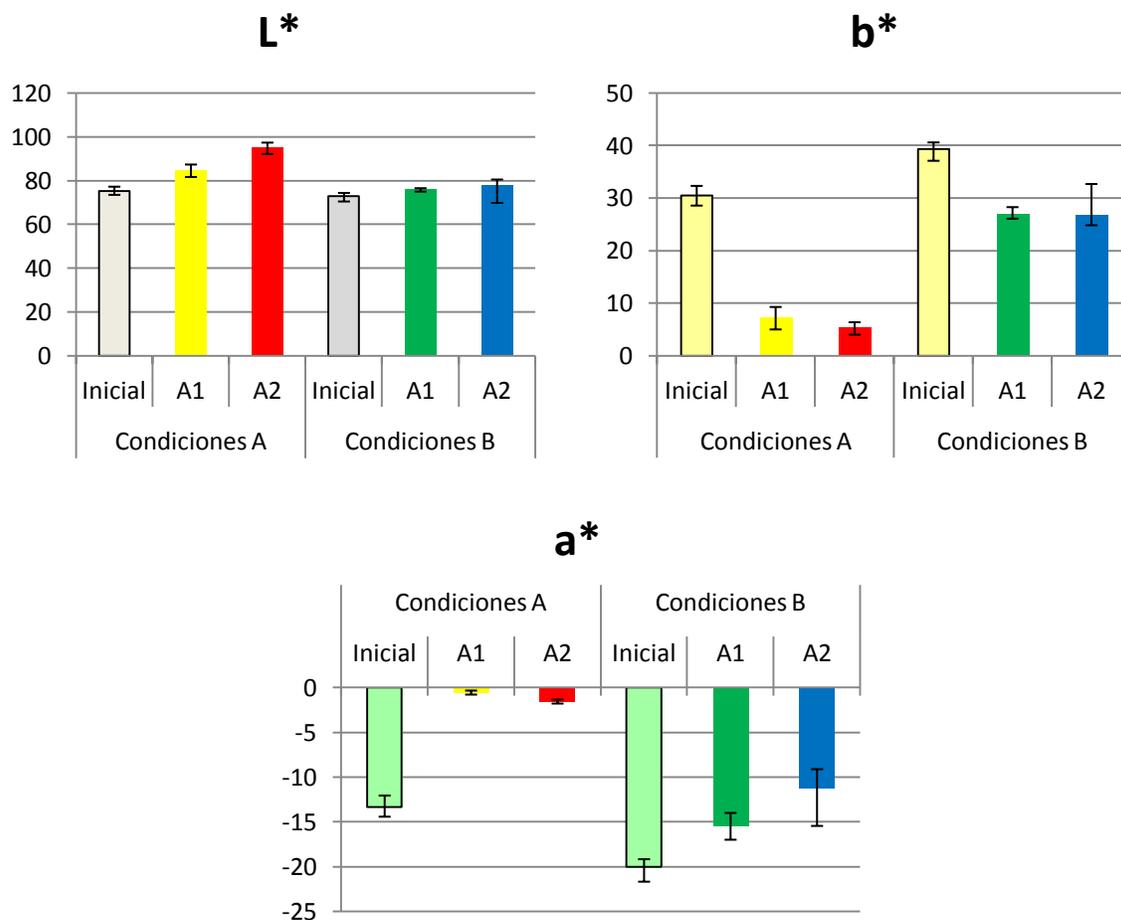


Figura 21. Gráficas del cambio en los parámetros L^* , a^* y b^* en la Lechuga. Donde A1= área 1x3cm y A2=área 2x2cm.

Oetjen (1999) menciona que a menor temperatura, se forman poros muy pequeños que proporciona mayor brillantez al producto. Mientras que en las condiciones *B* donde se tenían poros grandes, el parámetro L^* , se mantuvo muy cercano a los valores de la lechuga fresca. El mayor cambio en color de la lechuga se dio en los factores a^* y b^* (**Figura 21**), teniendo valores más cercanos al 0, es decir que son más cercanos al blanco. Los valores de a^* aumentaron en las condiciones *A*, esto significa una merma en el color verde y aumento en los rojos. También los valores de b^* disminuyeron lo que representó un aumento de azules y la disminución de amarillos, esto provocado por una pérdida del contenido de clorofilas. Estos cambios fueron menores para las condiciones *B* que mantuvieron el color verde bastante bien (**Figura 22**).



Figura 22. Lechugas liofilizadas a) condiciones A, 1x3cm, b) Condiciones A 2x2cm, c) condiciones B 1x3cm y d) condiciones B 2x2cm.

Un acercamiento nos permite observar las características de la estructura porosa obtenida, la distribución de los cristales del hielo sublimados y por el paso del vapor en la lechuga tratada en condiciones *B* (**Figura 23**). Este arreglo de poros permitió mantener la estructura casi intacta de la muestra manteniendo mejor sus propiedades físicas y sensoriales. La temperatura de las condiciones *B* a pesar de ser mayores (-17°C), mantuvieron mejor las características de color de la lechuga debido a que el cambio de temperatura fue menos

drástico durante el secado primario y la clorofila se mantuvo sin daño, a diferencia de las condiciones A.

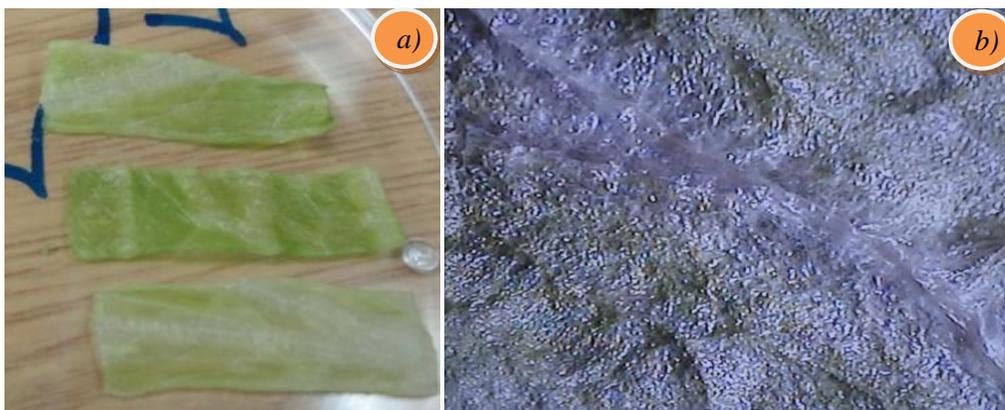


Figura 23. Lechuga. Muestra fresca a), Muestra liofilizada con las condiciones B vista al microscopio (100X) b).

El rábano se vio afectado poco en lo que respecta al color (**Tabla 12**), según el análisis estadístico la temperatura fue la única que produjo cambios significativos en el ΔE de las muestras (Tabla 19 Anexo 3). Al igual que Oetjen (1999), Hua (2010) menciona que el color de los productos secos se vuelve más brillante al incrementar la velocidad de congelación. Sin embargo al contrario de éstos, a temperaturas de proceso más bajas, se produjeron valores mayores de ΔE , esto está estrechamente relacionado con el porcentaje de rehidratación de la muestra y el colapso sufrido durante el proceso, el cual fue mayor en las muestras gruesas.

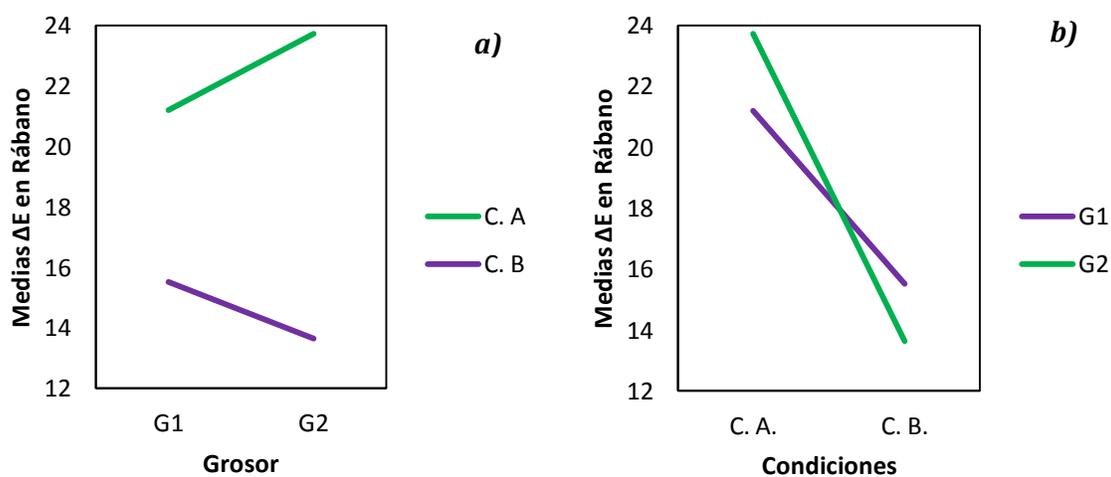


Figura 24. Gráfico de las medias marginales estimadas de ΔE del rábano. a) Influencia de la temperatura según el grosor de la muestra. b) Influencia del grosor según la temperatura del proceso.

La pobre rehidratación del rábano que se obtuvo en las condiciones A, también generó una deficiente recuperación del color original, las muestras que tuvieron colapso presentaron en la matriz colapsada, una zona con coloración marrón, este ligero pardeamiento no enzimático fue mayor al aumentar el grosor (8mm), probablemente provocado por el mayor contenido de humedad. Es decir, el cambio de color, solo fue estadísticamente significativo al variar el grosor en las condiciones A. Y para muestras que no tuvieron colapso (condiciones B), el cambio de color fue mínimo sin importar el grosor de la muestra siendo el ΔE menor para las muestras gruesas (13.63) que para las delgadas (15.52) (**Figura 24**).

