



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTILÁN

ESTUDIO DE LOS CAMBIOS DURANTE LA DESHIDRATACIÓN DE
MANZANA *Red Delicious* EN UN SECADOR SOLAR Y UN SECADOR
DE CHAROLAS.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA EN ALIMENTOS

PRESENTAN

KAREN CRUZ GONZÁLEZ
BERENICE JIMÉNEZ PÉREZ

ASESORA: DRA. MARÍA ELENA VARGAS UGALDE



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

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

SUPERIORES CUAUTITLÁN

ASUNTO: VOTO APROBATORIO



DEPARTAMENTO DE

M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE

ATN: M. EN A. ISMAEL HERNÁNDEZ MAURICIO
Jefe del Departamento de Exámenes Profesionales
de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: Trabajo de Tesis

Estudio de los cambios durante la deshidratación de manzana Red Delicious en un secador solar y un secador de charolas.

Que presenta la pasante: **Karen Cruz González**

Con número de cuenta: **308162301** para obtener el Título de la carrera: Ingeniería 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 HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a de de 2015.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Dra. María Elena Vargas Ugalde	
VOCAL	I.Q.I José Oscar Germán Ibarra	
SECRETARIO	I.A. Ana María Soto Bautista	
1er. SUPLENTE	M en C. Julieta González Sánchez	
2do. SUPLENTE	Dra. María Elena Pahua Ramos	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

IHM/cga*



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

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

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

ASUNTO: VOTO AEROBATORIO



DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE

ATN: M. EN A. ISMAEL HERNÁNDEZ MAURICIO
Jefe del Departamento de Exámenes Profesionales
de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: Trabajo de Tesis

Estudio de los cambios durante la deshidratación de manzana Red Delicious en un secador solar y un secador de charolas.

Que presenta la pasante: **Berenice Jiménez Pérez**
Con número de cuenta: **308168286** para obtener el Título de la carrera: Ingeniería 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 HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 08 de Abril de 2016.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Dra. María Elena Vargas Ugalde	
VOCAL	I.Q.I José Oscar Germán Ibarra	
SECRETARIO	I.A. Ana María Soto Bautista	
1er. SUPLENTE	M en C. Julieta González Sánchez	
2do. SUPLENTE	Dra. María Elena Pahua Ramos	12/15/16

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

IHM/cga*

ESTE TRABAJO SE REALIZÓ CON APOYO DEL PROYECTO PAPIME PE204914:

“ANÁLISIS DE IMÁGENES, DESARROLLO DE SOFTWARE Y TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LA COMUNICACIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DE LA ENSEÑANZA CON ENFOQUE EN COMPETENCIAS EN EL LABORATORIO EXPERIMENTAL MULTIDISCIPLINARIO V DE LA CARRERA DE INGENIERÍA EN ALIMENTOS DE LA FES CUAUTITLÁN”.

AGRADECIMIENTOS

“Hacer una tesis significa divertirse y la tesis es como el cerdo, en ella todo tiene provecho”

— Umberto Eco.

A mis padres, por haberme dado los principios y valores que me erigen actualmente, por haberme forjado como la persona que a día de hoy soy; muchos de mis logros se los debo a ustedes, y éste no es la excepción. Gracias por enseñarme que las metas son alcanzables y que una caída no es una derrota, sino el principio de una lucha. Papá, mamá, gracias por orientarme y ayudarme a salir adelante, por siempre estar cuando los necesite, por brindarme sabios consejos, tenerme paciencia y corregir cada uno de mis errores. Este triunfo también es de ustedes, los amo.

A mi hermano, con quien a pesar de tener mis eventuales peleas o desacuerdos siempre se mantuvo a mi lado, apoyándome en los momentos cruciales, divirtiéndonos y riendo más veces de las que pudimos tener incordios. Crecimos juntos, hemos compartido tantos buenos momentos; te quiero mucho.

A mi directora de tesis, Dra. María Elena Vargas, por su esfuerzo y dedicación, agradezco sinceramente todas sus indicaciones y orientaciones, las cuales resultaron indispensables en el desarrollo de este trabajo. También me gustaría agradecer a mis profesores durante toda mi carrera profesional, porque todos han aportado un granito de arena a mi formación.

Deseo reconocer especial cariño y agradecimiento a mi amiga y compañera de estudio durante el desarrollo de esta tesis, Berenice Jiménez. Fue un camino largo y exigente el que tuvimos que recorrer para concluir este proyecto, no hubiera sido tan divertido sin todas esas risas, bromas y buenos ratos que pasamos juntas.

Y por último, pero no menos importante, quiero agradecer el cariño y la amistad de aquellos con los que viví mi ciclo en la universidad. A mis queridos amigos, con quienes compartí esfuerzo y alegrías; algunos con los que llevo manteniendo una invaluable y valiosa amistad desde antes de siquiera iniciar mi formación universitaria. En especial un cariñoso reconocimiento a los que me demostraron su apoyo y me brindaron ánimos durante estos últimos meses: Yatziri y Karen. Gracias por su cariño, a todos les deseo lo mejor.

Karen Cruz González.

AGRADECIMIENTOS

Antes que a cualquier persona que ha sido de gran bendición y apoyo en mi vida, quiero agradecer a Dios que ha sido mi mayor inspiración, motivación y fuerza para este largo camino, es a ti quien le debo todo y por quien hare lo que sea, me dijiste “No temas, porque yo estoy contigo; no desmayes, porque yo soy tu Dios que te esfuerzo; siempre te ayudaré, siempre te sustentare con la diestra de mi justicia”. Y lo has hecho, porque cada paso que daba estuviste a mi lado, cuidando de mí, poniéndome siempre en el lugar y personas indicadas, hubo tiempos con dificultades, pruebas muy grandes, llantos, desvelos y también alegrías, pero siempre estuviste aquí, has puesto en mi sueños y eh visto cómo se van cumpliendo, este es uno de ellos, mi Dios gracias no tengo palabras para agradecerte hasta donde he llegado y lo que aún nos falta por recorrer.

A mis padres. Mamá, papá lo logramos, gracias por el apoyo que siempre me brindaron, por los valores que me inculcaron y han hecho de mí una mejor persona, porque sus esfuerzos han valido la pena. Gracias por su apoyo incondicional y por hacerme ver que no hay mejor lugar que la familia, y que siempre estarán en las buenas y en las malas, esto también es un logro para ustedes y merecen su reconocimiento, los amo y le pido a Dios que permita que puedan ver el fruto de todo esto.

A mi hermana Gabyta, preciosa hermana no tengo como agradecerte tanto apoyo de tu parte, porque siempre me has hecho sentir que soy un gigante y que todo puedo lograr, por secar mis lágrimas y hacerme reír cuando necesitaba sacar toda esa tensión. Nunca me negaste tus brazos, ni tus palabras de apoyo. Tendría que hacer un libro para nombrar cada una de las experiencias que pase a tu lado en este largo camino, pero en cada una de ellas estuviste tú. Estoy infinitamente agradecida con Dios por poner a mi mejor amiga tan cerca, tomando el papel de hermana, para que no me faltara en ningún momento.

A mi hermano Daniel, a mi sobrina Paola que sin sus ocurrencias y su amor, seria todo aburrido, por sus sabios consejos a pesar de sus respectivas edades y ejemplos de cómo siendo únicos, puedes brillar. Pao me has puesto como ejemplo en tu vida y eso me ha dado fuerza y motivación para terminar con esto y seguir siendo ejemplo para ti, que podemos lograr todo con esfuerzo y dedicación.

A mi compañera de tesis Karen Cruz, que gracias a este proyecto me atrevo a decir que se ha convertido en una persona muy especial en mi vida y una gran amiga, porque eres única y este tiempo he podido valorar todo lo que eres tú, apreciar tu sencillez y madurez, una hermosa mujer, llegar hasta aquí no ha sido fácil y nos ha costado muchas cosas, pero fue muy divertido el viaje a tu lado, gracias por tantas ocurrencias, por tantos buenos momentos y tus muy sabios consejos, eres una gran amiga y es un honor ser parte de tu historia, ya te quedaste en mi corazón y espero que esto sea uno de tantas vivencias que podamos contar en el futuro, te quiero mucho amiga.

A mi chinita Brenda, gracias morita por ser una gran amiga en esta etapa, me hubiera encantado haberte conocido desde que empecé este ciclo pero llegaste en el mejor momento, tu sonrisota y tu amistad tan pura me hicieron terminar con la mejor experiencia y saber que si podía encontrar a

amigas para toda la vida en la universidad, gracias por tu apoyo en cada momento, te quiero mi macha con corazón de pollo.

A mis profesores durante toda la carrera que en cada uno de ellos, pude absorber conocimientos y un especial reconocimiento a la Dra. María Elena Vargas por su dedicación y apoyo en el trabajo, por poner en nosotras este proyecto y darnos su respaldo, su comprensión y hacernos sentir que realmente podíamos concluir.

Adriana Roldan y José Luis Camacho que jamás voy a dejar de agradecer a Dios por ponerlos en el momento indicado en mi vida, porque son de gran bendición. Su apoyo, consejos, sus oraciones me han llenado de energía para continuar, a pesar de todo lo que pude pasar, no me dejaron caer y Dios los ha puesto como ángeles en mi vida, no les ha importado la hora, ni el lugar para hablar conmigo y sentir su apoyo, los amo mucho.

Este logro tiene un cacho de cada uno de ustedes que han sido nombrados, no hubiera sido lo mismo, no podría contar esta historia sin mencionarlos a uno por uno y es por ello que les doy el reconocimiento que se merecen, son parte de esta historia y la persona que soy ahora tiene un poco de cada lección que aprendí por cada uno, me llena de orgullo poder saber que cuento con personas muy especiales y cada paso que di y que daré, jamás fui y ni iré sola, con el corazón en la mano, GRACIAS.

Berenice Jiménez Pérez.

ÍNDICE

	Página
Índice de cuadros	10
Índice de figuras	10
Resumen	12
I. Marco Teórico	13
1.1 Propiedades de la manzana Red Delicious	13
1.2 El proceso de secado en los alimentos	14
1.2.1 Deshidratación de la fruta	14
1.2.2 Conceptos fundamentales	15
1.2.3 Transferencia de calor en el proceso de secado	16
1.2.4 Transferencia de masa en el proceso de secado	17
1.2.5 Curvas de secado	17
1.2.6 Factores que afectan el proceso de secado	20
1.2.7 Clasificación de secadores	22
1.2.8 Factores importantes respecto al funcionamiento del secador	25
1.2.9 Diseño de un secador	26
1.3 La calidad en los alimentos deshidratados	29
1.3.1 Reducción del contenido de agua	29
1.3.2 Importancia del color en los alimentos	29
1.3.3 Cambios de la microestructura de alimentos durante la deshidratación	31
1.4 Aplicación de tratamientos previos al secado	31
1.5 Producción y consumo nacional de energía	32
II. Metodología	33
2.1 Objetivos	33
2.2. Materiales y Métodos	33
2.2.1. Objetivo particular 1	33
2.2.1.1 Construcción del secador.....	34
2.2.2. Objetivo particular 2	35
2.2.2.1. Proceso de deshidratación en secador de charolas	36
2.2.3. Objetivo particular 3	40
2.2.4. Objetivo particular 4	40
2.2.4.1. Cambios en la estructura ocasionados por el proceso de deshidratación	40
2.2.5. Objetivo particular 5	41
2.2.5.1. Colorimetría	41
III. Resultados y discusiones	43
3.1. Objetivo particular 1	43

3.1.1.1 Construcción del secador	43
3.1.1.2 Parábola	43
3.1.1.3 Cámara de secado	46
3.1.1.4 Tubo colector	49
3.1.1.5 Color de la tubería	49
3.2. Objetivo particular 2	51
3.2.1 Curvas de secado en secador de charolas y secador solar parabólico	51
3.2.2 Curvas de velocidad de secado en secador de charolas y secador solar parabólico	52
3.2.3 Difusividad en secador de charolas y secador solar parabólico	53
3.2.4. Flujo de calor en secador de charolas y secador solar parabólico	54
3.2.5 Eficiencia térmica en secador de charolas y secador solar parabólico	55
3.2.5. Consumo de energía de operación	56
3.3. Objetivo particular 3	56
3.3.1. Balances de materia y energía	56
3.4. Objetivo particular 4	60
3.4.1. Microscopia y cambios estructurales	60
3.4.2. Actividad de agua	62
3.5. Objetivo particular 5	63
3.5.1. Colorimetría	63
Conclusiones	67
Referencias	69

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Composición química de la manzana por 100g	13
Cuadro 2. Interpretación y escalas de luz en el Sistema Hunter	30
Cuadro 3. Ejemplo del registro de datos, objetivo particular 2	36
Cuadro 4. Interpretación y escalas de luz	42
Cuadro 5. Resultados de difusividad efectiva	54
Cuadro 6. Resultados de consumo de energía de operación	56
Cuadro 7. Resultados de tamaño y circularidad de poro en secador de charolas	61
Cuadro 8. Resultados de tamaño y circularidad de poro en secador solar parabólico	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Contenido de humedad en función del tiempo	18
Figura 2. Velocidad de secado en función del contenido de humedad	18
Figura 3. Velocidad de secado en función del tiempo	19
Figura 4. Secador de charolas o bandejas	23
Figura 5. Secador solar indirecto	23
Figura 6. Secador solar directo	24
Figura 7. Secador solar mixto	24
Figura 8. Representación de los rayos del sol hacia los focos de la parábola	28
Figura 9. Diseño del secador solar parabólico	35
Figura 10. Diagrama de bloques del proceso de secado de manzana	36
Figura 11. Isotermas de sorción para rodajas de manzana a diferentes temperaturas	38
Figura 12. Curva de secado representativa.	39
Figura 13. Balance de materia y energía	40
Figura 14. Escala conversión de pixeles	41
Figura 15. Representación de los rayos del sol hacia los focos de la parábola	43
Figura 16. Tubo de cobre color negro, colocado sobre el foco de la parábola	44
Figura 17. Corte de la lámina empleada para la realización de parábola	44
Figura 18. Parábola con profundidad de 15cm	45
Figura 19. Base de la parábola y parábola con la base armada	45
Figura 20. Comparación de temperaturas para construcción de cámara de secado	46
Figura 21. Dimensiones de la cámara de secado	46
Figura 22. Cámara de secado. Parte trasera de 40cm x 35cm	47
Figura 23. Fabricación de los rieles para la colocación de rejillas	47
Figura 24. Conexión de cámara de secado con tubo colector	47
Figura 25. Vista delantera de puerta y rejillas para la entrada de producto	48
Figura 26. Base para la cámara de secado	48
Figura 27. Secador solar parabólico.	49
Figura 28. Comparación de temperaturas para construcción de tubo colector	49