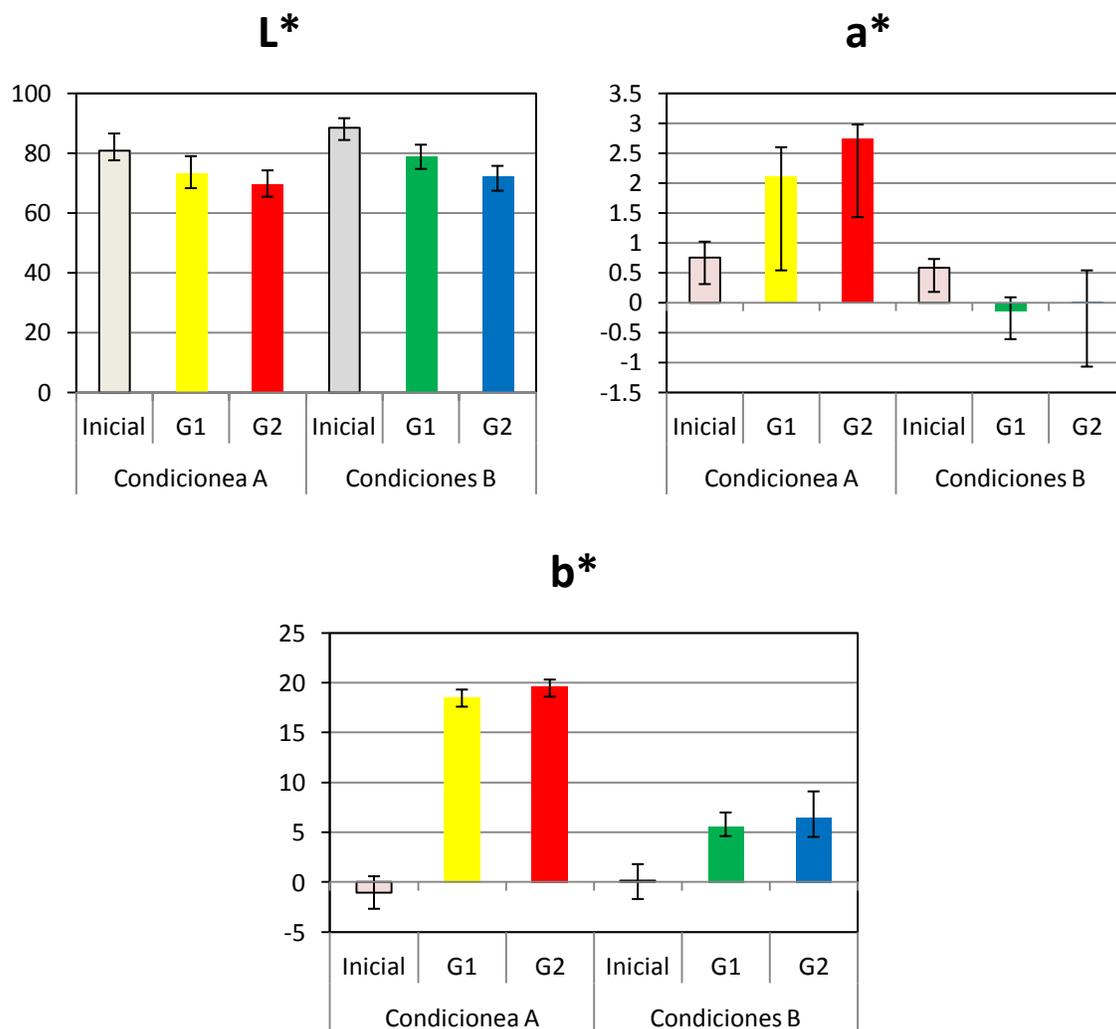


Figura 25. Efecto de la temperatura y grosor en los parámetros L^* , a^* y b^* del Rábano liofilizado y rehidratado. Donde G1= 4mm y G2=8mm.

Los parámetros de color que tuvieron mayor cambio fueron el a^* y b^* ; al contrario de las otras muestras, como por ejemplo la lechuga, donde el factor L^* de brillantez aumentaba al disminuir la temperatura del proceso, en el rábano, el valor de L^* disminuyó en todos los casos aunque la variación no fue estadísticamente significativa (**Figura 25**).

El parámetro a^* (rojos) disminuyó ligeramente en las condiciones *B*; mientras que para las *A* aumentaron ligeramente; seguramente esto fue reflejo del obscurecimiento de la muestra colapsada.

Los valores de b^* (amarillos) se incrementaron en casi 20 puntos en las condiciones *A*, también generado por el colapso del centro de la muestra y a la pobre rehidratación (**Figura 27**). En las condiciones *B*, el valor de b^* también aumento pero los cambios fueron menores y poco significativos, haciendo solo ligeramente más amarilla a la muestra.

En ambos parámetros (a^* y b^*), una mayor proximidad al valor 0, es igual a la cercanía al color blanco. Por lo que se puede decir que el color característico del rábano se mantuvo mejor para mayores temperaturas, muestras sin colapso y mayores grosores. Es decir con un grosor de 4mm y en las condiciones *B*.

Los cambios en estructura y color del rábano se presentan en las **Figura 26** y **Figura 27**, la **Figura 26a** muestra el rábano fresco y la **Figura 26b** un acercamiento a la estructura del rábano liofilizado con las condiciones *B*.

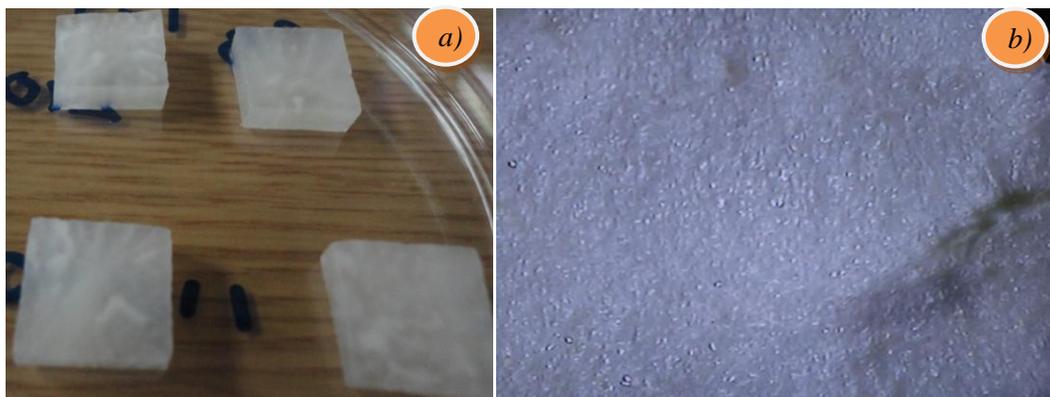


Figura 26. Rábano. a) Muestra fresca. b) Muestra liofilizada con las condiciones *B* vista en microscopio (10X).

Se observan en la **Figura 26b** los pequeños poros formados durante la liofilización y el brillo que estos le dan, esto fue lo que provocó como ya se dijo, la conservación del valor L^* . Aunque debido a la falta de trabajos publicados en este sentido, es imposible comparar estos resultados.



Figura 27. Rábanos liofilizados a) Condiciones A, 4mm, b) Condiciones A 8mm, c) Condiciones B 4mm y d) Condiciones B 8mm.

En la **Figura 27** se puede observar el daño en el rábano liofilizado en condiciones A (-34°C), un colapso del centro de las muestras sufrido durante el procesamiento, se observa un mayor daño en los rábanos de mayor grosor (figura 27ab). Obteniendo rábanos con los mejores resultados en las condiciones B (figura 27cd).

Por otro lado la carne tuvo muy poco cambio de color, en la *carne cocida* el color está dado por la desnaturalización de la mioglobina que permite la oxidación del hierro y produce el ferrihemocromo, que tienen el color marrón característico de la carne cocida, éste pigmento se mantuvo en general durante todo el proceso, pues la carne presentó menores valores de ΔE (máximo 8 puntos), en comparación con las otras muestras estudiadas (**Tabla 12**), como resultado de las variaciones de condiciones de proceso y grosor. Sin embargo, el análisis de varianza revela que estas diferencias son estadísticamente significativas (Tabla 20 anexo 3). Y que además están correlacionadas: una, en función de la magnitud de la otra variable. Siendo la temperatura la que tuvo mayor influencia (**Figura 28**). Las muestras gruesas fueron ligeramente más oscuras y su cambio de color fue mayor, esto concuerda con lo obtenido por Babic *et al.*, (2009) en carne de pollo, quien apunta que en general los valores de color fueron más cercanos a aquellos sin tratamiento cuando las muestras eran

delgadas. Probablemente porque en la carne, la transferencia de materia y energía fue más efectiva con un menor grosor, produciendo menor daño a la muestra.

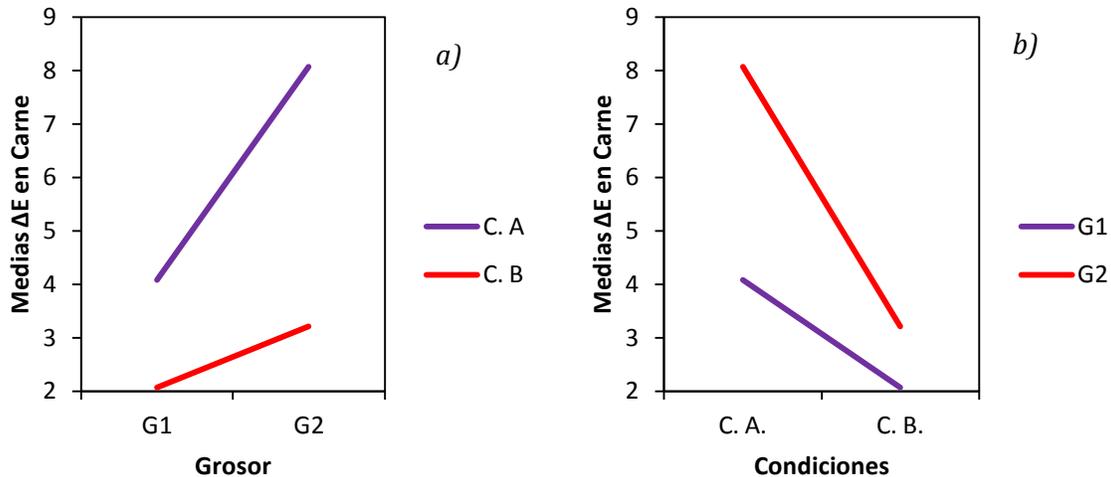


Figura 28. Gráfico de las medias marginales estimadas de ΔE de la carne. a) Influencia de la temperatura según el grosor de la muestra. b) Influencia del grosor según la temperatura del proceso.

Los valores de ΔE fueron aun menores cuando, además de un menor grosor, se utilizaron temperaturas más altas (condiciones B) (Figura 29). Stone y May (1969), encontraron que a temperaturas menores de congelación y proceso mantienen mejor el color de las carnes blancas, que aquellas con temperaturas mayores; debido, como ya se ha dicho antes, a la velocidad de congelación y el tamaño de los cristales.

Contrario a esto, las muestras liofilizadas a -34°C tuvieron una pérdida de color mayor que para las condiciones B.

Se produjo un ligero oscurecimiento en la carne liofilizada con las condiciones A (-34°C), representado por un pequeño aumento del valor de ΔE , que pudo haber sido causado por la oxidación de grupos hemo después de la salida de la muestra del proceso o cierto daño mecánico durante la preparación de la muestra (Figura 29).

Además en la figura 30, se puede observar un acercamiento a la muestra liofilizada con las condiciones B, se observa las fibras de la carne que presentan daño.



Figura 29. Carne liofilizada a) condiciones A, 2.5mm, b) Condiciones A 5mm, c) Condiciones B 2.5mm y d) Condiciones B 4mm..

Esto se pudo observar en una disminución pequeña pero generalizada del parámetro L^* que fue mayor al disminuir la temperatura; además también existió un pequeño aumento del parámetro a^* de la carne liofilizada en las condiciones A (Figura 31).

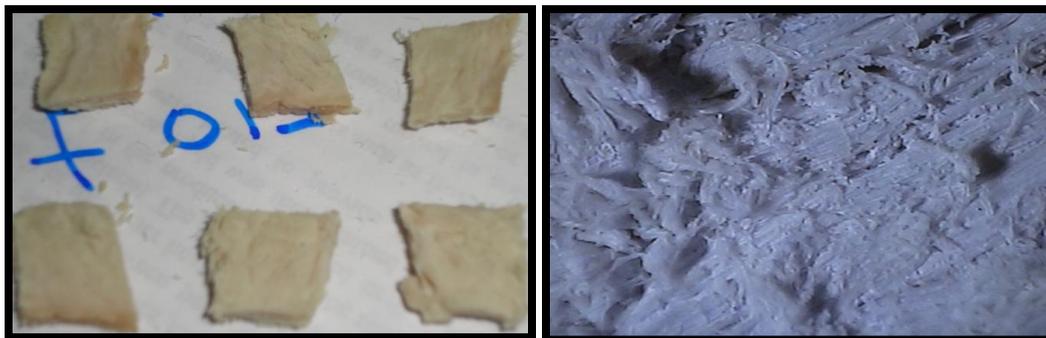


Figura 30. Vista en microscopio de las fibras de la carne en la liofilización con las condiciones B (4X).

Mientras que en general todos los parámetros se mantuvieron bastante cercanos a los originales en la carne liofilizada y rehidratada fueron aun más cercanos en las condiciones B. Babic *et al.* (2009), también reporta que no hay diferencia significativa en los parámetros a^* , b^* y L^* para carne de pollo congelada a mayor o menor velocidad; concordando con los obtenidos en este trabajo.

El valor b^* fue el que tuvo menor variación, al igual que los otros parámetros, estuvo bastante cercano al de la carne cocida sin liofilizar y aumentando ligeramente para las muestras liofilizadas a menor temperatura (condiciones A).

En general, las condiciones B produjeron menores cambios de color en los valores a^* y b^* que con las condiciones A y solo disminuyeron en el factor L^* de la carne tratada, todos los cambios fueron mínimos.

Produciendo en todos los casos una carne cocida liofilizada y rehidratada con un color muy semejante a la original. Sobre todo con las producidas con las condiciones B y un grosor de 4mm.

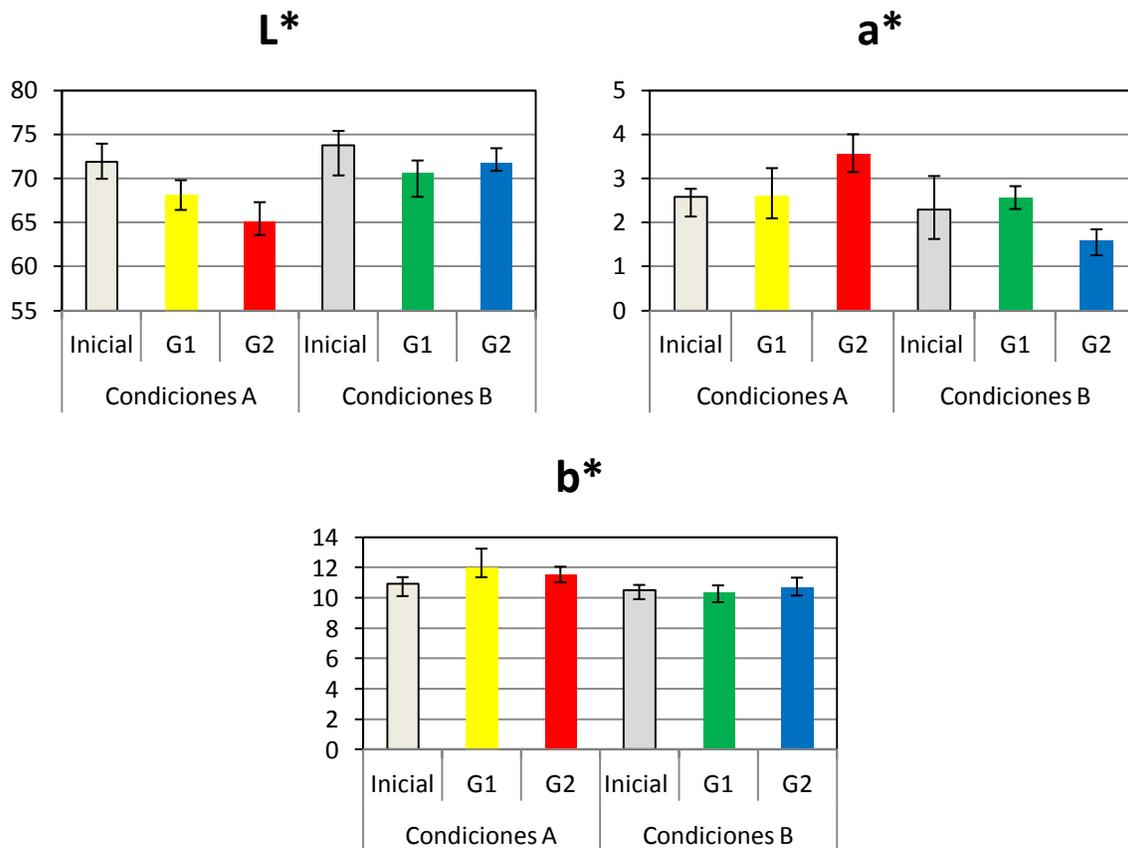


Figura 31. Efecto de la temperatura y grosor en los parámetros L^* , a^* y b^* de la Carne liofilizada y rehidratada. Donde G1= 4mm y G2=8mm.

3.5. DETERMINACIÓN DE TEXTURA (DUREZA)

La textura puede considerarse como una manifestación de las propiedades reológicas de un alimento. Es un atributo importante de calidad que influye en la preferencia del consumidor; en un alimento liofilizado da cuenta del daño que el proceso generó en la estructura de un producto. Por lo tanto, el cambio de textura está íntimamente ligado al porcentaje de rehidratación, observándose que a mayor rehidratación, menos evidente es el cambio en la textura de la muestra, esto se puede ver al comparar los datos de dureza en **Tabla 13** con los de rehidratación de la **Tabla 11**.

La **Tabla 13** presentan valores positivos y negativos del cambio en la textura, los positivos significan un aumento de la dureza y los negativos una disminución, esto en comparación al producto sin liofilizar. Mientras más cercano a 0 es este valor, menor fue el cambio provocado por la liofilización.

Tabla 13. Cambio de Dureza en muestras liofilizadas y rehidratadas

ΔF			
Muestra	Variación	Condiciones A	Condiciones B
Lechuga	Área 1 (1x3) ^s	-0.0195 ^{a A}	-0.0146 ^{b A s}
	Área 2 (2x2)	-0.0147 ^{a B}	-0.0082 ^{b B}
Rábano	Grosor (4mm) ^s	-0.1570 ^{a A}	-0.141 ^{b A}
	Grosor (8mm)	-0.2790 ^{a B}	-0.270 ^{a B}
Carne ⁱ	Grosor (2.5mm) ^s	-0.0050 ^{a A}	0.0421 ^{b A s}
	Grosor (5mm)	0.0202 ^{a B}	0.0420 ^{b A}

* Letras diferentes (a ó b) entre columnas indican diferencia estadísticamente significativa ($P \leq 0.05$).

Símbolo diferente (A ó B) entre renglones indica diferencia estadísticamente significativa ($P \leq 0.05$).

s Indica significancia de la variable donde se encuentre

i Indica interacción entre ambas variables.

Los resultados muestran que para los productos vegetales, al aumentar la temperatura de secado, hay un menor cambio en su textura y que la geometría del producto fue una variante determinante en el cambio de la dureza del material.

Mientras que en la carne, al aumentar la temperatura de secado, también aumentaron los valores de cambio de textura, además la mayoría de los valores fueron positivos significando que la muestra presentó un incremento en la dureza (**Tabla 13**).

En la *lechuga*, el análisis estadístico (Tabla 21 Anexo 3) indicó que a menor temperatura (condiciones A), hay una mayor pérdida de dureza (**Tabla 13**).

Esto contrasta con lo reportado en otros estudios (Krokida & Marinos, 2003; Ratti C. , 2007) que refieren que los cristales pequeños, resultado de una congelación rápida y la conservación de la temperatura por debajo de T_g , mantienen mejor la estructura del alimento. Debido a que la célula vegetal es fácilmente degradable, algunas implicaciones que el tratamiento tiene sobre la textura, es en las proteínas de la pared celular, que son susceptibles a desnaturalización por cambios de pH, como los generados por la concentración provocada por la eliminación de agua y sustancias buffer en la congelación y deshidratación.

Potter (1970) refiere que tal desnaturalización determina el estado de la presión osmótica en los organelos de la célula, haciendo que el agua y las sustancias disueltas en ellas se difundan fuera de las células, lo que deja a los tejidos restantes en condiciones de blandura y marchitez; como los observados en la lechuga liofilizada en las condiciones A. La rigidez de los productos vegetales, es dada además por sustancias pécticas, celulosas y hemicelulosas, que forman la pared de la célula vegetal; en particular la pectina, que funciona como una especie de cemento para la célula, pudo haber presentado una solubilización, con lo cual la muestra pierde rigidez y hay migración de solutos; lo que dificulta que las células recobren su turgencia disminuyendo la fuerza necesaria para hacer la punción.

Tal vez el daño sufrido por el tejido en la liofilización en condiciones A (-34°C), se generó durante los cambios de temperatura en el secado primario y secundario (**Figura 14**), que fueron suficientemente grandes como para generar un daño irreversible en la lechuga, sobre todo por el pequeño grosor de la muestra.

Probablemente durante el traslado de la muestra desde el congelador (-40°C) hasta la liofilizadora, se produjo un calentamiento que generó un aumento del tamaño de los cristales en ciertos lugares y/o un daño a la estructura del la lechuga, haciendo disminuir el porcentaje de rehidratación y produciendo una mayor pérdida de rigidez, lo que favoreció la menor rehidratación dando una lechuga poco firme y con poca turgencia.

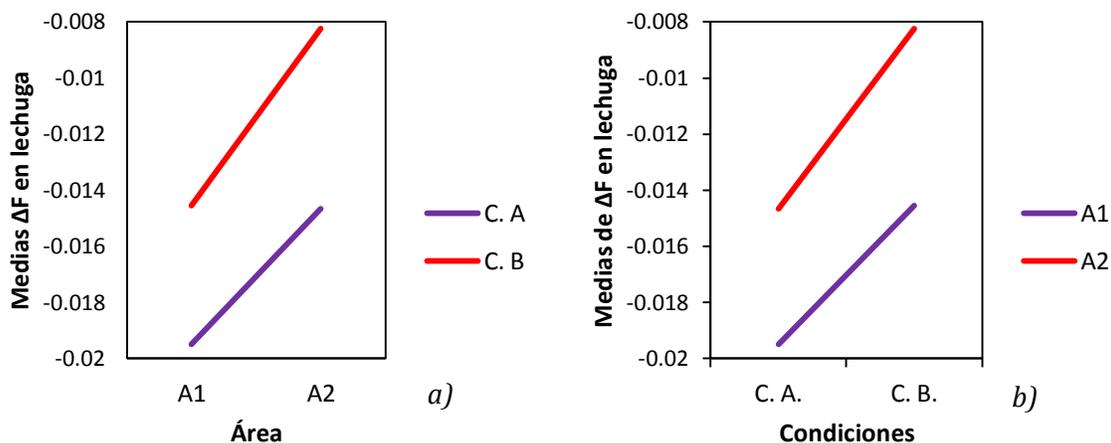


Figura 32. Gráfico de las medias marginales estimadas del cambio de dureza en lechuga. a) Influencia de la temperatura según el grosor de la muestra. b) Influencia del grosor según la temperatura del proceso.