Figura 29. Comparación de temperaturas alcanzadas con diferente color en la tubería	50
Figura 30. Secador solar parabólico puesto en marcha	50
Figura 31. Curvas de secado del secador de charolas y el secador solar parabólico	51
Figura 32. Curvas de velocidad de secado del secador de charolas y el secador solar	52
Figuras 33 y 34. Logaritmo natural en relación de humedad con respecto al tiempo	53
Figura 35. Análisis de ANOVA de valores individuales de $Deff$ (m^2/s) vs. Tipo de secador	53
Figura 36. Análisis de ANOVA de valores individuales de G (kg) vs. Tipo de secador	54
Figura 37. Análisis de ANOVA de valores individuales de $Q \times m^2$ (kJ) vs. Tipo de secador	55
Figuras 38. Microscopia en secador de charolas al inicio del proceso de secado	61
Figura 39. Microscopia en secador de charolas al final del proceso de secado	61
Figuras 40. Microscopia en secador solar parabólico al inicio del proceso de secado	61
Figura 41. Microscopia en secador solar parabólico al final del proceso de secado	61
Figura 42. a_w vs tiempo (Secador de charolas y secador solar parabólico	63
Figura 43. Gráfica comparativa de valores de L	64
Figura 44. Gráfica comparativa de valores de a	64
Figura 45. Gráfica comparativa de valores de b	65
Figura 46. Gráfica comparativa de valores de DE	65

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar las diferentes condiciones de secado de manzana Red Delicious en un secador de charolas y un secador solar de tipo cilíndrico parabólico. La muestra se cortó en rodajas de 5mm de espesor tratadas previamente con antioxidante (1.5%, de ácido cítrico y ácido ascórbico), deshidratándolas hasta una humedad final de 11% para comparar los resultados obtenidos respecto al tiempo de secado, coeficiente de difusión, flujo de aire requerido, humedad, color y tamaño del producto final obtenido en cada secador, para así determinar si es rentable el uso de la energía solar en el proceso de deshidratación de alimentos.

Respecto al tiempo de secado, la permanencia del producto para alcanzar las condiciones deseadas en el secador solar es mayor comparándolo con el secador de charolas, sin embargo la cantidad de energía que se requiere para la operación en el secador solar es menor. En cuanto a propiedades físicas de la manzana deshidratada, los resultados en el secador solar son muy similares a los del secador de charolas, siendo éste último el que obtuvo mayor luminosidad en las rodajas así como un menor pardeamiento. Devahastin et al. (1989) propusieron mediante simulación numérica un secador híbrido, el uso de almacenamiento de calor latente combinado con energía solar y concluyeron que se podía ahorrar hasta un 15% de energía convencional con esta combinación; lo que corrobora la idea inicial de que el secado solar resulta más rentable que otros métodos usados convencionalmente. Montero (2005) realizó experimentación con un secador solar, donde los productos con los que trabajó contenían 55%, 70%, y 90% de humedad inicialmente, rango en el cual se encuentra la humedad de la manzana, y mediante el uso del secador solar estos valores se redujeron al 20%, encontrando datos positivos de secado.

Los resultados indican que el secador solar puede servir como una operación previa al secador de charolas para disminuir costos de operación. Además presenta una vía rentable para pequeños agricultores de las zonas cálidas del país para aprovechar mejor las condiciones climatológicas y aprovechar mejor el producto comestible.

El desarrollo del proyecto pretende impulsar el uso de energías naturales como alternativas para el procesamiento de alimentos, enfocándose en este caso a la deshidratación.

I. MARCO TEÓRICO

1.1 PROPIEDADES DE LA MANZANA RED DELICIOUS

La manzana es una fruta pomácea comestible que proviene del fruto del manzano (*Pyrus Malus*), árbol de la familia de las rosáceas. Como características salientes de la manzana debemos destacar su forma, ya que son pomos de forma ovoide, a veces alargados o redondos, que esconden numerosas semillas de color pardo en su interior. Su piel es casi siempre brillante y lisa. Las manzanas más comercializadas son aquellas cuyo calibre va desde los 75 milímetros hasta los 85 o más; y su peso oscila desde los 170 gramos hasta los 250 gramos. Los diferentes colores de la piel hacen que las manzanas se diferencien en cuatro grupos: verdes, rojas, amarillas y bicolors, todas ellas con sabores, aromas y calidad de su carne diferente. Además, poseen una pulpa blanda o dura, según la variedad, pero siempre refrescante y jugosa, y su sabor va desde el muy dulce al muy ácido pasando por toda una mezcla de gustos acidulados y azucarados (InfoAgro; El cultivo de la Manzana: Agosto 2010).

La manzana Red Delicious es una variedad estadounidense que proporciona frutos grandes y alargados, de piel color rojo brillante. La epidermis es consistente con estrías rojo brillante en gran parte de su superficie, con una coloración heterogénea. La pulpa es blanco-amarillenta, de textura finamente granulada, jugosa, algo perfumada, dulce y de buen sabor con tendencia a la pérdida de firmeza.

Las cualidades de ésta variedad de manzana están ampliamente reconocidas, ya que presenta un elevado contenido en potasio y un bajo contenido en sodio. Además de su bajo contenido calórico es rica en carotenos y vitamina A, protege el sistema cardiovascular. Es ideal para la elaboración de carnes y pasteles. Es importante destacar el alto contenido de ácido málico, aunque este depende de la variedad y del tiempo de almacenamiento (Benítez, 2011). La composición química de la manzana puede apreciarse con mayor precisión en el cuadro 1.

Cuadro 1. <i>Composición química de la manzana por 100 g</i>	
Nutriente	Por cada 100 g
Agua	86.67 g
Proteína	0.27 g
Lípidos	0.13 g
Ceniza	0.17 g
Hidratos de carbono	12.76 g

Elaborada con base en Benítez (2011).

La manzana, como cualquier fruto o semilla, es un organismo vivo y por lo tanto, está expuesto a la influencia de varios factores que provocar múltiples cambios, tanto en su aspecto externo, como en su composición interna. Dichos factores pueden estar en función de la variedad genética, la temperatura y la humedad relativa ambiental, grado de salud y madurez del fruto, ambiente, aireación y ventilación de las bodegas, higiene de los frutos almacenados, calidad del aire del ambiente dentro de la bodega y la buena administración para operar cada actividad dentro de la bodega en el momento más indicado.

A fin de disminuir o minimizar esas pérdidas, el almacenamiento, el procesamiento o la deshidratación de las frutas es una alternativa factible para que ellos puedan salir al mercado en momentos más oportunos y cuando los precios sean más favorables para los agricultores.

1.2. EL PROCESO DE SECADO EN LOS ALIMENTOS

El secado es una operación unitaria mediante la cual se elimina la mayor parte del agua de los alimentos, por evaporación, aplicando calor. El propósito del secado no es simplemente reducir la humedad, sino crear un producto deseado, confiable y que cumpla con la calidad que se busca. La operación de deshidratación permite además reducir el coste de transporte y almacenamiento por la disminución del peso y volumen de los productos. Y en último término, puede ser una herramienta para el desarrollo de nuevos productos.

Los métodos y procesos de secado pueden clasificarse de diferentes maneras: por lotes cuando el material se introduce en el equipo de secado y el proceso se verifica por un periodo de tiempo dado; o continuos, donde el material se añade sin interrupción al equipo de secado y se obtiene material seco con régimen continuo. También se clasifican de acuerdo con las condiciones físicas usadas para adicionar calor y extraer el vapor de agua:

1º Secadores directos, donde el calor se añade por contacto directo con aire caliente a presión atmosférica y el vapor de agua formado se elimina por medio del mismo aire.

2º En el secado al vacío, la evaporación del agua se verifica con más rapidez a presiones bajas, y el calor se añade indirectamente por contacto con una pared metálica o por radiación.

3º En el secado por congelación, el agua se sublima directamente del material congelado.

Independientemente del mecanismo de transmisión de calor (que puede ser por conducción, convección, radiación o una combinación de cualquiera de estos), el flujo de calor tiene que pasar primero a la superficie exterior y desde esta al interior del sólido (Strumillo, 1986).

1.2.1 Deshidratación de la fruta

La deshidratación de la fruta puede hacerse utilizando diversos procedimientos, cada uno tiene sus ventajas y desventajas y con resultados diferentes especialmente en el tiempo. El método que se utilice depende en gran medida de la calidad del producto que se desee obtener, el tiempo, esfuerzo y capital que se quiera invertir. Los métodos varían desde la deshidratación directa al sol, deshidratación al ambiente, hasta métodos de secado utilizando diferentes equipos: hornos caseros, secadoras eléctricas, de gas, etc., especialmente diseñados para ese fin.

El secamiento directo al sol tiene varias ventajas: el costo es bajo, y por otra parte los rayos ultravioleta del sol destruyen o retardan el crecimiento de algunos microorganismos como hongos, bacterias, levaduras y virus.

1.2.2 Conceptos fundamentales

a) *Aire atmosférico*: El aire atmosférico es una mezcla de aire seco y vapor de agua, es necesario estudiar las relaciones que guardan estos dos componentes.

b) *Humedad absoluta y humedad relativa*. El cociente entre la masa del vapor de agua contenido en el aire entre la masa de aire seco se conoce como humedad absoluta; el aire atmosférico puede contener solo una máxima cantidad de vapor de agua, la humedad relativa es el cociente entre la masa de vapor de agua contenida entre la máxima que puede contener.

El valor de humedad relativa en el aire es un parámetro de la deshidratación, y va a depender de la temperatura del aire, mientras mayor sea la temperatura menor será la humedad relativa, es decir el aire puede absorber más humedad.

$$\text{HR: humedad relativa (\%)} \\ \omega: \text{humedad absoluta (kg}_{\text{vapor}}/\text{kg}_{\text{aire seco}})$$

c) *Aire saturado*. Cuando el aire está en la condición de 100% de humedad relativa, se conoce como aire saturado y no puede absorber más humedad a una determinada temperatura.

d) *Temperatura de rocío*. Si disminuye la temperatura del aire atmosférico aumenta su humedad relativa, cuando la temperatura disminuye hasta alcanzar el 100% de humedad relativa, cualquier decremento en la temperatura ocasionara una condensación de vapor de agua para mantener la condición de aire saturado a esa temperatura; esta última se conoce como temperatura de rocío. Esta es igual a la temperatura de saturación correspondiente a la presión de vapor.

e) *Presión de vapor*. La presión de vapor es la presión de la fase gaseosa o vapor de un sólido o un líquido sobre la fase líquida, para una temperatura determinada, en la que la fase líquida y el vapor se encuentra en equilibrio dinámico. El aire atmosférico puede considerarse como un gas ideal, y por tanto la presión total en el aire puede considerarse como la suma de la presión ejercida por el aire seco más la presión de la masa de vapor.

La presión de vapor es importante para entender el proceso de deshidratación; cuando el aire atmosférico a una determinada humedad relativa está en contacto con una superficie húmeda, existe una tendencia a el equilibrio entre la superficie húmeda y el aire, es decir parte del agua en la superficie se evapora para igualar la presión de vapor que ejerce el aire con las que ejerce la superficie húmeda. Cuando el aire en contacto con la superficie se vuelve saturado al absorber la humedad evaporada se ha igualado la presión de vapor con la presión de la superficie.

La presión de vapor que ejerce el aire atmosférico es igual a la humedad relativa del aire por la presión de saturación del agua a la temperatura del aire

$$P_v = (HR)(P_{sat}T)$$

f) Proceso de saturación adiabática. Este proceso consiste en hacer pasar aire atmosférico a determinada temperatura y determinada humedad a través de una superficie de agua contenida en un canal; el aire atmosférico va absorber la humedad evaporada por la diferencia entre la presión de vapor y la presión de la superficie; la evaporación del agua es un proceso que consume energía, calor latente de evaporación, y que la va a tomar del calor sensible de la superficie del agua (esto explica por qué el agua tiene una temperatura ligeramente menor a la ambiente) y del calor sensible del aire, haciéndolo que también disminuya su temperatura. Si consideramos un canal lo suficientemente largo para que el aire salga de ahí saturado, la temperatura de salida corresponde a la temperatura de saturación adiabática, con esta temperatura se puede conocer la humedad relativa del aire.

g) Temperatura de bulbo seco y de bulbo húmedo. La temperatura de bulbo seco se conoce a la temperatura del aire atmosférico real, medido con un termómetro.

T: temperatura de bulbo seco (C)

La temperatura de bulbo húmedo, es muy parecida a la de saturación adiabática descrita anteriormente, y se mide con un termómetro con la mecha húmeda girado suavemente tratando de reproducir el proceso de saturación adiabática. En términos más precisos la temperatura de bulbo húmedo es la temperatura a la cual el agua, por evaporación de aire a una temperatura y humedad relativa, puede llevar adiabáticamente el aire al estado de saturación manteniendo una presión constante. El calor latente de la evaporación será suministrado a expensas del calor sensible del líquido y por lo tanto la temperatura de este último disminuye, la temperatura de bulbo húmedo siempre será menor a la temperatura de bulbo seco (Foust y col., 1987).

1.2.3. Transferencia de calor en el secado

El secado es un proceso que envuelve fenómenos de transferencia de masa y calor simultáneos y acoplados, que ocurren dentro del alimento. Durante este proceso, el agua se elimina para detener o aminorar el crecimiento de microorganismos perjudiciales, así como de ciertas reacciones de degradación (Hernández, et al. 2010). La eliminación de agua de los alimentos se consigue mayoritariamente utilizando aire caliente que elimina el agua desde su interior hacia la superficie

El tipo de material que se desea secar es un factor muy importante en todos los procesos de secado, ya que sus propiedades físicas y químicas juegan un papel importante durante dicho proceso debido a los posibles cambios que puedan ocurrir y al efecto de la eliminación de agua en el producto (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 2005).

En el proceso de secado los tres mecanismos de transferencia de calor tienen lugar y por lo regular siempre predomina uno. Para los secadores de aire, la velocidad de transmisión de calor es:

$$Q = h_s A (T_g - T_{sup}) \quad \text{Ecuación (1.1)}$$

Donde Q es la velocidad de transmisión de calor, h_s es el coeficiente de convección, A es el área a través de la cual tiene lugar el flujo de calor, T_g es la temperatura del aire y T_{sup} es la temperatura de la superficie que se está secando.