La acción del área fue similar al de la temperatura, entre menor fue el área, mayor el cambio de dureza de la lechuga, tal vez debido a que el tamaño 1x3cm, con un corte alargado, fuera más sensible al deterioro durante la manipulación y procesamiento que la de 2 x 2 cm (**Figura 32**). A pesar de esto, se puede decir que en general la lechuga liofilizada en las condiciones B (-17°C y 48h) con un área mayor (2x2cm) fue la que mantuvo mejor sus cualidades, y probablemente sea bien aceptada por el público.

En el caso del *rábano* la degradación de las células también afectó el producto, pues todas las muestras liofilizadas y rehidratadas reportaron una disminución significativa de la dureza, manifestado en los valores negativos del ΔF (**Tabla 13**).

Esto concuerda con lo reportado por Marques (2009) quien señala que, a pesar de que la liofilización protege la estructura primaria y la forma del material, con un colapso mínimo, manteniendo la estructura del alimento y generando un producto de alta porosidad; en la liofilización difícilmente es lograda una completa restauración de la muestra fresca.

La temperatura de procesado (condiciones A y B) no afectó significativamente el cambio de textura (**Figura 33**), mientras que el grosor tuvo una importancia vital, según el análisis de varianza (Tabla 22 Anexo 3).

A mayor grosor se presentó una mayor pérdida de dureza, teniendo valores para 4mm y 8mm de -0.157 y -0.279 respectivamente en las condiciones A, los valores obtenidos fueron aparentemente muy semejantes entre las 2 diferentes condiciones de proceso (**Figura 33**).

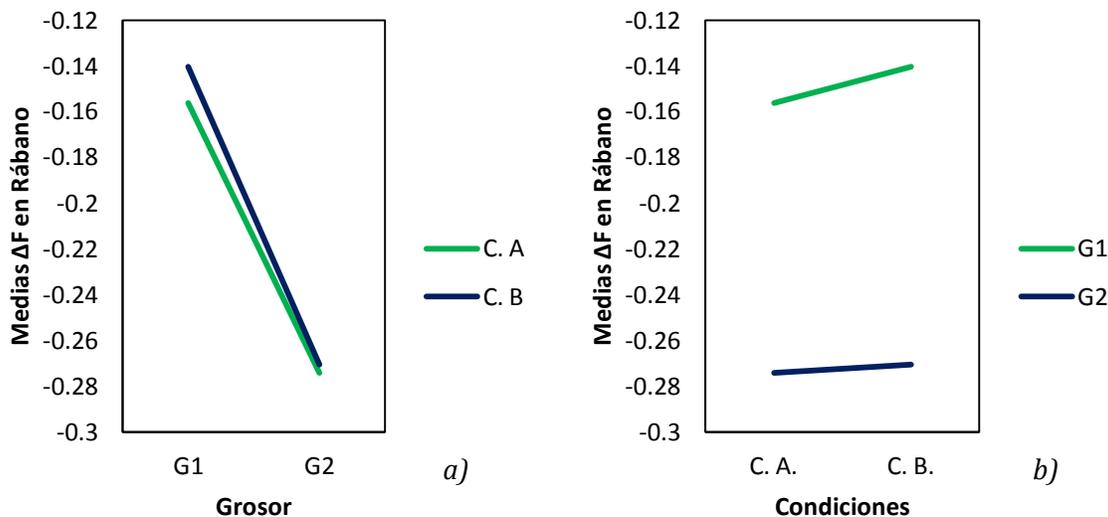


Figura 33. Gráfico de las medias marginales estimadas del cambio de fuerza de penetración de rábano. a) Influencia de la temperatura según el área de la muestra. b) Influencia del área según la temperatura del proceso.

Sin embargo, las muestra tratadas en las condiciones A (-34°C) que debieron haber mantenido mejor la dureza y estructura por la baja temperatura que las tratadas en condiciones B (-15°C), mostraron un colapso en el centro del rábano, mayor en el grosor de 8mm que en el de 4mm; que generó una matriz poco permeable donde la rehidratación fue menor que en el resto de la muestra, formando una estructura compacta (**Figura 27**) con una dureza heterogénea y presentando encogimiento.

Esto debido a que en estas condiciones, el grosor impidió que la humedad disminuyera de la misma manera para el rábano de 8mm que en el de 4mm (**Figura 15**), siendo mayor en la muestra gruesa que en la delgada para un mismo tiempo, y al aumentar la temperatura de la placa calefactora es probable que se rebasara la temperatura crítica, generando así el colapso (Ratti, 2007).

También la diferencia entre los grosores, puede estar relacionada con la mayor rehidratación, que hubo en las muestras de 4mm, lo que podría sugerir que la estructura primaria de la muestras se mantuvo mejor con esta forma y reflejándose en la menor pérdida de dureza. Posiblemente, el alto contenido de lignina en el rábano pudo haber ayudado a mantener la estructura de las demás muestras, pues es un polímero insoluble considerado recalcitrante que proporciona a las plantas resistencia mecánica en sus tejidos. Sin embargo, en la pared celular vegetal, la lignina forma una matriz que envuelve a la

celulosa y hemicelulosa, por lo que su degradación es un prerequisite para la hidrólisis de los demás componentes de la biomasa vegetal (Ortiz, 2009). Alzamora (2008), refiere que si se supera la T_c del alimento, es posible que este compuesto se degrade, propiciando la pérdida de la estructura tal y como sucedió en las muestras tratadas con las condiciones A y 8mm.

Es probable que si la temperatura de la charola en las mesetas del secado primario fueran a menor temperatura, la estructura se mantendría evitando el superar la T_c del rábano y manteniendo las ventajas reportadas por numerosos autores (Rhin & Koh, 2011; Ratti, 2007; Alzamora 2008; Frank, 1998), respecto al menor tamaño de poro y la conservación de la estructura y por lo tanto de la textura.

Sin embargo, también aumenta el tiempo de residencia y por lo tanto, los costos. Esto se evitó con el proceso B. teniendo las mejores muestras con un grosor de 4mm.

La dureza de la carne liofilizada y rehidratada se vio afectada por la temperatura y el grosor, así como por la interacción de ambas variables (Tabla 23), aunque la temperatura del proceso fue el factor más importante para el cambio de dureza de la muestra.

Pues la muestra liofilizada a menor temperatura presentó menor cambio en su dureza que aquella a mayor temperatura (**Figura 34a**), mostrando valores cercanos al 0.

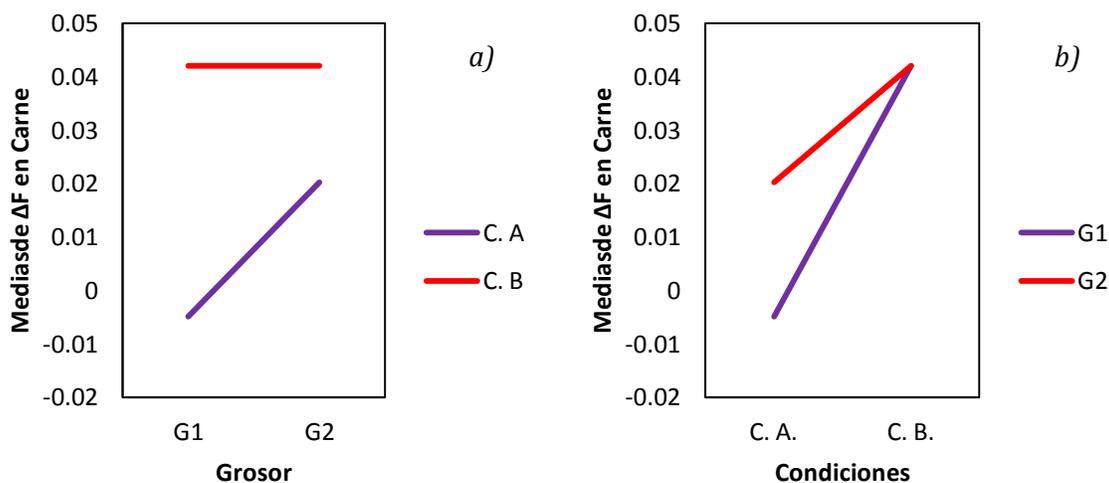


Figura 34. Gráfico de las medias marginales estimadas del cambio de dureza en Carne. a) Influencia de la temperatura según el área de la muestra. b) Influencia del área según la temperatura del proceso.

Esto probablemente debido a una congelación rápida con poros de tamaño pequeños y más numerosos (Rhin & Koh, 2011), que mantuvieron la estructura tridimensional de las fibras

mejor y también a la buena rehidratación de las muestras, que mantuvieron los valores de dureza. Lo cual coincide con lo reportado por diferentes autores (Ratti, 2007; Babic et al, 2009; Snowman, 1997).

En la liofilización a mayor temperatura, hubo un pequeño aumento en el cambio de textura, reflejo del daño a las fibras del tejido; lo cual concuerda con lo mencionado por Szczesniak (1970), respecto a que la pérdida de agua del tejido durante la deshidratación, está acompañada por la disminución de los espacios endomisiales, la reducción progresiva de diámetro de la fibra muscular, aumento de los espacios interfibril, la desaparición de estrías longitudinales y la disminución de distinción de estriaciones cruzadas, aunque durante la rehidratación, se produce un incremento en diámetro de la fibra, un retorno parcial de los espacios endomisiales y una mayor distinción de estriaciones cruzadas. Sin embargo, las fibras no regresan a su estado original, provocando el aumento de la dureza de la muestra.

Un punto importante de tomar en cuenta fue el efecto del pretratamiento de la carne, el tiempo de cocción tiene una importante efecto en la medición de los parámetros mecánicos de la textura Szczesniak también reportan que generalmente entre mayor sea el tiempo de cocción, los valores de dureza medidos disminuyen.

La **Tabla 13a**, muestra que la carne liofilizada de 5mm presentó una mayor dureza que la de 2.5mm (**Figura 34b**). Esto coincide con lo dicho por Babic (2009) quien estudió el cambio de textura en pechuga de pollo liofilizada rehidratada y cocida, él reporta que en general, la carne liofilizada presenta mayor dureza que la fresca y que a mayor grosor la muestra se vuelve más dura y difícil de consumir.