1.2.4. Transferencia de masa en el proceso de secado

En la transferencia de calor, el calor se transmite por la existencia de un gradiente de temperaturas; su velocidad es proporcional a la diferencia de temperaturas y a las propiedades del sistema de transferencia caracterizado por su coeficiente de transmisión de calor. De la misma forma la transferencia de masa tiene lugar cuando existe un gradiente de concentración o de presión y su velocidad es proporcional a este gradiente y las propiedades del sistema de transmisión caracterizado por su coeficiente de transmisión de masa

La transferencia de masa se puede describir matemáticamente como:

$$\frac{dw}{dt} = K_g A \Delta W \quad \text{Ecuación (1.2)}$$

Donde $\frac{dw}{dt}$ es la tasa de transferencia de masa, A es el área a través de la cual se realiza la transmisión, K_g es el coeficiente de transferencia de masa y ΔW es la diferencia de humedades. La aplicación de esta ecuación no es tan sencilla debido a los cambios de humedad en el proceso de secado. Inicialmente la masa es transferida desde la superficie del material, y después, desde las zonas internas del alimento hasta la superficie y de ahí al aire. Por lo tanto se debe determinar la relación entre la superficie húmeda y el aire. Luego considerar la difusión a través del alimento.

1.2.5. Curvas de secado

Cuando un sólido se seca experimentalmente, casi siempre se obtienen datos que asocian el contenido de humedad con el tiempo. La Figura 1, esta curva representa el caso general en que los sólidos mojados pierden humedad, primero por evaporación desde una superficie saturada del sólido, después sigue un periodo de evaporación de la superficie saturada que tiene un área que gradualmente va disminuyendo, y por último cuando el agua del interior del sólido se evapora. Esta curva indica que la velocidad de secado está sujeta a variar en función del tiempo o el contenido de humedad. Esta variación se ilustra con mayor claridad diferenciando gráfica o numéricamente la curva y haciendo una representación gráfica de la velocidad de secado en función del contenido de humedad en base seca, como se ilustra en la Figura 2, o como velocidad de secado en función del tiempo, como señala la Figura 3. Estas curvas de velocidad demuestran que el secado no es un proceso suave y continuo en el cual existe un solo mecanismo que ejerza el control a lo largo de toda su duración (Perry, 2008).

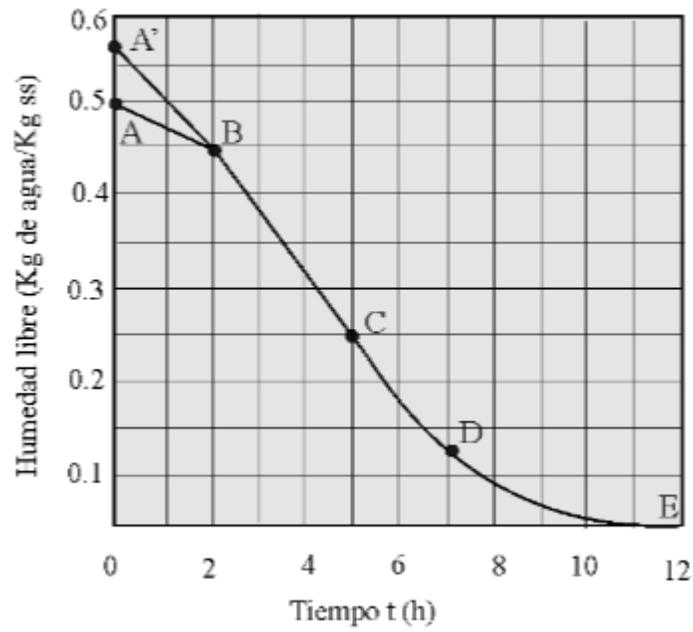


Figura 1. Contenido de humedad en función del tiempo (Herrera, 2006).

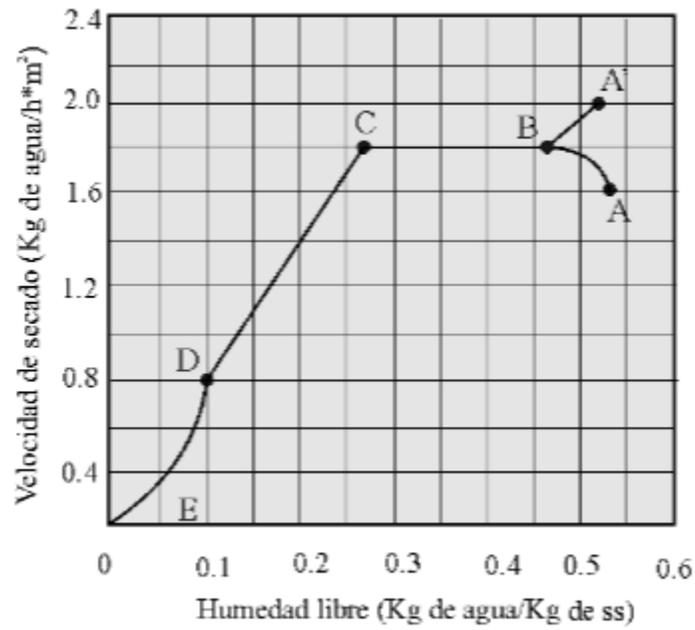


Figura 2. Velocidad de secado en función del contenido de humedad (Herrera, 2006).

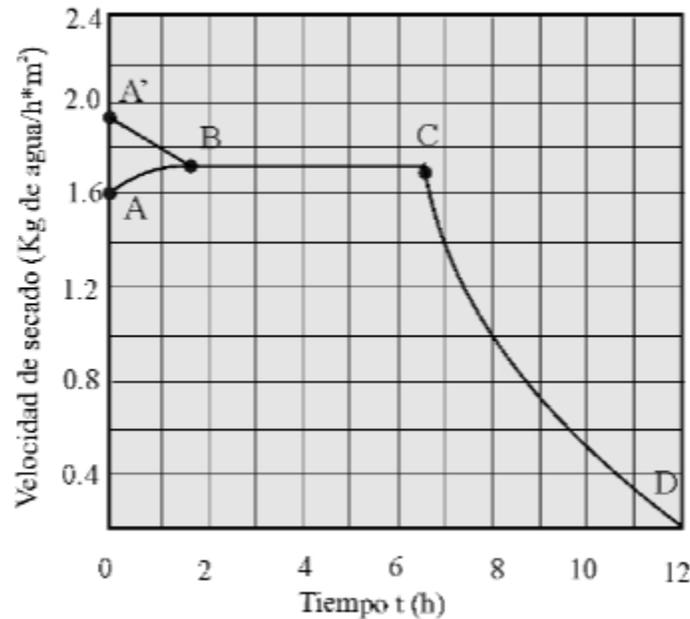


Figura 3. Velocidad de secado en función del tiempo (Herrera, 2006).

1.2.5.1 Descripción de las curvas de secado

Las curvas antes mostradas representan el proceso desecado a condiciones constantes. Empezando en el tiempo cero el contenido inicial de humedad libre corresponde al punto A. Al principio el sólido suele estar a una temperatura inferior de la que tendrá al final y la velocidad de evaporación va en aumento, por el contrario, cuando el alimento está a una temperatura más elevada A', la velocidad de evaporación disminuye hasta llegar al punto B, en el cual, la temperatura de la superficie alcanza su valor de equilibrio.

Este periodo inicial de ajuste en estado estacionario suele ser bastante corto y por lo general se pasa por alto en el análisis de los tiempos de secado (Geankoplis, 2006; Treybal, 2001).

La recta entre el punto BC tienen una pendiente y velocidad constante. Durante este periodo, la superficie del sólido está muy húmeda al principio y sobre ella hay una película de agua continua. Esta capa de agua, es agua libre y actúa como si el sólido no estuviera presente. La velocidad de evaporación con las condiciones establecidas para el proceso, es independiente del sólido y esencialmente igual a la velocidad que tendría una superficie líquida pura. Si el sólido es poroso, la mayor parte del agua que se evapora durante el periodo de velocidad constante proviene de su interior.

Este periodo continúa mientras el agua siga llegando a la superficie con la misma rapidez con la que se evapora (Geankoplis, 2006).

Los periodos de velocidad decreciente inician en el punto crítico de humedad C, al concluir los procesos de velocidad constante. En este punto no hay suficiente agua en la superficie para mantener una película continua. La superficie ya no está totalmente húmeda, y la porción húmeda comienza a disminuir durante el periodo de velocidad decreciente hasta que la superficie queda seca en su totalidad, punto D. El segundo periodo de velocidad decreciente empieza en el punto D, aquí, el plano de evaporación comienza a desplazarse con lentitud por debajo de la superficie. El agua evaporada atraviesa el sólido para llegar hasta la corriente de aire. Es posible que la cantidad de humedad que se elimine durante este periodo sea bastante pequeña, pero aun así, el tiempo requerido puede ser largo (Geankoplis, 2006).

1.2.6. Factores que afectan al proceso de secado

Factores muy importantes en el secado de partículas son el tamaño y geometría de la partícula. Esta relación se presenta de la siguiente forma: “la velocidad de secado de una partícula húmeda delgada y el grueso de la misma es expresada de la siguiente manera; la velocidad de secado de un pedazo de la partícula es inversamente proporcional al cuadrado del grueso de la pieza”.

En lo que corresponde a la cámara de secado, encontramos factores tales como la temperatura, humedad, velocidad del aire y la presión. Uno de los factores más importantes y que determina críticamente la velocidad de secado es la diferencia de temperatura que se tiene de bulbo seco de aire y la de bulbo húmedo de la superficie de la partícula que está siendo secada, mejor conocida como depresión de bulbo húmedo. La relación es la siguiente, entre más grande es esta diferencia, mayor será la humedad de vapor que el aire puede tomar y la rapidez a la cual esta puede ser removida de la superficie del material.

La temperatura del gas en el lecho representa un factor de suma importancia, como es de imaginarse, esta determina el total de humedad que puede contener. Cuando el proceso comienza, la temperatura del gas es alta, dado que es en este punto en que mayor humedad debe removerse, conforme el proceso se lleva a cabo. La temperatura se ve reducida como medida para evitar dañar estructuralmente la partícula.

El medio o agente de secado también es un factor importante. Los productos alimenticios pueden ser secados con aire, vapor sobrecalentado, en vacío, con gas inerte y con la aplicación directa de calor. Generalmente se utiliza aire como medio deshidratador debido a su abundancia, su conveniencia y a que puede ser regulado sobre el calentamiento del alimento (Fellows, 1994). El aire caliente causa la transferencia de calor que hace posible la deshidratación del alimento, además, conduce el aire húmedo a la salida del secador y la velocidad de secado aumenta a medida que incrementa la velocidad de aire que fluye sobre el alimento (Foust y col., 1987).

1.2.6.1. Humedad del alimento

La cantidad de agua en el alimento depende del tipo, la forma, y es muy propia de cada especie; puede ser expresada en base húmeda, o en base seca. En el alimento se puede clasificar de dos formas, como humedad libre o humedad ligada.

- **Humedad libre.** Es la cantidad de agua que es posible extraer del alimento y se conoce como agua libre. Esta se evapora al ejercer una presión sobre la atmosfera de aire de secado de menor presión de vapor. A veces también se define como la diferencia entre la humedad inicial y la humedad de equilibrio, es decir como la humedad que es posible extraer del alimento.
- **Humedad ligada.** Es la cantidad de agua en el alimento que se encuentra adherida fuertemente al alimento, y su presión es menor que la presión de vapor del aire; por lo tanto es muy difícil extraerla.
- **Humedad de equilibrio.** Cuando el alimento alcanza este valor de humedad, ha dejado de ceder agua al aire secante, y se encuentra en equilibrio con él; este valor es particular de cada alimento pero también depende de la temperatura del aire de secado y de su humedad relativa. Si se pudiera disminuir la humedad del alimento más allá de la humedad de equilibrio sería el aire el que le cedería humedad al alimento. En la práctica es difícil alcanzar este valor, el proceso de deshidratación termina cuando la humedad ha llegado a un valor cercano a este (Earle, 1988).

1.2.6.2. Actividad acuosa en los alimentos

El agua es un contribuyente importante a las propiedades organolépticas de los alimentos. La pérdida de agua en los alimentos ricos en ella, o la ganancia de agua en alimentos en que es escasa, reduce su calidad organoléptica y por tanto, su aceptabilidad. Por otra parte, la presencia de agua a ciertas concentraciones en los alimentos, facilita su deterioro por acción de los microorganismos y las enzimas. Por lo tanto, retirando agua de los alimentos o haciéndola menos disponible se puede extender la vida útil de los mismos (Brennan y col., 1998).

Para medir el agua que es capaz de propiciar las reacciones anteriores, se acuñó el término de actividad acuosa, que se viene empleando desde 1953 (Scout, 1953) el cual, representa el grado de interacción del agua con los demás constituyentes. Por definición, la actividad del agua (A_w) es la humedad relativa de equilibrio (HR) dividida entre 100 (Singh, 1998), como muestra la Ecuación 1.3.

$$A_w = \frac{HR}{100} \quad \text{Ecuación (1.3)}$$

La A_w tiene una gran influencia en el crecimiento de los microorganismos; los que más agua requieren son las bacterias (>0.91), después las levaduras (>0.88) y finalmente los hongos (>0.80) (Verrips y col., 1981; Leistner y col., 1976). Según esto, muchos métodos de conservación de alimentos se basan precisamente en la reducción y el control de la A_w , como es el caso de los productos deshidratados y concentrados (Badui, 1999).

1.2.7. Clasificación de Secadores

A nivel industrial, cuando el secado se hace por transmisión de calor al sólido húmedo, diversos son los tipos de secadores utilizados dependiendo de las características y propiedades físicas del producto húmedo y/o del procedimiento deseado para que ocurra dicha transmisión de calor. Entre ellos se encuentran:

1. Secadores directos: se caracterizan por utilizar gases calientes para suministrar el calor en contacto directo con el alimento, fundamentalmente por convección, y arrastrar el líquido vaporizado. Ejemplo de este tipo son los secadores de horno o estufa, de bandejas, charolas o de armario, de túnel, de cinta transportadora, de torre o bandejas giratorias, de cascada, rotatorios, de lecho fluidizado, por arrastre neumático, por atomización (Perry y col., 2008).
2. Secadores indirectos: el calor se transmite al alimento por conducción a través de la pared que lo contiene, eliminándose el líquido vaporizado independientemente del medio calefactor; entre ellos se encuentran los secadores de bandeja a vacío, por sublimación (liofilizadores), de tornillo sin fin, de rodillo (Perry y col., 2008).
3. Otro tipo de secadores menos frecuentes son los secadores por radiación, en donde la energía se produce eléctricamente (infrarrojos) o por medio de refractarios únicamente calentados con gas, y los secadores dieléctricos y por microondas (Perry y col., 2008).

1.2.7.1. Secador de Charolas

Consiste en unas cámaras o compartimentos donde se ubican las bandejas que contienen el material a secar. Las bandejas se colocan sobre bastidores que pueden moverse como unidades para colocarlos en la cámara o ser retirados de ella (Earle, R. 1988). El secado se realiza con aire caliente u otro gas, soplando sobre las bandejas mediante uno o varios ventiladores. Las bandejas se fabrican de cualquier material que sea compatibles primero con el producto a secar y segundo con las condiciones de corrosión y temperatura, principalmente (Fito et al., 2001). En general, se prefieren las bandejas metálicas, ya que conducen el calor con mayor facilidad. Cuando las características del material a secar y el manejo lo permitan, las bandejas deben tener bases perforadas para proveer una mayor superficie de desecación (Orrego, 2003).

El funcionamiento de los secadores de bandejas depende del mantenimiento de una temperatura constante y una velocidad de aire uniforme sobre todo el material que se está secando. Conviene tener una circulación de aire con velocidad de 1 a 10 m/s para mejorar el coeficiente de transmisión de calor en la superficie y con el propósito de eliminar bolsas de aire estancado. La corriente de aire adecuada para este tipo de secador es depende de que el ventilador tenga una capacidad suficiente, del diseño de la red de ductos para modificar cambios repentinos de dirección y de desviadores correctamente ubicados. La corriente de aire no uniforme es uno de los problemas más graves que se presentan en el funcionamiento de los secadores de bandejas (Geankoplis, 2006). Es el secador más utilizado a nivel planta piloto, Figura 4, con calentamiento directo y modo de funcionamiento discontinuo.



Figura 4. Secador de charolas o bandejas (Almada, 2005).

1.2.7.2. Secador Solar

Los secadores solares constan de dos elementos básicos: el colector, donde la radiación calienta el aire, y la cámara de secado, donde el producto es deshidratado por el aire que pasa. El aire circula dentro del secador con el fin de eliminar la humedad evaporada del producto. Esta circulación se logra por dos métodos: circulación forzada y por convección natural (Almazar y Muñoz, 1994; Moreno, 2000). En general existen tres diferentes tipos de secadores solares: indirecto, directo y mixto. La forma de operar un secador da lugar a dos alternativas: por lotes o continuo (Almazar y Muñoz, 1994).

1. Secador solar indirecto (Figura 5): el colector y la cámara de secado están separados. El aire es calentado en el colector y la radiación no incide sobre el producto colocado en la cámara de secado. La cámara de secado no permite la entrada de la radiación solar (Moreno, 2000).

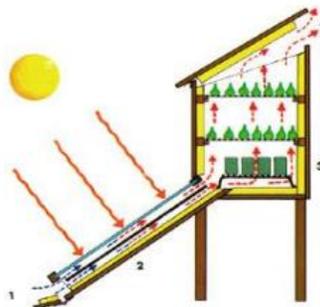


Figura 5. Secador solar indirecto (Almada, 2005).

2. Secador solar directo (Figura 6): en este tipo de secador, el colector y la cámara de secado, pueden estar juntos, en cuyo caso la cámara que contiene el producto también cumple la función de colector recibiendo la radiación solar. En los secadores solares directos la radiación es

absorbida por el propio producto, resultando más efectivo el aprovechamiento de la energía para producir la evaporación del agua (Moreno, 2000).

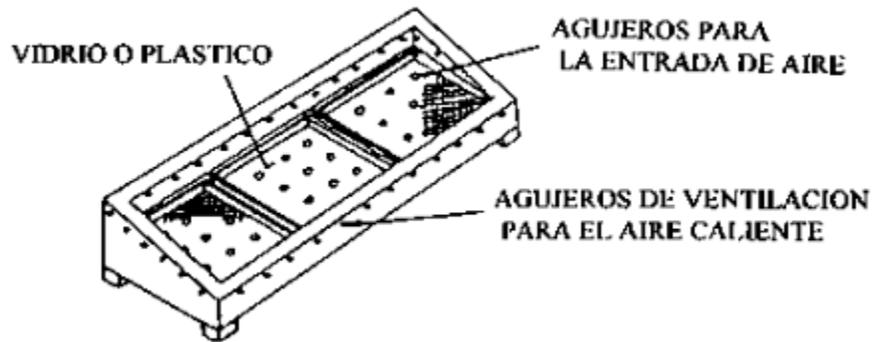


Figura 6. Secador solar directo (Moreno, 2000).

3. Secador solar Mixto (Figura 7): son aquellos donde la colección de radiación utiliza tanto en el colector solar previo a la cámara de secado como en la misma de secado. El secador solar mixto presenta varias ventajas; en primer lugar el control del proceso es más simple. Es fácil de integrar una fuente auxiliar de energía para construir un sistema hídrico (Moreno, 2000; Almada, et al., 2005).

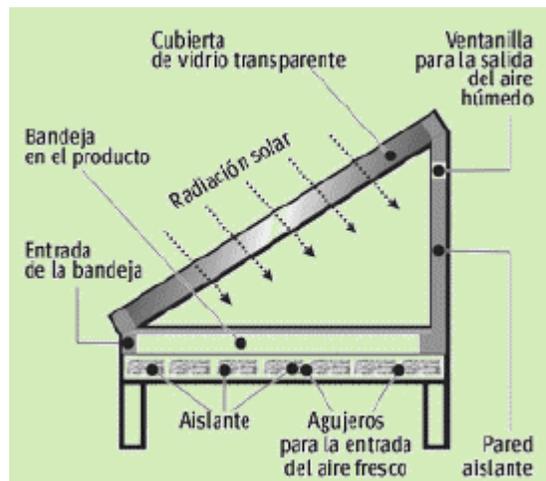


Figura 7. Secador solar mixto (Almada, 2005).

El secador a construir dependerá de las necesidades del consumidor y del tipo de producto que se desee deshidratar, un secador solar puede ser rústico y constar de una cubierta de plástico para encerrar el calor del sol y lograr el efecto de invernadero, también se pueden colocar cristales y usar pintura negra para elevar la temperatura en el interior del secador; la desventaja de este último es que se incrementan los costos. Hay secadores con resistencias eléctricas, aún mucho más costosos. En el mercado actual los secadores se cotizan entre los \$20,000.00 a \$30,000.00 por los fabricantes de equipos agroindustriales (Rico, 2010).

1.2.8. Factores importantes respecto al funcionamiento del secador

1.2.8.1. Tiempo de secado

El tiempo de secado de las frutas y hortalizas depende de varios factores tales como: tipo de producto, tamaño de los trozos, temperatura del aire, humedad relativa del aire, velocidad del aire. (Almada, et al., 2005)

Para el secado se deben de tomar en cuenta tres etapas distintas:

1. La etapa inicial de secado del producto, en la cual la rapidez con la cual se elimina humedad en función del tiempo aumenta.
2. La rapidez del secado permanece constante y es independiente del sólido, de modo que para las mismas condiciones externas, el proceso es similar al que se daría en la superficie de una masa de agua.
3. Una vez que la humedad superficial ha sido eliminada, la humedad interna comienza a ser eliminada pero, en consecuencia, la rapidez del secado disminuye a medida que se va perdiendo humedad interna por evaporación en la superficie (Moreno, 2000; SAGARPA, 1998).

Entre más breve sea el tiempo de secado mejor es la calidad del producto, sin embargo más importante que deshidratar rápidamente, es que los alimentos estén adecuadamente secos antes de almacenarse.

1.2.8.2. Flujo de aire

La optimización del flujo del aire es importante, ya que es el aire en contacto con el producto el encargado de extraer su humedad. La temperatura inicial y la corriente de aire descienden conforme avanza en el secado. En un proceso eficiente y dado que la circulación de aire lleva un costo, es necesario determinar el flujo másico de aire óptimo para secar el producto en el menor tiempo posible, el cual va a depender de la naturaleza del producto, tipo de secador, etc. Si se conocen las temperaturas existentes en diversos puntos del secado, se puede determinar aproximadamente que tan correctamente está trabajando la corriente de aire de entrada (Moreno, 2000).

1.2.8.3. Tipos de circulación de aire

El aire circula dentro del secador con el fin de eliminar la humedad evaporada del producto. Esta circulación se logra por dos métodos: circulación forzada y por convección natural.

En la circulación forzada el aire es movido por un ventilador que consume energía mecánica o eléctrica. Este tipo de circulación facilita el diseño en el secado en el caso de los equipos de tamaño grande, además de facilitar el control del proceso de secado. Usando este tipo de circulación se pueden obtener velocidades de circulación de aire entre 0.5 y 1m/s.

En la circulación por convección natural el aire es movido por las diferencias de temperatura entre las distintas partes del equipo, que promueven la convección térmica del aire. Este tipo de circulación se hace más difícil de incorporar con equipos grandes. Para equipos pequeños o medianos se pueden lograr velocidades de aire de 0.4 a 1m/s al interior de la cámara (Moreno, 2000).

1.2.9. Diseño de un Secador

En el diseño e implementación de la etapa de secado y la selección de un secador (que es una pieza clave en la manufactura de productos de frutos secos), ya sea como paso final o intermedio en el proceso, hay por lo menos seis reglas fundamentales que deben ser observadas (Fito et al., 2001):

1. Distribución uniforme de producto. Para mantener una humedad final consistente es crítico que el producto a ser secado esté uniformemente distribuido en la alimentación al secador.
2. Distribución uniforme del flujo del aire. Ya que el aire circulante dentro del secador provee un medio de calentamiento del producto, y para la evaporación y remoción de la humedad de cada rodaja de manzana, la calidad del proceso entero depende de la uniformidad del flujo de aire.
3. Adecuada remoción del aire de deshecho. El aire cargado de humedad debe ser removido del secador para completar el proceso de secado. Para una operación eficiente, el aire de deshecho debe ser removido del secador en un punto que el aire recirculado contenga el mayor contenido de humedad y la mayor caída de temperatura después de pasar por el lecho de producto.
4. Diseño eficiente del lecho del producto. Para ayudar el proceso de secado, es crucial que las perforaciones de la banda transportadora sean diseñadas tanto para prevenir que el producto pueda pasar a través de ellas como para proveer la suficiente área abierta necesaria para mantener una recirculación uniforme del flujo del aire.
5. Seguridad sanitaria. El diseño global del secador debe eliminar áreas donde el producto o sus finos puedan quedar atrapados.
6. Eficiencia energética. El costo de operación del secador debe ser disminuido al mínimo ya sea por diseño del mismo o por parámetros de operación sin reducir la calidad del producto seco.

1.2.9.1. Requisitos básicos de un secador bien diseñado

1. Secado homogéneo del producto, es decir un flujo uniforme por toda la zona de secado. Preferentemente, la dirección del aire cambie una o más veces durante el periodo de secado.
2. La temperatura del aire siempre debería estar bajo el nivel crítico que desciende durante el periodo de secado. A temperaturas muy altas el aire quema la superficie.
3. Es importante poder mover el producto por las rejillas y durante el transporte, evitando así comprimirlos entre las paredes y bandejas.
4. Mantener condiciones higiénicas en la cámara de secado, es decir, superficies lisas de acero inoxidable y una buena distribución del aire dentro de la cámara de aire para evitar acumulación de polvo en los rincones fríos.
5. Considerar flexibilidad en el manejo el producto: secado del producto de bajo diámetro sin que caigan ni sean levantados por el aire.
6. Algunos aspectos relevantes son que los transportadores deben permitir un buen flujo de aire y aun proveer un buen soporte al producto. Los transportadores de los secadores son casi siempre construidos de acero inoxidable perforado. El tamaño de la perforación afecta la capacidad del transportador para llevar producto, y también juega un rol adicional para proveer uniformidad de flujo de aire (Fito et al., 2001).

1.2.9.2. Materiales para la construcción de secadores

Las propiedades de resistencia mecánica, con frecuencia, sirven como base para dictaminar sobre qué tipo de material se usará en la construcción de secadores. Con vistas a un fin de aplicación concreto, lo que más interesa son propiedades como la conductividad térmica y la resistencia a la corrosión, así como condiciones de inocuidad necesarias cuando se trata de deshidratación de alimentos. Teniendo en consideración todos estos factores se contemplan dos materiales como los más apropiados para la construcción de secadores: aluminio y acero inoxidable.

- **Aluminio:** La presencia de este material en tantos sectores se debe a sus múltiples propiedades. Por citar solo algunas de sus características, se puede decir que el aluminio es maleable, fácil de moldear y mecanizar, con una alta conductividad eléctrica y térmica, además es un material muy resistente a la corrosión y puede combinar con otros materiales, dando como lugar a un gran número de aleaciones (Pedro, 1992).
Es fácil de conformar por laminado y estirado. Su resistencia a la tracción, moldeado, es de 90 a 120 N/mm² y laminado en caliente de 130 a 200 N/mm². A la inversa, el alargamiento varía entre 35% y 3%. Su conductividad térmica es de 205,0 W/mK (Coca, 1992).
Se puede alear fácilmente con otros metales, sometido a la acción del aire, se cubre de una capa de óxido, que debido a su estanqueidad protege de oxidación ulterior al metal situado bajo la misma, por lo que el aluminio es resistente a la corrosión, como material conductor se emplea exclusivamente aluminio puro (99.5 %) (Senner, 1994).
- **Acero inoxidable:** El acero inoxidable es un producto altamente resistente a la corrosión, fricción y altas temperaturas, esto debido a la adición de cromo, el cual está presente en una cantidad igual o mayor al 12% en peso. Generalmente la resistencia a la corrosión es directamente proporcional al contenido de cromo. Posee una conductividad térmica de 50,2 W/mK (Young, 1992).
Muchos aceros inoxidables producidos contienen cantidades significativas de otras aleaciones con el propósito de aumentar aún más, la resistencia a la corrosión y/o cambiar sus propiedades mecánicas. Entre ellos se encuentran: Níquel, Cobre, Titanium, Molibdeno, etc. Los aceros inoxidables tienen mucha variedad en áreas de aplicaciones, incluyendo: artículos para el hogar, materiales de construcción, equipos químicos y petroquímicos, quirúrgicos, hasta materiales decorativos de interiores en edificaciones. Existen varios grupos o familias de aceros inoxidables, y cada uno contiene un número específico de tipos con características distintas.
El acero inoxidable puede ser clasificado en cinco diferentes familias; cuatro de éstas corresponden a las particulares estructuras cristalinas formadas en la aleación: austenita, ferrita, martensita, y dúplex (austenita más ferrita); mientras que la quinta familia son las aleaciones endurecidas por precipitación, que están basadas más en el tipo de tratamiento usado que en la estructura cristalina (Senner, 1994).