Sin embargo, en general la carne fue el producto con menor cambio de textura de todas las muestras estudiadas. De entre ellas la liofilizada a menor temperatura (condiciones A) y con un grosor de 4mm tuvo las mejores características que probablemente agraden al consumidor ya que fue la más parecida a la muestra sin tratar.

3.6. ANÁLISIS COSTO V/S BENEFICIO

El análisis costo beneficio nos indica la viabilidad del proceso y facilita la comparación con otras operaciones. Se calculó el costo de la operación, considerando un gasto energético de 8, 7.5 y 8 Amperes para la bomba de vacío, la cámara de liofilización y el condensador respectivamente, se utilizó un costo energético de \$0.747 Kwh y un voltaje de 127 Volts. La tabla siguiente muestra los resultados en términos de precio.

Tabla 14 Tabla comparativa del gasto de energía en los procesos de liofilización

Muestra	Kg Prod.	Condiciones	Condiciones A			
			t	Kw	Costo	\$/Kg
Lechuga	0.025	A	49h	146.24	\$109.21	\$4,439.4
		B	45h	134.302	\$100.32	\$4,078.1
Rábano	0.236	A	68h	202.946	\$151.60	\$641.29
		B	45 h	134.302	\$100.32	\$424.37
Carne	0.203	A	71h	211.899	\$158.32	\$780.67
		B	45 h	134.302	\$100.32	\$494.67

Se observó que el mayor gasto energético se obtuvo para las condiciones A lo cual seguramente se debe a la temperatura menor de congelación y secado que provocó un mayor tiempo de proceso, aumentando en mayor medida para la carne liofilizada durante 71h, mientras que con las condiciones B con una mayor temperatura de la operación, se logró una disminución de hasta un 36.6% en el gasto de energía en la liofilización de la carne, esta disminución fue menor en el caso del rábano y la lechuga, donde la disminución fue de un 33.8% y 8.14% respectivamente, debido a que el proceso comenzó con un menor tiempo sobretodo en el caso de la lechuga.

El equipo de liofilización utilizado tuvo un gasto alto de energía por cantidad de producto liofilizado, esto debido sobre todo a la poca influencia que tuvo, la cantidad y la temperatura en el consumo de energía, siendo ésta solo función del tiempo de procesamiento. Esta es una de las desventajas de la liofilización, su alto costo energético, pues además del costo que tiene como tal la operación de secado, se debe sumar el costo de la congelación previa del producto, Franks (1998) señala que esto, aunado a la falta de conocimiento integral de los fenómenos que suceden durante el proceso, ha sido una de las razones por la que el proceso de liofilización no había tenido un mayor auge dentro de la bioindustria. Sin embargo, como se ha observado en este trabajo, al encontrarse las condiciones optimas del secado de un alimento, se puede reducir el gasto energético, consiguiendo materiales de alta calidad y con menores daños en comparación con otros procesos (Ratti, 2001).

4. CONCLUSIONES

- La liofilización es una operación compleja en que intervienen muchos factores tanto del proceso, como del equipo y del producto alimenticio a liofilizar. Al ser los alimentos sistemas compuestos de diversas sustancias y estructuras, hay muchas variables que intervienen en esta operación.
- Se concluyó que las condiciones del proceso fue la variable con mayor influencia para determinar la conservación o cambio en las características de las muestras, sobre todo en la lechuga y carne; afectando directamente sus características de rehidratación, color y textura.
- La operación se vio regida, según la temperatura, por la transferencia de materia o energía. Para menores temperaturas, se favoreció la transferencia de materia, mientras que para mayores, la transferencia de energía.
- La conservación de la temperatura por debajo de T_c , fue de vital importancia para llevar a cabo una eficiente sublimación, pues como se pudo observar en el caso del rábano, un aumento por encima de esta, causa daños severos e irreversibles.
- El grosor, afectó sensiblemente los parámetros de calidad, y fue determinante para obtener la humedad final deseada, sin embargo, cobra importancia al interactuar con la temperatura, además de influir en la velocidad de secado y por lo tanto en el tiempo y consumo de energía.
- Las características del alimento fueron determinantes, su susceptibilidad al daño, como el caso de la hoja de lechuga; su composición química como el contenido de lignina en el rábano o el tipo de proteínas en la carne y la manipulación previa también fueron factores que afectaron a las características de producto final.
- Los productos vegetales fueron los que presentaron mayor afectación en sus características físicas siendo la más afectada la dureza debido al cambio en sus estructuras celulares.
- En la lechuga se observó mayor afectación en sus cualidades, con un menor porcentaje de rehidratación y por lo tanto cambios notables en la dureza y color;

influenciados más por la temperatura que por el área. Las mejores características y menor consumo de energía se lograron con las condiciones *B* y un área de 2x2cm.

- El rábano fue la muestra más difícil de liofilizar y más susceptible al colapso, sin embargo, se pudo llegar a condiciones con temperaturas mayores que mantuvieran sus características en las condiciones *B* y con 4mm de grosor.
- La carne con el pretratamiento de cocción facilitó la liofilización, la cual modificó muy poco sus características en función de las variables; obteniéndose menor consumo de energía a -17°C y 2.5mm.
- Se puede decir que el porcentaje de rehidratación y ΔE se vieron más afectados por la temperatura, mientras que el ΔF por la interacción de ésta con el grosor.
- Asimismo de la conservación de las características se sumó el consumo de energía para la determinación de las variables del proceso y la muestra.
- Se pudo liofilizar el alimento en condiciones menos intensas, generando productos de mayor calidad, estableciendo relaciones entre parámetros de la muestra (forma) y del proceso (temperaturas) en los cambios físicos y fisicoquímicos del material a liofilizar.
- Además, los resultados obtenidos en este trabajo, confirman que al ajustar los parámetros, del alimento, del equipo y del proceso se puede llevar a cabo una operación de liofilización que genere productos alimenticios de alta calidad y una larga vida de anaquel. No siendo necesario llevar a cabo el proceso a muy bajas temperaturas ya que también se pueden provocar daños irreversibles, aumentando el tiempo y costos del proceso. Por lo que a pesar de ser de alto costo, vale la pena ya que el producto rehidratado recupera en general las características originales rápidamente.
- Se logro obtener las mejores condiciones para la deshidratación de los ingredientes que forman parte del pozole, que a la larga generen un producto instantáneo comercializable. Proporcionando una mayor información acerca de este proceso, que comienza a tener un mayor auge en la industria de los alimentos.

ANEXOS

ANEXO 1 OPTIMIZACIÓN DE CURVAS Y ACTIVIDADES PREVIAS

Debido a la deficiencia en bibliografía publicada sobre algunos de los temas de liofilización de alimentos del tipo estudiado en esta tesis, fue necesario llevar a cabo como actividades previas algunas corridas experimentales para la lechuga y el rábano. Las cuales se describen a continuación.

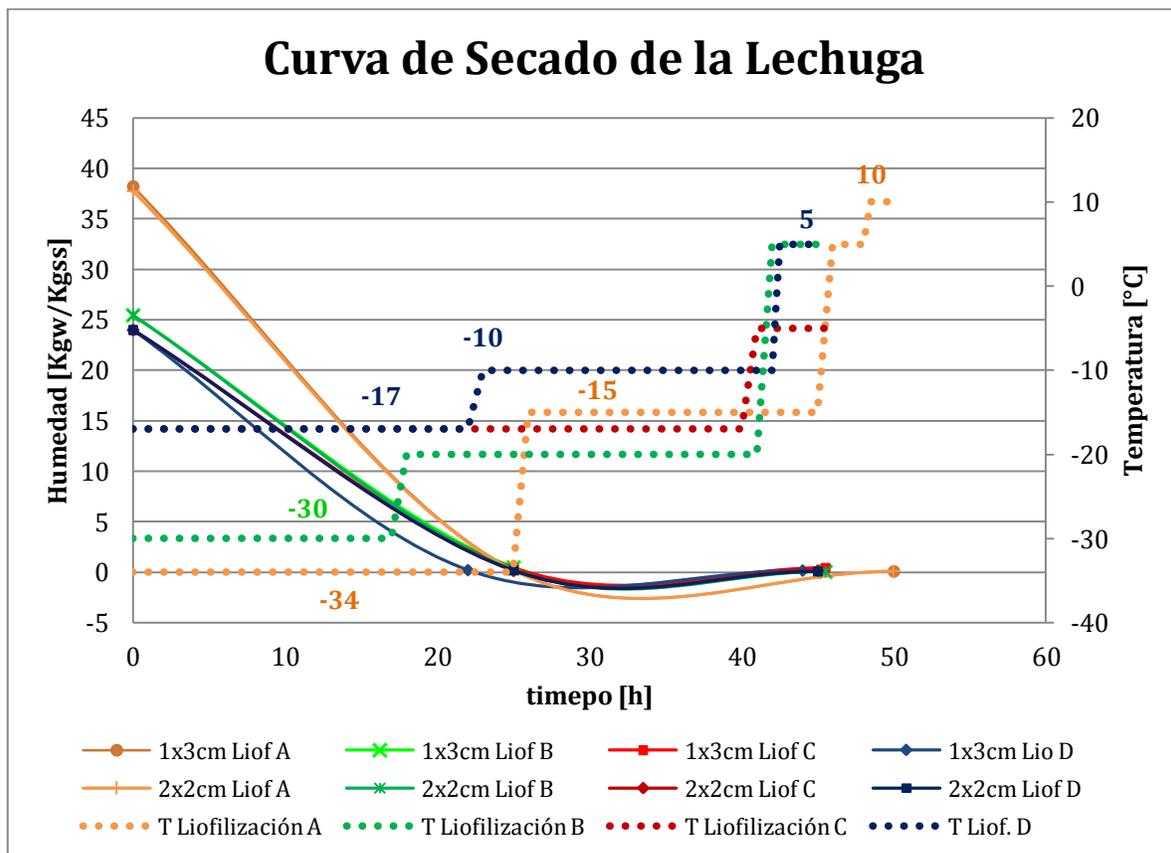


Figura 35. Curvas de secado de lechuga en diferentes condiciones (base seca). Las liofilizaciones B y D fueron las utilizadas como Condiciones A y B respectivamente

Para la lechuga se comenzó con un tratamiento de 46h a una temperatura de secado primario de -30° y -20°C y 4h de secado secundario en 5° y 10°C (Figura 35). Debido a que se produjo daño en la lechuga, reflejado en una pérdida excesiva en el color de la muestra, se prosiguió con una liofilización con menor temperatura (-34°). Al no conseguirse los resultados esperados, finalmente se realizó una corrida elevando la temperatura se a -17°C

para el secado primario durante 24h, con una meseta en -10° durante 22h y después un secado secundario de 3h a 5°C , dando como resultado una curva con menor consumo de energía y una mayor calidad del producto, que conservó sus características físicas (Liof. D). La liofilización de rábano se comenzó con la temperatura de 30°C reportada por López-Malo & Palou, (2008) para liofilización de alimentos, debido a que el producto tuvo un colapso considerable a pesar que las humedades variaron visiblemente en función de los grosores de los grosores, se decidió disminuir la temperatura para evitar un daño mayor, así se obtuvieron curvas para secado primarios con temperaturas de -34° y -40°C , sin embargo la pérdida de humedad fue mínima para las primeras 48h, llevando al proceso a un tiempo de 72h (Figura 36).