1.2.9.3. Color de la tubería

Para el procedimiento de elección de color un factor muy importante es el color de la tubería, ya que al querer concentrar en esta el mayor calor que sea posible, se debe evitar la reflectancia de los

rayos del sol en su superficie, lo cual se lograría mediante la aplicación de un color oscuro logrando así la absorción de los rayos solares. El recubrimiento negro no refleja ningún color y absorbe casi toda la radiación solar (90% a 98%), todos los otros colores están en porcentajes intermedios en proporción a su tono y brillo. En síntesis, el color de una superficie da una buena indicación de la absorción de la radiación solar. La absorción decrece y la luz reflejada aumenta con la claridad del color, pero el color no indica el comportamiento de una superficie con respecto a la radiación que pueda emitir en virtud de su temperatura.

1.2.9.4. Ventajas de un secador solar parabólico

Una parábola es la curva formada por los puntos que están a la misma distancia de un punto concreto, denominado foco, y de una recta concreta, llamada directriz. Por tanto, para tener determinada una parábola simplemente necesitamos saber cuál es el foco y cuál es la directriz de la misma. Una parábola tiene un eje de simetría, que es la recta que pasa por su foco y por el punto más bajo (o más alto, según la posición de la directriz respecto del foco) de la misma, que es el vértice de la parábola (Manrique, 1984).

La razón por la que este instrumento tiene forma de paraboloide es una interesante propiedad de la parábola que enunciamos a continuación:

Los rayos paralelos al eje de simetría de la parábola son reflejados por la misma hacia su foco. Es decir, que si yo envío un rayo hacia la parábola que sea paralelo a su eje, entonces ésta lo refleja hacia su foco. O sea, que el reflejo de los rayos paralelos al eje de la parábola pasa por el foco de la misma. Si se construye un paraboloide y se ubica en un lugar donde lleguen los rayos del sol, y a éste se le coloca un tubo que concentre el calor con un receptor en el foco del mismo, se acumulará los rayos paralelos al eje del paraboloide con la total seguridad de que todas ellas serán recibidas por dicho receptor. Al orientar el paraboloide con el receptor en su foco hacia el sol se acumulará mayor energía solar.

Es decir, se dice que cualquier línea paralela al eje de la parábola, que tocará en un punto P de la misma, es reflejada por la tangente en P *hacia adentro* con el mismo ángulo que forma dicha tangente con el segmento proyectado desde P a la directriz, por lo que el reflejo de la misma va directamente hacia el foco de la parábola:

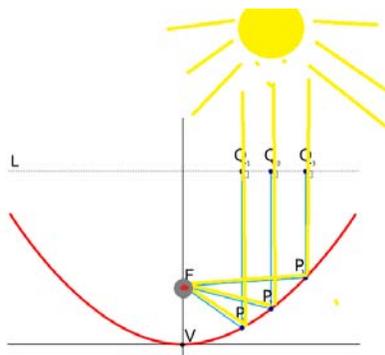


Figura 8. Representación de los rayos del sol hacia los focos de la parábola.

1.3. LA CALIDAD EN LOS ALIMENTOS DESHIDRATADOS

La calidad, en términos generales, es un concepto abstracto, de difícil definición, donde el consumidor se constituye en el principal elemento para su evaluación. Para el consumidor, algunos de los atributos fundamentales de la calidad de cualquier alimento son la ausencia de defectos, la textura, el aroma, el valor nutritivo, el aspecto, que incluye tamaño, color y forma (Jarén, 2005).

Al deshidratar los alimentos, se producen cambios físicos y químicos que influyen en la calidad final, por lo que la producción de cualquier alimento deshidratado no sólo pasa por optimizar la operación en sí, en términos de volumen de producción o coste, sino que además es requisito fundamental ofrecer productos que satisfagan las necesidades y requerimientos del consumidor. El interés por mejorar la calidad de este tipo de productos, especialmente de frutas y vegetales secos, nos conduce a diseñar procesos que tiendan no sólo a mejorar la estabilidad durante el almacenamiento, sino también a procurar conservar sus propiedades sensoriales lo más parecidas a las del alimento fresco.

1.3.1. Reducción del contenido de agua

Los microorganismos en un estado saludable de crecimiento pueden contener más del 80% de agua. Esta agua la obtienen del alimento en el que proliferan. Si se la extrae del alimento, también se la sacará de la célula bacteriana, y la proliferación se detendrá. De ahí que la deshidratación parcial es menos efectiva que el total. Sin embargo, para algunos microorganismos la deshidratación parcial puede ser suficiente para detener el crecimiento bacteriano y su multiplicación. La a_w óptima para el crecimiento de la mayor parte de los microorganismos está en el rango 0,99-0,98.

En general, las bacterias de deterioro comunes se inhiben a a_w aproximadamente 0,97; los clostridios patógenos a a_w 0,94, y la mayor parte de la especie *Bacillus* a a_w 0,93. *Staphylococcus aureus* es el patógeno que posee mayor tolerancia a la a_w y puede crecer en aerobiosis a a_w de 0,86. Muchos hongos y levaduras son capaces de proliferar a a_w debajo de 0,86; algunas levaduras osmofílicas y hongos xerófilos pueden crecer lentamente a a_w ligeramente mayores a 0,60. En consecuencia, para conservar un alimento utilizando como factor de estrés sólo la reducción de a_w , su a_w debiera disminuirse a 0,60. Los alimentos totalmente deshidratados, por ejemplo, tienen valores de a_w aproximadamente iguales a 0,30 para controlar no sólo el crecimiento microbiano sino también otras reacciones de deterioro (Alzamora M. y col. 2004).

1.3.2. Importancia del color en los alimentos

El color es una propiedad de la materia directamente relacionada con el espectro electromagnético y que, por lo tanto, se puede medir físicamente en términos de su energía radiante o intensidad, y por su longitud de onda (Kramer y col., 1970).

El color es una de las características más importantes que tienen los alimentos para su aceptación, ya que es el primer contacto que tiene el consumidor con los productos. Los alimentos tanto en forma natural como en forma procesada, presentan un color característico y bien definido mediante el cual el consumidor los identifica, cualquier cambio que éste sufra puede causar el rechazo de los

productos. Los colores de los alimentos se deben a distintos compuestos, principalmente orgánicos, algunos de ellos se producen durante su manejo y procesamiento y otros que son pigmentos naturales o colorantes sintéticos añadidos. Cuando se someten a tratamientos térmicos, los alimentos desarrollan tonalidades que van desde un ligero amarillo hasta un intenso café, generados por los productos de las reacciones de Maillard y de caramelización; en otras ocasiones, los pigmentos que contienen se alteran y cambian de color (Badui, 1999).

Uno de los sistemas que se utilizan para identificar un color en un producto es el Sistema Hunter. Este sistema relaciona los parámetros L, a y b, donde L corresponde a la luminosidad, a define el componente rojo-verde; rojo para valores positivos y verde para valores negativos, y el parámetro b define el componente amarillo-azul; amarillo para los valores positivos y azul para los valores negativos (Calvo y col., 1997).

Se usa un colorímetro para realizar la prueba de color en alimentos deshidratados. El fundamento de dicho aparato es el siguiente: “Posee una fuente de emisión de radiación infra-roja que incide sobre la superficie de la muestra, donde se absorbe cierta cantidad y la radiación reflejada es cuantificada por el instrumento, en una escala relativa, definida por elementos de referencia”.

Tratamiento de datos: Se debe registrar cada uno de los valores obtenidos en el colorímetro. En el cuadro 2 se presenta la interpretación y las escalas de la luz.

Cuadro 2. <i>Interpretación y escalas de luz en el Sistema Hunter.</i>		
Parámetro	Interpretación	Escala
L	Designa brillantez o luminosidad	100 = blanco 0 = negro
A	Indica que tan rojo o verde es el alimento	Positivo = rojo Negativo = verde
B	Indica que tan amarillo o azul es el alimento	Positivo = amarillo Negativo = azul

Elaborada con base en Ortiz, A. 2003.

Valor o brillo (Value). Es un término que se usa para describir que tan claro u oscuro parece un color, y se refiere a la cantidad de luz percibida. El brillo se puede definir como la cantidad de “oscuridad” que tiene un color, es decir, representa lo claro u oscuro que es un color respecto de su color patrón. El color tiene un grado de Luminosidad o Valor (Value).

Para poder evaluar la diferencia entre dos colores, en primer lugar, tendremos que medir ambas muestras con un colorímetro Minolta CR-300, y en coordenadas Lab. Una vez que tengamos las dos lecturas podremos calcular la diferencia de color o Delta E (ΔE).

El ΔE nos indicara la igualdad entre dos muestras. Para calcular el Delta E se utilizó la siguiente ecuación:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad \text{Ecuación (1.4)}$$

Siendo:

(ΔL) L muestra – Lreferencia

(ΔL) a muestra – a referencia

(ΔL) b muestra – b referencia

1.3.3. Cambios de la microestructura de alimentos durante la deshidratación

La textura de las frutas cambia drásticamente durante el procesado de secado debido a las alteraciones inducidas en su estructura. Las propiedades mecánicas de los tejidos vegetales son el resultado de la contribución de los diferentes niveles estructurales, así como de sus interacciones. En concreto, la presión de turgencia ejercida sobre la membrana plasmática por los fluidos intracelulares, la rigidez de la pared celular, la fuerza de unión entre células contiguas a través de la lámina media y el nivel de empaquetamiento celular, está directamente relacionado con la existencia de espacios intercelulares llenos de líquido, constituyendo los factores estructurales más importantes que existen a nivel celular y de los que depende la textura del alimentos de origen vegetal.

El daño que sufre la estructura de un alimento sometido a cualquier proceso industrial que involucre un cambio térmico es resultado de un reacomodo microestructural (Aguilera, 2005), que puede ser observado mediante técnicas como la microscopia.

1.4. APLICACIÓN DE TRATAMIENTOS PREVIOS AL SECADO

Cualquiera que sea el método de secado utilizado es inevitable inducir, en mayor o menor grado, la degradación de ciertos atributos de calidad de la fruta (textura, color, flavor). Actualmente existe un amplio interés en la investigación y desarrollo de técnicas de conservación de alimentos que permitan obtener productos de alta calidad nutricional y cuyas características sensoriales sean lo más similares a la de los productos frescos. En las frutas no se usa comúnmente el blanqueamiento o escaldado, pues les da un sabor a cocido. Su principal problema es el pardeamiento por oxidación y la pérdida de vitaminas A y C. El pardeamiento es crítico en las frutas de color pálido, como manzanas, peras, duraznos, damascos y bananas a causa de la acción de la enzima fenoloxidasas. Para impedir estos efectos, apenas peladas, se las somete a un control químico que interfiere las reacciones químicas oxidantes. Este consiste en un baño en una solución de ácido con agua. El ácido más usado es el ascórbico (vitamina C). También éste puede ser empleado en mezclas con ácido cítrico y/o azúcar, pues resulta más efectivo que usarlo solo (Kuskoski, E. y col. 2005).

1.5 PRODUCCIÓN Y CONSUMO NACIONAL DE ENERGÍA

En nuestro país los requerimientos energéticos se cubren principalmente por medio de fuentes de energía no renovables. Como alternativa para garantizar el abasto energético se cuenta con la energía solar, la cual presenta numerosas características positivas, tales como: ser abundante, ser prácticamente ilimitada y estar libre de contaminación por no tener productos de desecho que deban eliminarse (Manrique, 1984).

La utilización de la energía solar para diversos fines no es reciente; pero, sólo hasta la década de los 70's es cuando se ha incrementado la investigación y el desarrollo de sistemas para su captación y aprovechamiento. Cada vez se encuentran más aplicaciones sumamente prácticas, tales como: calentamiento de agua para consumo doméstico, destilación de agua, calefacción de ambientes y el proceso de secado (Manrique, 1984).

El principio de estas tecnologías es el de convertir la radiación solar (fuente primaria) en calor o electricidad. Los sistemas solares son generalmente autónomos, aunque pueden necesitarse sistemas auxiliares de energía convencional. En los últimos años, son los secadores solares los que han tenido mayor auge y mejor rendimiento en el área de la tecnología que usa la radiación solar.

II. METODOLOGÍA

2.1 OBJETIVOS

2.1.1. Objetivo general

Evaluar las diferentes condiciones de la deshidratación de manzana Red Delicious en un secador solar convectivo tipo parabólico y un secador de charolas, a través del seguimiento de los cambios en sus propiedades físicas, organolépticas, fisicoquímicas y estructurales del producto a lo largo del proceso, así como el gasto energético y los costos de producción, para determinar la viabilidad de utilizar el secador solar como equipo auxiliar al secador de charolas.

2.1.2. Objetivos particulares

1. Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de secador solar indirecto con movimiento en el colector, aprovechando la radiación solar a diferentes horas del día para la reducción de humedad de manzana en rodajas.
2. Estudiar el proceso de deshidratación en la manzana Red Delicious pre-tratada con antioxidante mediante la cinética de deshidratación en un secador de charolas y en un secador solar, para la obtención del coeficiente de difusión, el tiempo total del proceso y hacer equivalencias en costos.
3. Realizar el balance de materia y energía en el secador de charolas y solar parabólico a la temperatura máxima alcanzada en el mes de octubre-noviembre en el caso del secador solar y de 70°C para el secador de charolas, mediante los datos experimentales obtenidos y variables involucradas dentro del proceso para la obtención de la eficiencia térmica de cada uno.
4. Analizar los cambios estructurales ocasionados por el proceso de deshidratación a diferentes condiciones (tipo de secador y temperaturas 70-35°C) mediante estudios estructurales y de cambio de color para la selección de las condiciones de secado que provoquen menor daño estructural a la manzana.
5. Analizar los cambios de color a lo largo del proceso, haciendo uso de un colorímetro, para poder hacer una relación con propiedades de la manzana a través del tipo de secador y tiempo de secado.