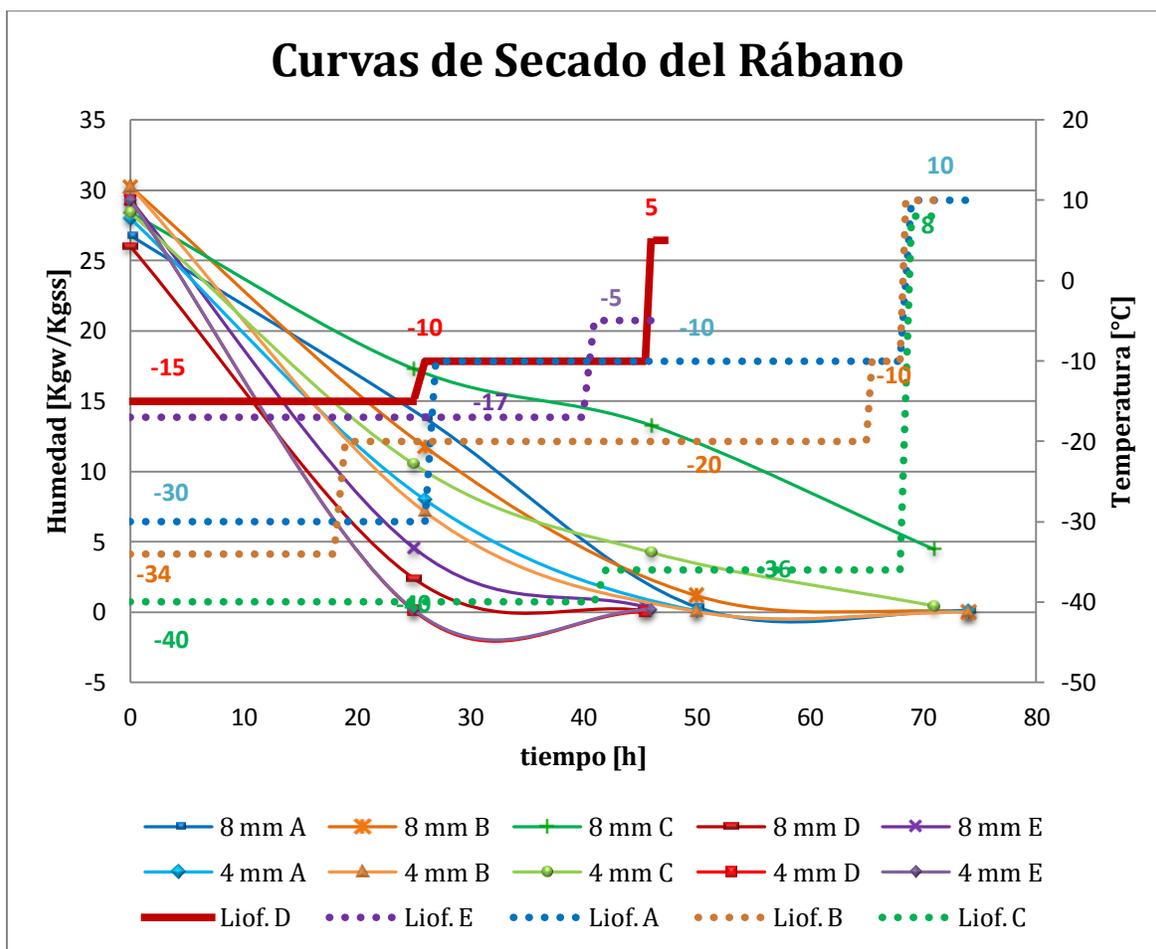


Figura 36. Curvas de secado del rábano (base seca). Las liofilizaciones B y D fueron las utilizadas como Condiciones A y B respectivamente.

Un análisis de las curvas de secado permitió identificar que el paso siguiente era aumentar la temperatura por arriba de -30° . Así se decidió aumentar la temperatura a -17° , esto generó colapso aunque en menor porcentaje de muestras y se presentó después de las primeras 24h. Finalmente se aumentó la temperatura de -15° para el comienzo del primer secado, con un escalón en -10°C y luego el secado secundario en 5°C , con el resultado de conservación de sus estructuras.

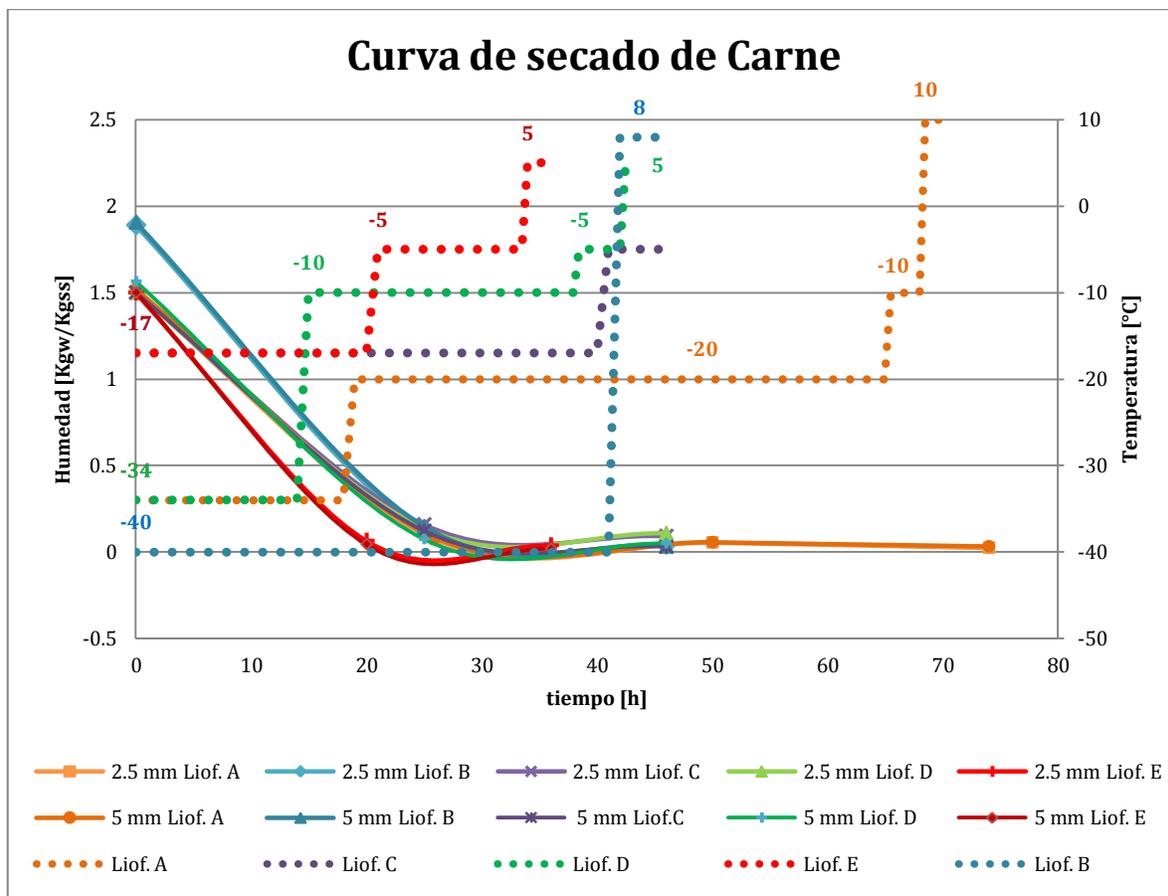


Figura 37. Curva de secado en base seca de carne de cerdo, las condiciones (base seca). La liofilización A y E fueron utilizadas como Condiciones A y B respectivamente.

Las liofilizaciones de carne se hicieron comenzando a temperaturas de -34°C y al igual que en rábano, primero se disminuyó la temperatura a -40°C para después aumentarla a -17°C , la variación en las curvas y en la humedad final encontrada, fue muy similar (Figura 37), la dureza de la superficie de la carne, sin embargo varió muy sutilmente en el daño hecho, en forma de rompimiento de algunas de las fibras de la carne. La curva seleccionada fue la obtenida con menor consumo de energía en menor tiempo, siendo esta la comenzada en -17°C .

ANEXO 2 EQUIPO DE LIOFILIZACIÓN UTILIZADO

La liofilizadora utilizada en la presente tesis fue de cámara, modelo Freeze 6, LABCONCO (Figura 11). La liofilizadora consta de 2 partes independientes, que trabajan unidas en este modelo en especial:

- Cámara de liofilización
- Condensador

A continuación se presentan las características particulares del equipo que compone el sistema de liofilización.

1. CÁMARA DE LIOFILIZACIÓN

GENERALIDADES

La ventaja de la utilización de éste modelo en articular es que brinda la posibilidad de controlar perfectamente las 3 variables más importantes requeridas en la cámara de secado:

- Espacio de la cámara controlado contra contaminación, tanto por partículas como por microbiología
- Temperatura controlada directamente a la muestra debido al contacto con la charola por la que circula en la parte de abajo un refrigerante controlado por un procesador a la temperatura seleccionada.
- Se puede controlar la presión muy precisamente, por medio de la abertura de la válvula balasta.



Figura 38. Cámara de liofilización del equipo utilizado, a la izquierda se observa el panel de control de la temperatura, a la derecha la cámara con sus 3 charolas para colocar la muestra.

La característica del refrigerante que controla la temperatura de la muestra en las charolas, es un derivado del petróleo de muy bajo punto de fusión y que es controlado por un compresor y una bomba de circulación. Esta operación es controlada desde la tarjeta de control del equipo (Figura 38).

Esta tarjeta de control también nos puede llevar el programa que nosotros decimos en los que respecta a las mesetas y las rampas, por lo que una vez programada, puede hacerse de manera automática el cambio de temperatura según se desee.

2. CONDENSADOR

El módulo de condensación, consta de un serpentín (Figura 39) controlado por un compresor de alta presión que maneja un refrigerante denominado R-13. Este producto por sí mismo, y de manera única, tiene la propiedad de poder alcanzar temperaturas del orden de hasta -50°C .



Figura 39. Condensador del equipo de liofilización. A) condensador con panel. B) serpentín del condensador.

La unidad de condensación de la liofilizadora, no varía la temperatura, sino que siempre está en su valor límite. Esto nos asegura siempre que todas las partículas de agua en fase vapor lleguen y toquen el serpentín. Siendo atrapadas automáticamente y transformándola en fase sólida. Esto tiene las siguientes ventajas:

- Disminuye la presión de vapor del medio ambiente en todo el espacio de liofilización.
- Limpia el aire de extracción a la bomba en un 99% de H.R. para evitar daños mayores a la bomba
- Atrapa productos de liofilización, todos los gases condensables, siempre y cuando sus puntos de fusión se encuentren arriba de -50°C

- d) En productos de alto contenido de agua, se debe tener cuidado, de no saturar el condensador con hielo, y por consecuencia disminuir la eficiencia del condensador,
- e) El condensador tiene un área de contacto de aproximadamente 1m².
- f) La superficie de los tubos del condensador debe estar extremadamente limpios, en especial de aceite, ya que puede alcanzar su presión de vapor, generando olores o sabores aceitosos en el alimento y disminuyendo la eficiencia porque hay pérdida de adherencia del agua.

3. BOMBA DE VACÍO

La bomba de vacío utilizada en liofilización es de 2 estaciones o doble etapa. Esto quiere decir que consta de 2 discos excéntricos en donde el primero y más grande hace la primera precompresión de aire y el segundo y más chico, realiza la última compresión (Figura 40).



Figura 40. Bomba de vacío

Este último disco, es el que nos lleva a los niveles de presión negativa entre 80 y 200mb que necesitamos para los procesos de liofilización. Esta bomba nos da un desplazamiento de 8 ft³/min.

LOS ALABES

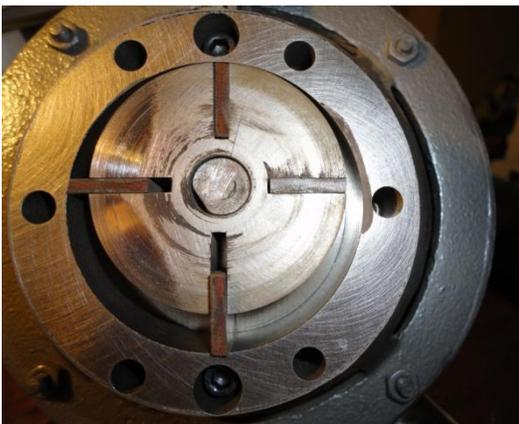


Figura 41. Alabes de la bomba de vacío LABCONCO.

Cada disco centrífugo tiene maquinadas 4 ranuras en donde se colocan unas paletas de pasta, o carbón, llamados álabes, los cuales salen disparados hacia una cavidad excéntrica dando una “paletada” de barrido de aire (Figura 41).

EL ACEITE COMO SELLO MECÁNICO

Los álabes necesitan aceite para generar una película muy tensoactiva que evita que el aire que se está comprimiendo pase a los lados o por debajo de los mismos. Las características del aceite, son las siguientes:

- Alta tensoactividad
- Estable a muy altas temperaturas
- Base de silicón
- Viscosidad 15 S.A.E. (Estandar American Especification)
- Libre de ceras.

Gracias a las características mencionadas, es que podemos lograr las compresiones requeridas para el retiro del aire dentro de la cámara de liofilización.

NOTA.

El mantenimiento de una bomba de vacío para liofilización, debe ser muy frecuente y estricto. Porque una buena liofilización depende de esto.

ANEXO 3 ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

REHIDRATACIÓN

Tabla 15. Resultados del ANOVA para el porcentaje de Rehidratación en lechuga.

Fuente	g.l.	SC	CM	Fc	Significación*
Temperatura	1	2302.217	2302.217	235.877	0
Área	1	1144.849	1144.849	117.297	0
T * A	1	6.04	6.04	0.619	0.441
Error	20	195.205	9.76		
Total	24	8325.269			

*Para una significancia de $P > 0.05$

Tabla 16. Resultados del ANOVA para el porcentaje de Rehidratación en rábano.

Fuente	g.l.	SC	CM	Fc	Significación*
Temperatura	1	15549.441	15549.441	1574.994	0
Grosor	1	1064.668	1064.668	105.991	0
T * G	1	697.574	697.574	69.446	0
Error	20	200.898	10.045		
Total	24	116731.339			

*Para una significancia de $P > 0.05$

Tabla 17. Resultados del ANOVA para el porcentaje de Rehidratación en carne

Fuente	g.l.	SC	CM	Fc	Significación*
Temperatura	1	579.086	579.086	97.083	0
Grosor	1	22.215	22.215	3.724	0.068
T * G	1	7.161	7.161	1.201	0.286
Error	20	119.298	5.965		
Total	24	206916.664			

*Para una significancia de $P > 0.05$

COLOR

Tabla 18. Resultados del ANOVA del cambio de total de color (ΔE) en lechuga.

Fuente	g.l.	SC	CM	Fc	Significación*
Temperatura	1	1855.75	1855.75	111.502	0
Área	1	49.997	49.997	3.004	0.098
T * A	1	.36	0.3602	0.0216	0.884
Error	20	332.862	16.643		
Total	24	14695.0371			

*Para una significancia de $P > 0.05$

Tabla 19. Resultados del ANOVA del cambio de total de color (ΔE) en rábano.

Fuente	g.l.	SC	CM	Fc	Significación*
Temperatura	1	373.039	373.039	294.778	0
Grosor	1	0.647	0.647	0.511	0.483
T * G	1	29.172	29.172	23.052	0
Error	20	25.31	1.265		
Total	24	8659.197			

*Para una significancia de $P > 0.05$ Tabla 20. Resultados del ANOVA del cambio de total de color (ΔE) en carne.

Fuente	g.l.	SC	CM	Fc	Significación*
Temperatura	1	70.589	70.589	33.111	0
Grosor	1	39.424	39.424	187.717	0
T * G	1	12.127	12.127	57.742	0
Error	20	4.2	0.21		
Total	24	582.048			

*Para una significancia de $P > 0.05$

DUREZA

Tabla 21. Resultados del ANOVA del cambio en la dureza de la lechuga

Fuente	g.l.	SC	CM	Fc	Significación*
Temperatura	1	0.005	0.005	49.815	0
Área	1	0	0	48.072	0
T * A	1	3.22E-06	3.22E-06	0.834	0.372
Error	20	7.74E-05	3.8675E-06		
Total	24	13835.779			

*Para una significancia de $P > 0.05$

Tabla 22. Resultados del ANOVA del cambio en la dureza del rábano

Fuente	g.l.	SC	CM	Fc	Significación*
Temperatura	1	0.001	0.001	1.292	0.269
Grosor	1	0.093	0.093	209.832	0
T * G	1	0	0	0.503	0.486
Error	20	0.009	0		
Total	24	13835.779			

*Para una significancia de $P > 0.05$

Tabla 23. Resultados del ANOVA del cambio en la dureza de la carne

Fuente	g.l.	SC	CM	Fc	Significación*
Temperatura	1	0.007	0.007	114.223	0
Grosor	1	0.001	0.001	13.093	0.001
T * G	1	0.001	0.001	15.457	0.001
Error	20	0.001	6.23E-05		
Total	24	0.025			

*Para una significancia de $P > 0.05$

ANEXO 4 ALGUNOS DEFECTOS EN LOS RÁBANOS LIOFILIZADOS

Durante las actividades previas se produjeron algunos defectos como la ruptura del material en zonas que tenían alguna pequeña cavidad natural, esta se fracturaba debido al encogimiento producido por la deshidratación (Figura 42a). También se presentó el colapso del rábano, durante el cambio de temperatura en el segundo escalón del secado primario, se observa que el colapso fue en el centro de la muestra mientras que las orillas que sufrieron una mayor deshidratación se mantuvieron estables. Debido al colapso se produjo una capa que impidió el paso de la humedad (Figura 42b).

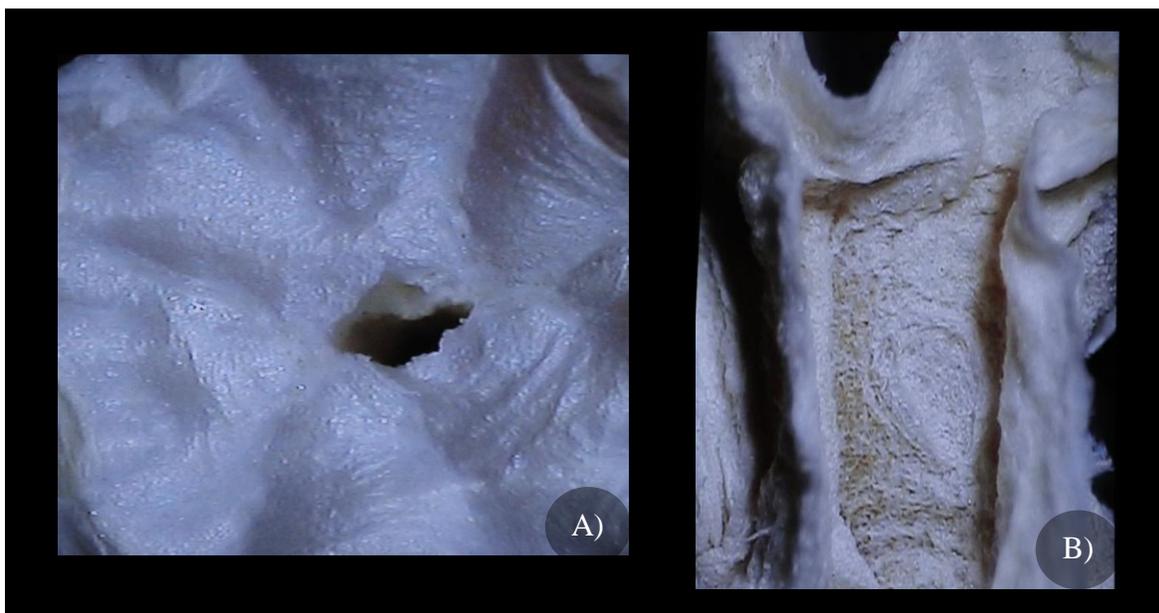


Figura 42. Defecto en algunos rábanos. A) Contracción en corazón de rábano liofilizado. B) Colapso en el centro de la muestra de rábano durante la liofilización.

REFERENCIAS

- Alzamora, S. M. (2008) Freeze-drying. En C. Hui, Food drying science & technology. Pennsylvania, USA: Destech Publications Inc. pp.403-405
- Arroyo, L. E., Echeverría, M. E. (1983) *Recetario mexicano del maíz*. Museo Nacional de Culturas Populares/ cultura SEP. D.F., México.
- Babic, J., Cantalejo, M. J., Arroqui, C. (2009) The effects of freeze- drying process parameters on broiler chicken breast meat. *Food Science and Technology*. 42:1325-1334.
- Badui, S. (2006). *Química de los alimentos*. Cuarta edición, Pearson Educación. México.
- Baker, C., & Baker, G. J. (1997). *Industrial drying of foods*. Blacie Academic & Professional. Gran Bretaña.
- Barreiro, J. A., & Sandoval, A. J. (2006). *Operaciones de conservación de alimentos por bajas temperaturas*. Ed. Equinoccio, Venezuela.
- Barreto, H. F. (1966). *Liofilización un método de secado para alimentos*. Lima, Peru: Instituto interamericano de ciencias agrícolas.
- Boles, J., & Pegg, R. (2011). *Meat Color*. Montana State University and University of Saskatchewan. Montana, USA.
- Bonifacio, E. I. (2005). Calidad pozolera en colectas de maíz Cacahuacintle. *Revista Fitotecnica Mexicana*. 28(003): 253- 260.
- Brennan, J. 1998. *Las Operaciones Unitarias en la Industria en Alimentos*. Tercera edición, Acribia. Zaragoza, España.
- Calva J. L. (2007). *Desarrollo Agropecuario, forestal y pesquero*. Vol. 9, UNAM. México.
- Castro E. N. (2006). *Sabor que somos*. Ágata. Guadalajara, México.
- Cerdas M. D., & Montero, M. E. (2004). *Guía técnica del manejo poscosecha de apio y lechuga para el mercado fresco*. Ministerio de Agricultura y Ganadería. San José, Costa Rica.
- Cheffel J. C., Cheffel H., Besançon (1977). *Introducción a la bioquímica y tecnología de los alimentos*. Acribia. Zaragoza, España.
- Christensen, C. M. (1984). Food Texture Perception. *Advances in Food Research*, 29:159-199.