2.2 MATERIALES Y MÉTODOS

Para diseñar el secador solar y definir lo mejor posible las características necesarias del equipo realizamos una búsqueda de información sobre diferentes tipos de secadores solares y su principio de funcionamiento. Ésta búsqueda se hizo en internet y artículos que hablaban sobre el tema.

2.2.1. Objetivo particular 1

2.2.1.1. Construcción del secador

Uno de los requisitos que buscamos del secador es que fuera de fácil manejo y los costos no fueran elevados. La forma como se construyeron los cuatro principales componentes se describe a continuación:

1. *Parábola:* Para la selección del material del que estaría hecha la parábola se realizó una prueba al aire libre, con exposición al sol de aluminio y acero acabado tipo espejo, ubicados en posición directa a los rayos del sol por el lapso de una hora, enfrente existió un material que captó el calor gracias a la reflexión de los rayos en los materiales expuestos al sol. Al término de la prueba se hicieron las medidas de las temperaturas alcanzadas gracias a un termómetro digital (Marca Fluke- 566).

Se realizó el cálculo del ángulo adecuado de la parábola de acero inoxidable, para el posicionamiento del tubo concentrador en el punto focal, para esto se utilizó el programa de software: "Parábola Calculator 2.0".

2. *Cámara de secado.* Se expusieron al sol durante una hora los materiales propuestos para la cámara de secado que, basados en la bibliografía, se decidió que fueran acero inoxidable y aluminio. Para la elección se tuvo en cuenta cuál de los dos materiales mantiene la mayor temperatura por mayor tiempo, midiendo cada 10 minutos la temperatura alcanzada después de exponerlas al sol.
3. *Tubo colector.* Para la selección del material del que estaría hecho el tubo colector se hicieron una serie de experimentos para diferentes materiales propuestos, los cuales basados en la bibliografía son materiales fácil de adquirir y con características específicas para esta pieza, que forma parte del secador solar, siendo cobre, PVC y tubo galvanizado. El procedimiento de selección consistió en que a cada tubo de diferente material y un largo de 65 cm se adaptó un ventilador en el extremo, estos tubos fueron colocados al sol en un horario de medio día para determinar cuál era mejor absorbiendo el calor. Se tomaron lecturas en un lapso de tiempo de 10 minutos con un termómetro de 150°C.
4. *Color de la tubería.* Se debe evitar la reflectancia de los rayos del sol en su superficie, lo cual se lograría mediante la aplicación de un color oscuro logrando así la absorbancia de los rayos solares.

Sin embargo para corroborar lo anteriormente escrito y citado de la bibliografía, se realizaron pruebas para saber qué color absorbe más, si el blanco, negro o el del material sin pintar y así confirmar que el color oscuro es el más eficiente para nuestro colector, haciendo exactamente la prueba anterior utilizando una tabla de temperaturas.

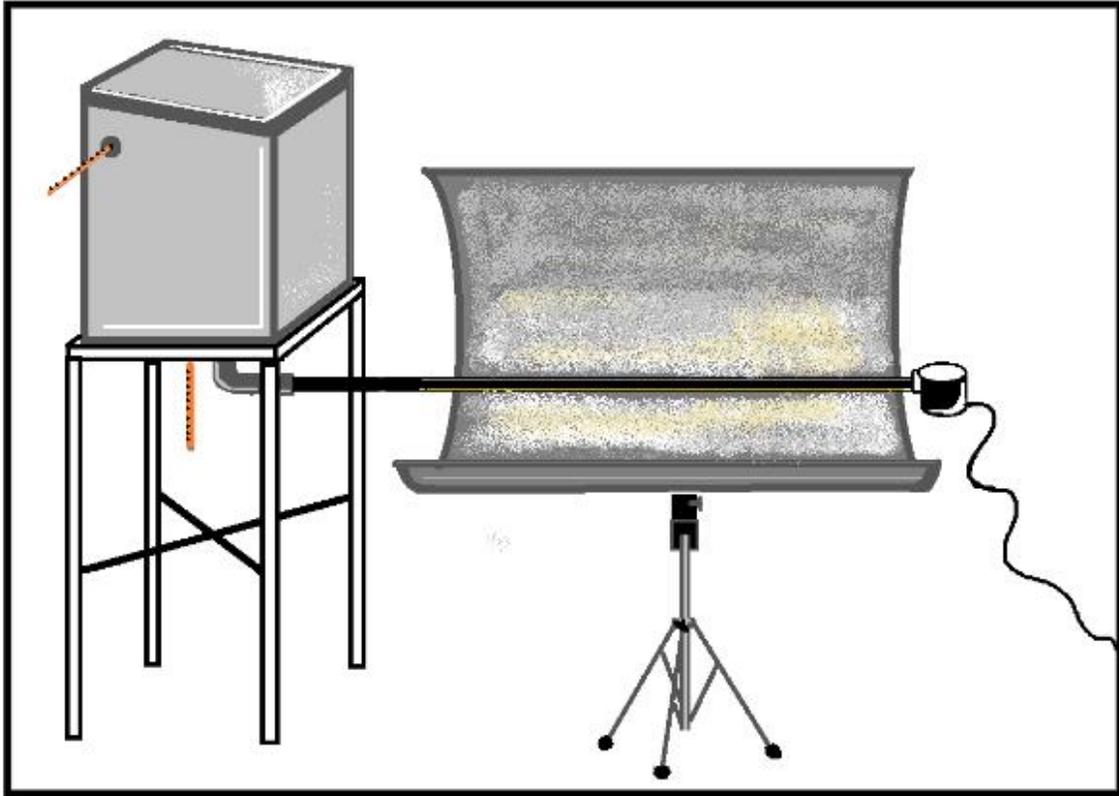


Figura 9. Diseño del secador solar parabólico.

Al terminar la construcción del secador (Figura 9), el siguiente paso fue el secado de fruta en el secador solar parabólico y un secador de charolas, para realizar la comparación entre las variables de proceso en cada equipo.

2.2.2. Objetivo particular 2

Antes de iniciar el proceso de deshidratación, la muestra fue sometida a un pre-tratamiento con una mezcla de antioxidantes (ácido cítrico 0.5% y ácido ascórbico 1%) para disminuir el pardeamiento enzimático de las rodajas de manzana durante el periodo de deshidratación.

Ésta decisión fue tomada en base a lo consultado en la bibliografía, optando por la mezcla de antioxidantes en esas cantidades que se usaron anteriormente en diversos frutos por Kuskoski, E. y col. en el 2005.

2.2.2.1 Proceso de deshidratación en secador de charolas

En la Figura 10 se presenta el diagrama de proceso para el secado de manzana.

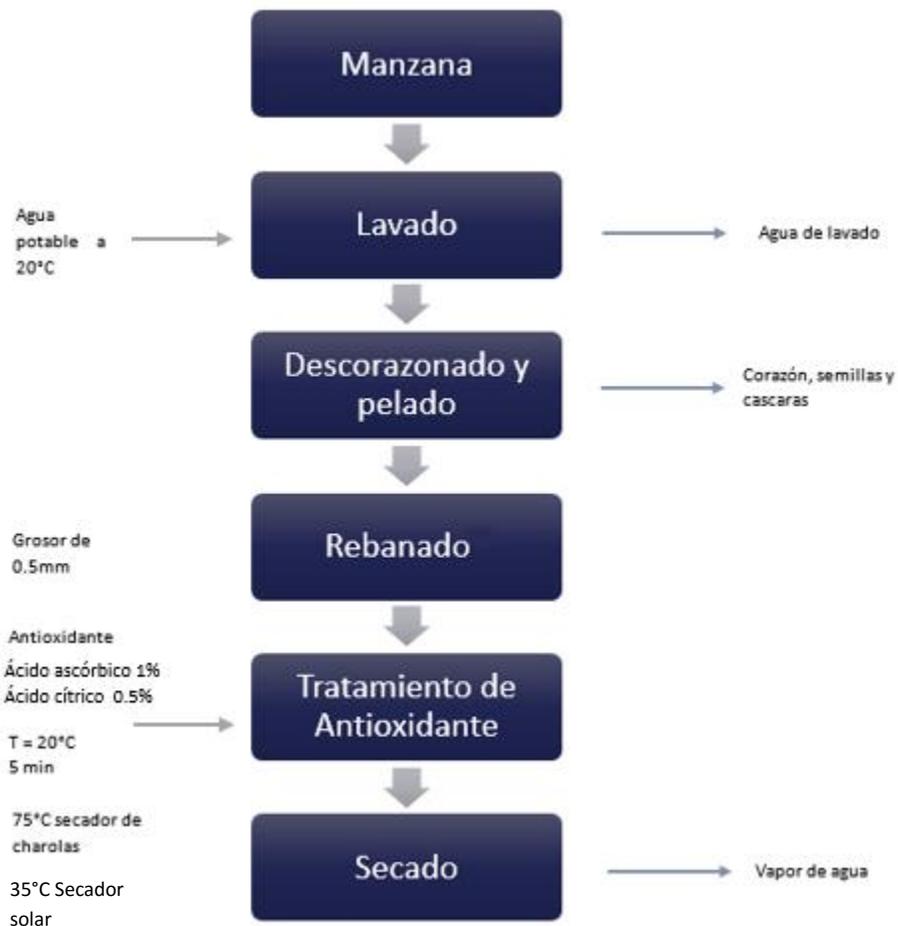


Figura 10. Diagrama de bloques del proceso de secado de manzana.

La humedad fue obtenida mediante termobalanza marca GHAUS, a 100°C / A90, el dato se utilizó para conocer la humedad en la manzana y por ende, el porcentaje de sólidos que ésta contiene para así conocer el peso de los sólidos secos de nuestra muestra a deshidratar. Los resultados del análisis pueden ser indicados en peso o porcentaje, el valor aparece directamente en la pantalla del equipo.

Una vez establecida la humedad del alimento (manzana), los datos registrados durante la experimentación se introdujeron en el Cuadro 3:

Cuadro 3. <i>Ejemplo del registro de datos, objetivo particular 2.</i>	
Tiempo [min]	Experimental

Charola c/muestra [g]	Experimental
Tbs [°C]	Experimental
Tbh [°C]	Experimental
Muestra [g]	Experimental
X [%]	$X_i = \frac{W_i - W_t}{W_i \times Heq} \times 100$
Ht [kgH ₂ O/kgss]	$Ht = \frac{W_t - W_{ss}}{W_{ss}}$
HI [kgH ₂ O/kgss]	$Hl = Ht - Heq$

En el caso del secado de sólidos, durante la operación sólo se retira humedad (y una cantidad despreciable de sólidos) por lo que la humedad porcentual se obtuvo posteriormente por la ecuación 3.1 para detener el proceso a 9% de humedad, aproximadamente.

$$X_i = \frac{W_i - W_t}{W_i \times Heq} \times 100 \quad \text{Ecuación (2.1)}$$

X_i Pérdida de humedad (%)

W_i Peso inicial del alimento (Kg)

W_t Peso del alimento a diferentes tiempos (Kg)

Heq Humedad de equilibrio (KgH₂O/Kgss)

La humedad en base seca (Ht) se obtuvo mediante la ecuación 3.2

$$Ht = \frac{W_t - W_{ss}}{W_{ss}} \quad \text{Ecuación (2.2)}$$

W_t Peso del alimento a diferentes tiempos (Kg)

W_{ss} Peso del solido seco (Kg)

La humedad libre (HI) se obtuvo mediante la ecuación 3.3

$$Hl = Ht - Heq \quad \text{Ecuación (2.3)}$$

Ht Humedad del alimento a diferentes tiempos (kgH₂O/kgss)

Heq Humedad de equilibrio (kgH₂O/kgss)

Para la humedad de equilibrio (Heq), se realizó una adecuación durante la experimentación dado que mediante el método de Oswin los resultados variaban mucho debido a que la actividad de agua (Aw) no permanece constante durante la experimentación, por lo que se optó por la búsqueda

bibliográfica de artículos que representaran las curvas de humedad de equilibrio contra humedad relativa (dato que si permanece constante durante la experimentación) y se encontró la gráfica mostrada en la Figura 11 (Kaya, et al., 2007) la cual contiene la humedad de equilibrio de manzana a 35°C, 45°C y 55°C.

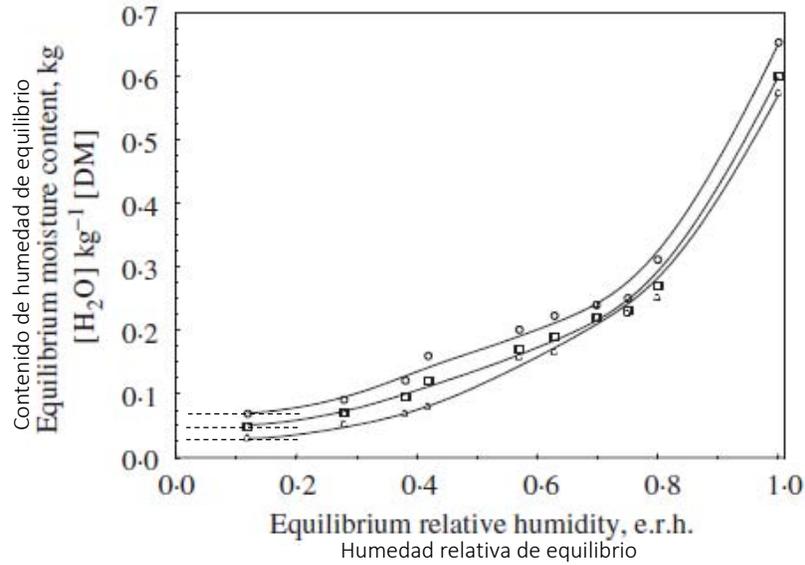


Figura 11. Isotermas de sorción para rodajas de manzana a diferentes temperaturas T=35°C; T=45°C y T=55°C

La humedad relativa se obtuvo de la página web “Puyuspa, La Calculadora Psicométrica en la Web” (<http://psicro.org/psicrocalc.html>) a las condiciones de Tbs, Tbh y una altura sobre el nivel del mar de Cuautitlán Izcalli (2260 MSN). La humedad relativa de la zona antes mencionada se muestra a continuación:

HR a 75°C = 0.096 %

Por lo que los datos de humedad de equilibrio a cualquier temperatura son constantes, suponiendo que las curvas a partir del punto final siguen una tendencia lineal y horizontal al eje de las abscisas como muestran las líneas punteadas en la Figura 11.