- Dransfield, E. (1984). Beef quality of assessed at European Research Center. *Meat Science*, 10: 1-20.
- Edicosma 2012 Obtenido de:
http://www.revistadealimentacion.com/_n1170417__La_Liofilizacion_una_buena_alternativa_de_negocio_en_America_Latina.html
- Edwards, M. (2001). *Hortalizas y frutas*. En Rosenthal A., Textura de los alimentos. Acribia. Zaragoza, España pp. 251-264.
- Farkas, B. E. & Singh (1991). Physical properties of air-dried and freeze-dried chicken white meat. *Journal of Food Science* 56 (3):611-615
- FAO. (1993). *El maíz en la nutrición humana*. FAO. Roma.
- FAO. (2011, Enero). Obtenido de: http://www.fao.org/inpho_archive/content/documents/vlibrary/AE620s/Pfrescos/LECHUGA.HTM.
- FAO. (2011). Obtenido de: http://www.fao.org/inpho_archive/content/documents/vlibrary/AE620s/Pfrescos/RABANO.HTM
- Fellows, P. (2007). *Tecnología del procesado de los alimentos*. Acribia. Zaragoza, España.
- Fennema, O. R. (2010). *Química de los alimentos*. Tercera edición, Acribia. España.
- Franks, F. (1998). Freeze-drying of bioproducts: putting principles into practice. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 45: 221-229.
- Geankoplis, C. (2006). *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*. México: Continental.
- Gil-Hernández, A. (2010). *Tratado de Nutrición Vol. II*, Editorial Médica Panamericana Madrid, España.
- Gowen, A. A., Abu-Ghannam, N., Frias, J., Olivera, J. (2008). Modeling Dehydration and rehydration of cooked soybeans subjected to combined microwave-hot air drying. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 9:129-137.
- González, A. (2008). *El Maíz: Planta portentosa*. Revista de Ciencias Sociales de la Universidad Iberoamericana. Año III, No 5. pp. 1-18.
- Haard, N., & Chrism, G. (1995). *Características de los tejidos vegetales comestibles*. En Fennema, O. Química de los alimentos Acribia Zaragoza. pp. 1182- 1183.
- Heldman, D. R., & Singh, R. (1981). *Food process engineering*. AVI. Michigan, USA

- Heldman, D., & Hartel, R. W. (1997). *Principles of food processing*. Hall Book. New York, E.U.A.
- Hernández, S. (2007). *Modelación del deterioro de productos vegetales frescos cortados*. Revista Universidad y Ciencia. 2: 183-196.
- Hogekamp, H., & Schubert, S. (2003). Rehydration of food powder. *Journal of Food Science and Technol Internat*. 3(9): 223-235.
- Hoseney, R. (1991). *Principios de ciencia y tecnología de los cereales*. Acribia. Zaragoza.
- Hua, T.-C. (2010). *Freeze-drying of pharmaceutical & food products*. CRC Press: NY, USA.
- INFOAGRO. (2010). Infoagro.com. Obtenido de: <http://www.infoagro.com/galeria/foto.asp?id=238>
- Intersemillas. (2012). Intersemillas.es. Obtenido de: <http://www.intersemillas.es/uploads/hortocolas/redondo%20rojo%20saxa%20sara.jpg>
- King, C. J., Lam, W. K. & Sandall, O. C. (1968) Physical Properties important for freeze-drying poultry meat. *Food Technology* 22:1302
- Kader, A. A. (2007). *Tecnología postcosecha de cultivos Hortofrutícolas* Tercera edición, ARN Publications. California, USA.
- Kapsalis, J. G. (1967). Hygroscopic Equilibrium and Texture of Freeze-dried Foods. Clearinghouse for Federal Scientific and Technical Information. Massachusetts.
- Kramer, A. (1973). *Food texture - definition, measurement and relation to other food quality attributes*. En Kramer, A. & Szczesniak, A. S. *Texture Measurements of food*. Reidel Publ. Dordrecht, Paises Bajos. pp. 1-9.
- Krokida, M. & Marinos, D. (2003). Rehydration kinetics of dehydrated products. *Journal of Food Engineering*. 57: 1-7.
- Lawrie, R. (1998). *Ciencia de la Carne*. Tercera edición, Acribia. Zaragoza, España
- López-Aguilar, E. (2008). *Producción de bebida alcohólica de alta calidad*. Puebla: Universidad de las Américas.
- López-Malo, A., & Palou, E. (2008). *Freeze-Drying of fruits and vegetables: process variables, quality and stability*. En C. Hui, *Food Drying Science & Technology*. Destech Publications. Inc. Pennsylvania, USA. pp. 421-423.

- Luna, J., Daga, J., & Martínez, P. (2008). Determinación microbiológica de *Listeria sp.* en lechuga y espinaca. *Red-alfa lagrotech*. Cartagena.
- Maiocchi, M. G., & Avanza, J. R. (2004). Degradación de clorofilas y feofitinas a diferentes temperaturas en *Ilex dumosa* e *Ilex paraguariensis*. *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas*, E-085.
- Marín, E., Lemus, R., Flores, V., & Vega, A. (2006). La rehidratación de alimentos deshidratados. *Revista Chilena de Nutrición*. 33(3):1-19.
- Maroto, J. (1992). *Horticultura Herbácea Especial*. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Marques, L., Prado, M., & Freire, J. (2009). Rehydration characteristics of freeze-dried tropical fruits. *Food Science and Technology*. (42): 1232-1237.
- Márquez de la R., I., & Arroyo, P. (2006). *Estudio técnico y másico en la Ira etapa de secado por congelación a vacío de papa y zanahoria*. Tesis de Licenciatura, UNAM. México.
- Meda, L., & Ratti, C. (2005). Rehydration of freeze-dried strawberries at varying temperatures. *Journal of Food Process and Engineering*. 28(3): 233-246.
- Mitofsvky (2010) *Cocina Tradicional Mexicana: Patrimonio Inmaterial de la Unesco*. <http://consulta.mx/web/> Obtenido de: <http://consulta.mx/web/index.php/estudios/mexico-opina/364-cocina-tradicional-mexicana-patrimonio-inmaterial-de-la-unesco>
- Monge-Calvo, J. M. (2005). *Producción Porcina*. EUNED San José, Costa Rica.
- Murray, P. (2009). *Microbiología Médica*. Sexta edición, Elsevier. España.
- Narváez, E. D. (2007). Aspectos microestructurales y posibles usos del maíz de acuerdo con su origen geográfico. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 30(003): 321- 325.
- Oetjen, G.-W. (1999). *Freeze-Drying*. Wiley-VCH. Weinheim, Alemania.
- Ortiz, M. L. (2009). Aproximaciones a la comprensión de la degradación de la lignina. *Orinoquia*. 13(2): 137-144.
- Pascual, M. d., & Calderón, P. (2000). *Microbiología Alimentaria: Metodología Analítica para Alimentos y Bebidas*. Díaz de Santos. Madrid, España.
- Potter, N. (1970). *La ciencia de los alimentos*. Segunda edición, Edutex S.A. Mexico D. F.
- Ramírez - Nava, J. S. (2006). *Liofilización de alimentos*. Universidad del Valle. Cali, Colombia.

- Rangel, M. (2004). *Liofilización de guacamole*. Tesis de Maestría en Ciencia de Alimentos. Universidad de las Américas. Cholula, Puebla, México.
- Ratti. (2001). Hot air and freeze-drying of high value food: a review. *Journal of Food Engineering*. 49: 311-319.
- Ratti. (2007). *Advances in food dehydration*. CRC Press. Dublin.
- Rhin, J.-W., & Koh, S. (2011). Effect of freezing temperature on rehydration and water vapor adsorption characteristics of freeze-dried rice porridge. *Journal of Food Engineering*. 104: 484-491.
- Ripusudan, P. (2001). *El maíz en los trópicos*. FAO. Roma.
- Rosete, A. (2010). *Pozole estilo Jalisco*. Universidad del Claustro de Sor Juana. México.
- Salunkhe, D., & Kadam, S. (2004). *Tratado de Ciencia y Tecnología de las Hortalizas*. Zaragoza, España: Acribia.
- Sharma, S. K., Mulvaney, S. J., & Rizvi, S. H. (2003). *Ingeniería de alimentos Operaciones unitarias y prácticas de laboratorio*. Limusa. Nueva York.
- Snowman, J. W. (1997). *Freeze Dryers*. En Baker C., & Baker G. L., *Industrial Drying of food*. Blakie Academic & Professional. Gran Bretaña. pp. 135.
- Stone, W. E. Jr., & May, K. N. (1969). The effect of time and temperature of cooking on quality of freeze-dehydrated chicken. *Poultry Science*, 48(3), 813–818.
- Szczesniak, A. S. (1970). Effect of mode of rehydration on textural parameters of precooked freeze-dried sliced beef. *Journal of Texture Studies*. 2:18-30.
- Valdez-Fragoso, E. A. (2008). *Freeze-drying of meats and seafood*. En Hui C., *Food Drying Science & Technology*. Destech Publication Inc. Pennsylvania. pp. 436-444.
- Vargas, Á., & Montaña, E. (2010, noviembre 11). *Comida mexicana, patrimonio inmaterial de la humanidad*. La Jornada, p. 2.
- Varnam, A. H., & Sutherland, J. (1998). *Carne y Productos Cárnicos*. Acribia. Zaragoza, España.
- Vega, A. (2003). *Estudio de la deshidratación y rehidratación del pimiento rojo (Capsicum AnnuumL.) var. Lamuyo*. Tesis Doctoral. Departamento de Tecnología de Alimentos, Universidad Politécnica de Valencia, España.
- Weerts, A., Martin, D., & Lian G, M. (2005). Modelling the hydration of foodstuffs. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 13(2): 119-128.

- Will, R., McGlasson, B., Graham, D., & Joyce, D. (1999). *Introducción a la fisiología y manipulación poscosecha de frutas, hortalizas y plantas ornamentales*. Segunda ed., Acribia. Zaragoza, España.
- Witrowa-Rajcharet, D., & Lewincki, P. (2006) Rehydration properties of dried plant tissues. *International Journal of Food Science and Technology*. 41:1040–1046.