El dato de humedad de equilibrio se extrapolaron a partir de los que se obtuvieron a las temperaturas mostradas en la Figura 19, resultando el siguiente dato:

Heq a 75°C = 0.025 KgH₂O/Kgss

Se realizó la gráfica de HI contra tiempo como se muestra en la Figura 12:

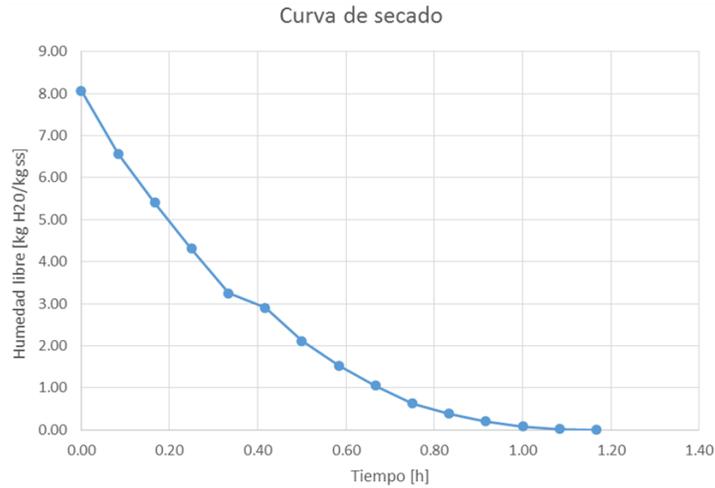


Figura 12. Curva de secado representativa (elaboración propia).

Cálculo del coeficiente de difusión. Partiendo de la de Fick $\left(\frac{\partial C}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}\right)$, se aplica para una placa infinita obteniendo la siguiente ecuación:

$$M_R = \frac{M - M_C}{M_0 - M_C} = \frac{8}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n + 1)^2} \exp\left[-\frac{(2n + 1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right] \quad \text{Ecuación (2.4)}$$

M_R : Humedad total [=] kg agua/kg ss

M : Contenido de humedad [=] kg de agua/kg de sólido seco, base seca

M_C : Contenido de humedad de equilibrio [=] kg de agua/kg de sólido seco, base seca

M_0 : Contenido de humedad inicial [=] kg de agua/kg de sólido seco, base seca

D_{eff} : Difusividad efectiva [=] m²/s

L : Espesor de la placa [=] m

t : Tiempo [=] s

Simplificando y linealizando la ecuación se obtiene $\ln \frac{M}{M_0} = \ln \frac{8}{\pi} - \left[\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right]$. Se grafican los datos experimentales en términos de \ln (humedad total) vs. Tiempo.

Los valores se ajustan a una línea recta de cuya pendiente se obtiene y despeja el coeficiente de difusión:

$$m = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad \text{Ecuación (2.5)}$$

2.2.3. Objetivo particular 3

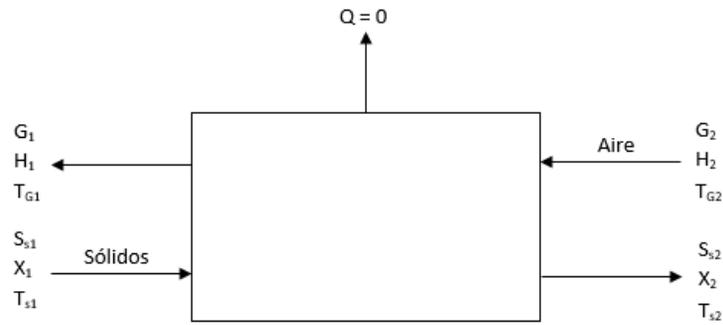


Figura 13. Balance de materia y energía (elaboración propia).

En la Figura 13 se muestra un diagrama de flujo para un secador. El sólido entra con un flujo S_s masa sólido seco/tiempo, se seca de X_1 a X_2 masa humedad/masa sólido seco y sufre un cambio de temperatura de T_{s1} a T_{s2} . El aire o gas fluye con una rapidez G masa aire seco/tiempo y sufre un cambio de humedad de H_2 a H_1 masa humedad/masa aire seco y un cambio de temperatura T_{G2} a T_{G1} . Entonces, el balance de humedad que se usara en el objetivo particular 3 es:

$$S_{s1} X_1 + G_{s2} H_2 = S_{s2} X_2 + G_{s1} H_1$$

$$S_s (X_1 - X_2) = G_s (H_1 - H_2) \quad \text{Ecuación (2.6)}$$

El balance de energía para el secador es:

$$GH'_{G2} + S_s H'_{s1} = GH'_{G1} + S_s H'_{s2} + Q \quad \text{Ecuación (2.7)}$$

2.2.4. Objetivo particular 4

2.2.4.1 Cambios estructurales ocasionados por el proceso de deshidratación

La técnica empleada para las observaciones microscópicas fue "Microscopia electrónica de transición" usando un microscopio óptico que está acoplado a una cámara externa (Nikon COOLPIX S2500), para capturar las imágenes y posteriormente analizarlas con el Software ImageJ. Este software permite el conteo de áreas específicas a partir de las imágenes obtenidas por MET (Microscopia Electrónica de Transición).

El objetivo es observar la variación de la estructura de los poros con respecto a los diferentes procesos a los que se sometió la manzana Red Delicious; en éste caso, el área se considera el parámetro de mayor importancia debido a que a través de sus valores se aprecia mejor el cambio que ocurre con las rodajas de manzana entre un equipo y otro.

Microscopia óptica de 100x

Equipo: microscopio óptico.

Fundamento: se genera un rayo de luz que incide sobre una muestra de manera que es posible observar parte de una muestra y obtener una imagen aumentada de la misma (Ubero, P. 2004).

Tratamiento de datos: utilizar el programa ImageJ, para procesar la imagen.

Muestreo: la imagen se ajusta a una dimensión de 256×256 puntos (8 bits).

Para poder tener un parámetro de medición se hizo antes de ello a una escala microscópica a 10x de aumento en el microscopio y con ayuda del programa ImageJ en la escala se hizo una conversión de pixeles a micras (Figura 14).

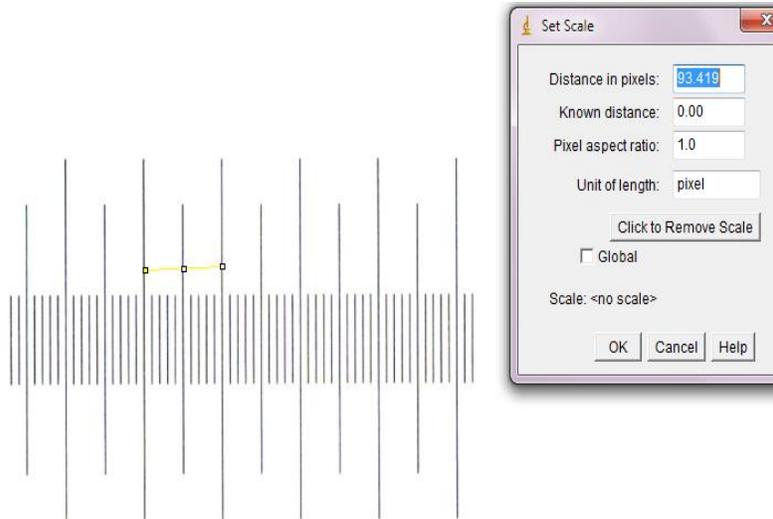


Figura 14. Escala conversión de pixeles (Programa ImageJ).

Mediante este procedimiento establecemos como base que 1 micra es igual a 93.419 pixeles. Se seleccionan diferentes sectores de la imagen para hacer la medición de tamaños de las áreas de los poros similares (diez mediciones).

Actividad de agua (Aw)

La actividad de agua se obtuvo haciendo uso un Higrometro marca AquaLab y se tomaron muestras desde los primeros 20 minutos hasta los 80 minutos en el secador de charolas y solar parabólico.

2.2.5. Objetivo Particular 5

2.2.5.1 Colorimetría

Equipo: Colorímetro

- Marca: MINOLTA
- Modelo: CR-300

Fundamento: posee una fuente de emisión de radiación infra-roja que incide sobre la superficie de la muestra, donde se absorbe cierta cantidad y la radiación reflejada es cuantificada por el instrumento, en una escala relativa, definida por elementos de referencia.

Tratamiento de datos: registrar cada uno de los valores registrados por el colorímetro en el Cuadro 4 que representa la interpretación y las escalas de la luz.

Cuadro 4. <i>Interpretación y escalas de luz (Ortiz, A. 2003).</i>		
Parámetro	Interpretación	Escala
L	Designa brillantez o luminosidad	100 = blanco 0 = negro
A	Indica que tan rojo o verde es el alimento	Positivo = rojo Negativo = verde
B	Indica que tan amarillo o azul es el alimento	Positivo = amarillo Negativo = azul

Valor o brillo (value): para poder evaluar la diferencia entre dos colores, en primer lugar, tendremos que medir ambas muestras con un colorímetro Minolta CR-300, y en coordenadas Lab, se tomará tres muestras cada diez minutos hasta el término del proceso de secado. Una vez que tengamos las dos lecturas podremos calcular la diferencia de color o Delta E (ΔE).

El Delta (Δ)E nos indicara la igualdad entre dos muestras. Para calcular el Delta E se utilizó la siguiente ecuación:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad \text{Ecuación (2.8)}$$

Siendo:

(ΔL) L muestra – Lreferencia

(ΔL) a muestra – a referencia

(ΔL) b muestra – b referencia

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Objetivo particular 1

3.1.1. Construcción del secador

3.1.1.1 Parábola

Luego de haber realizado las pruebas expuestas en la sección 3.1 se obtuvo que las temperaturas alcanzadas fueron: 34.12 °C para aluminio y 37.80 °C para acero tipo espejo, por lo cual se utilizó el material de acero inoxidable tipo espejo, éste acabado favorece la reflectancia de los rayos solares al punto focal a comparación del aluminio, también siendo más resistente a la manipulación, por otra parte el espesor de la lámina de acero inoxidable constituye un parámetro de control, ya que el grosor que se utilice debe ser bien aprovechado para las condiciones de la operación específica, por lo cual al visitar un establecimiento de venta de acero inoxidable, ubicado en Tepotztlán, Estado de México, de entre varios grosores del material, se decidió utilizar el calibre de 18”, ya que presenta una firmeza adecuada para no modificarse al exponerla al sol o vientos. Dicha placa de acero presenta un reflejo tipo “espejo” que permite aprovechar en mayor cantidad los rayos del sol.

Se realizó el cálculo del ángulo adecuado de la parábola de acero inoxidable, para el posicionamiento del tubo concentrador en el punto focal. Con la información necesaria (diámetro de 50cm y profundidad de 15cm) se utilizó el programa de software: “Parábola Calculator 2.0” (Figura 15), y se muestra a continuación el esquema de la parábola.

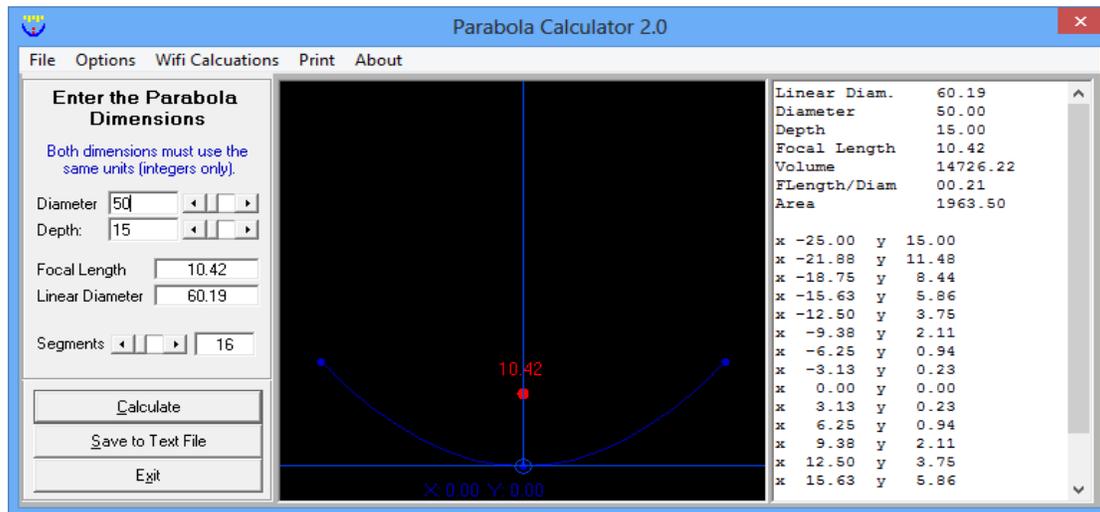


Figura 15. Representación de los rayos del sol hacia los focos de la parábola usando el programa Parábola Calculator 2.0.

La profundidad no solamente fue establecida gracias a los datos arrojados por el programa anteriormente citado, sino también porque el acero inoxidable no resistiría demasiada deformación. Éste programa permitió saber el punto exacto de ubicación para el tubo colector (con el fin de aprovechar al máximo el reflejo de los rayos solares sobre la parábola y que estos incidan en el tubo), en éste caso se sitúa a una altura de 10.42cm desde la base de la parábola y el cual de

manera experimental se puede visualizar mediante un haz de luz que incide sobre el tubo colector como se muestra en el reflejo del tubo en la parábola de la Figura 16.

Los datos para la elaboración de la parábola fueron los siguientes (obtenidos con el programa "Parabola Calculator 2.0"):

Diámetro: 50cm

Punto Focal: 10.42cm de distancia

Profundidad: 15cm

Diámetro lineal: 60.19cm

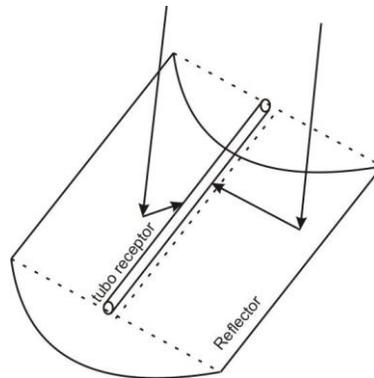


Figura 16. Tubo de cobre color negro, colocado sobre el foco de la parábola.

Para la realización de la parábola se procedió a la compra de la lámina de acero inoxidable 18" y posteriormente como se muestra en la Figura 17 se recortó en una cortadora para obtener la lámina con las siguientes medidas: ancho: 60.2cm y largo: 65cm.



Figura 17. Corte de la lámina empleada para la realización de parábola.

Mediante la utilización de un torno se procedió a darle el ángulo a la parábola, para obtener la profundidad establecida anteriormente (15cm), como se muestra en la Figura 18:



Figura 18. Parábola con profundidad de 15cm.

En la parte inferior de la parábola se hicieron unas viséras para detener por medio de un tubo la parábola a la base. Respecto a la base de la parábola se eligió un tripie de acero inoxidable armable (Figura 19), con movimiento a base de mariposas. Su funcionamiento hace mover al tubo de tal forma que mueve a la parábola completa al ángulo de inclinación que uno desee poner, de modo que se logre hacer un giro cada hora y que los rayos del sol siempre den en el punto focal.



Figura 19. Base de la parábola y parábola con la base armada.

3.1.1.2. Cámara de secado

En la Figura 20 se muestra la evolución de las temperaturas de los materiales de construcción para la cámara de secado del secador solar, en función del tiempo.

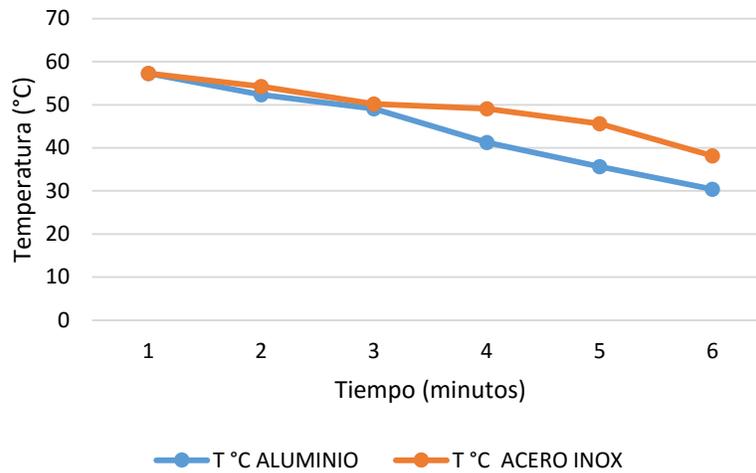


Figura 20. Comparación de temperaturas alcanzadas con dos tipos de materiales para construcción de cámara de secado.

Como conclusión se puede decir que el uso de acero inoxidable presenta mayores ventajas, ya que además de ser un buen material que se utiliza en la industria alimentaria al presentar características como una elevada resistencia a la corrosión, no aporta partículas por desprendimientos y tiene una óptima capacidad de limpieza; en consecuencia un elevado grado de eliminación de bacterias para la higiene del alimento. Además también concentra la temperatura y la mantiene por mayor tiempo, permitiendo así una mayor eficiencia en el proceso de secado.

Respecto a la construcción de la cámara, el diseño de las dimensiones fue específicas para un secador de tamaño ideal y promedio para la manipulación dentro del lugar de trabajo en un laboratorio, así como su entrada y salida del mismo. La Figura 21 muestra las dimensiones de la cámara:

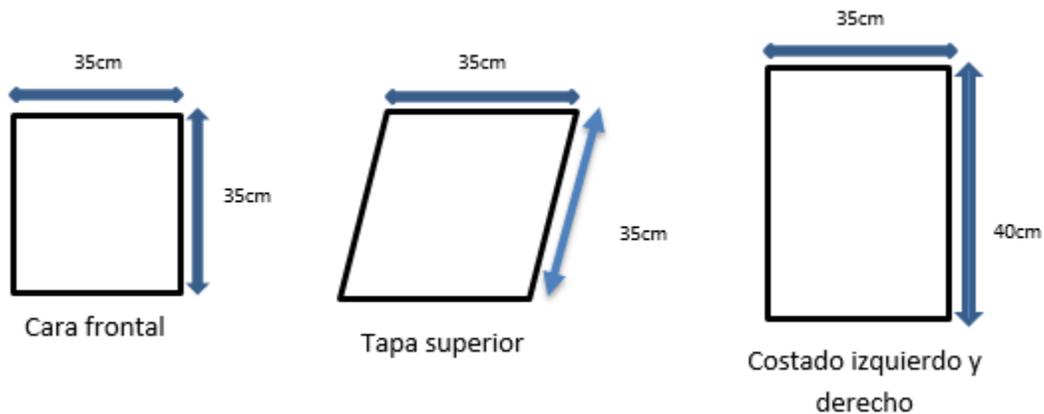


Figura 21. Dimensiones de la cámara de secado.

Las líneas rojas que se observan en la Figura 22 muestran la distancia entre la rejilla 1 y la rejilla 2. Mientras que en la Figura 23 se muestra la construcción de rieles para que se pueda deslizar la rejilla.

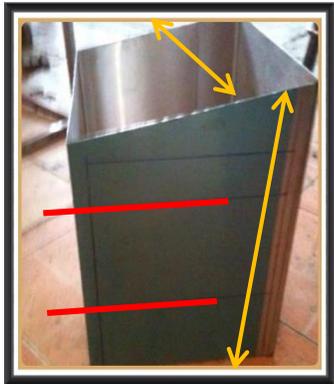


Figura 22. Cámara de secado. Parte trasera de 40cm x 35cm



Figura 23. Fabricación de los rieles para la colocación de rejillas.

Para la colocación del tubo colector (Figura 24), se hizo en la parte inferior un orificio, y con ayuda de soldadura se construyó una conexión con un tubo de acero inoxidable en forma de L para así unir la cámara de secado con el tubo colector.



Figura 24. Conexión de cámara de secado con tubo colector mediante codo de acero inoxidable.

El diseño de la puerta para la entrada y salida de rejillas se hizo de modo que fuera corrediza abriendo hacia arriba, para la fácil manipulación y que si solamente fuera necesario sacar una rejilla se pudiera abrir hasta cierta altura, y así disminuir la entrada de aire y polvo al siguiente nivel. Posteriormente se hizo el armado y la colocación con dos niveles para un par rejillas donde se colocara el producto a secar, como se muestra en la Figura 25:



Figura 25. Vista delantera de puerta y rejillas para la entrada de producto.

La base de la cámara de secado se diseñó teniendo en cuenta que debía ser resistente al peso, así como fácil y cómodo de trasladar. En la Figura 26 se muestra la base del secador.



Figura 26. Base para la cámara de secado.

Para lograr que el aire caliente viaje por medio del tubo colector se utilizó una bomba de aire (12V) conectada a la electricidad, la cual generaba una velocidad entre 2 m/s a 3 m/s, aproximadamente.

Finalmente se hizo el armado completo de todas las piezas al aire libre para verificar su correcto funcionamiento, como se muestra en la Figura 27.



Figura 27. Secador solar parabólico.

3.1.1.3. Tubo colector

En la Figura 28 se presentan los resultados obtenidos para cada material de construcción luego de haber realizado las pruebas experimentales.

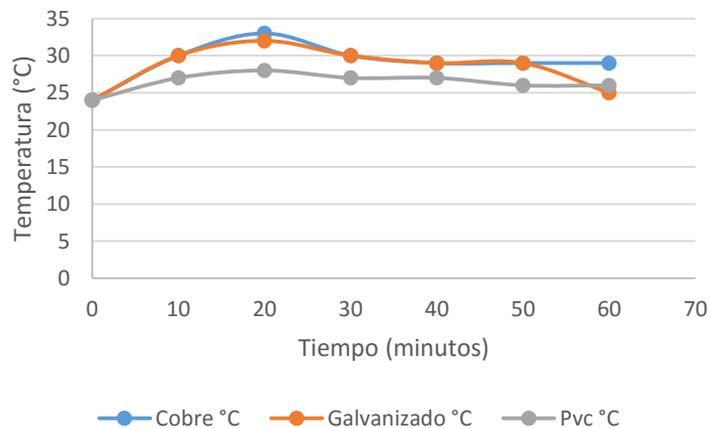


Figura 28. Comparación de temperaturas alcanzadas con dos tipos de materiales para construcción de tubo colector.

Como resultado se determinó que el tubo más eficiente fue el de cobre con una diferencia notable de temperatura comparada con los tubos PVC y mostrando temperaturas ligeramente mayores respecto al acero galvanizado. Por ende se utilizó cobre para el tubo colector.

3.1.1.4. Color de la tubería

En la Figura 29 se muestran los resultados obtenidos experimentalmente en donde se observa que el tubo pintado de color negro fue el que absorbió la temperatura a diferencia de los otros dos

tubos: sin pintar y con pintura blanca; lo cual confirmó que el color negro es ideal para nuestro tubo colector (como lo dictaba la bibliografía), ayudándonos a absorber los rayos que se reflejen en la parábola.

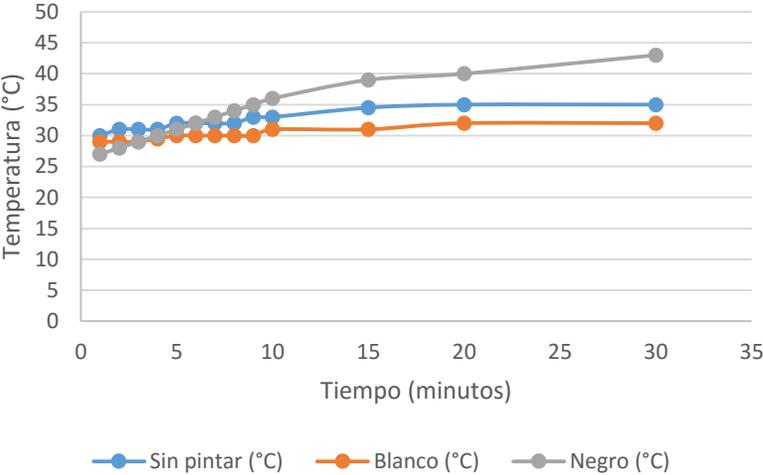


Figura 29. Comparación de temperaturas alcanzadas con diferente color en la tubería.

Cuando el secador opera, la radiación entra a través de la parábola de acero inoxidable haciendo reflectancia al tubo colector y es absorbida en este mismo, elevando la temperatura del aire en su interior, lo que produce que esta ascienda por convección forzada, pasando a través de las charolas. El aire húmedo sale finalmente del secador a través de la chimenea ubicada en el extremo superior de la cámara de secado y así se establece un flujo continuo del aire, variando el tamaño de los respiraderos y velocidad del aire se puede regular el flujo del aire.



Figura 30. Secador solar parabólico puesto en marcha.

3.2. Objetivo Particular 2

3.2.1 Curvas de secado en secador de charolas y secador solar parabólico

El análisis de las curvas de secado se realizó comparando el secador de charolas a una temperatura de trabajo específico de 75°C y el secador solar parabólico con la máxima temperatura que alcanzó, la cual fue de 35°C.

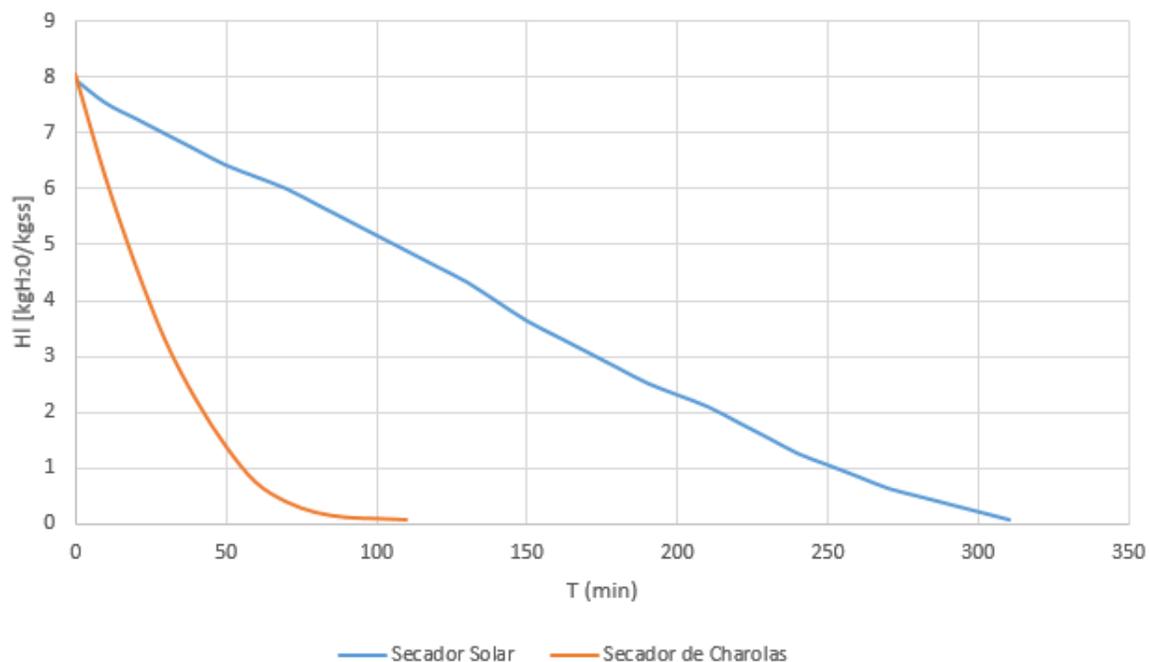


Figura 31. Curvas de secado comparativas del secador de charolas y el secador solar parabólico.

Como se muestra en la Figura 31, ambas curvas de secado muestran que la pérdida de humedad se dio más rápido al inicio del proceso, cuando el flujo de aire evaporaba fácilmente el agua de la superficie de la manzana. Este proceso es más notorio en el caso del secador de charolas.

En condiciones favorables, la mayoría de verduras y hortalizas se deshidratan en 8 a 15 horas con un secado solar natural (SAGARPA, 1998), esto indica que la velocidad de flujo es un factor importante para disminuir el tiempo de secado. Los resultados obtenidos muestran que el tiempo de permanencia en el secador solar parabólico fue de poco más de 5 horas, lo cual está por debajo de lo reportado bibliográficamente, demostrando así su eficiencia. Sin embargo, en contraste con el tiempo de permanencia del producto en el secador de charolas la diferencia es casi el triple de horas, mucho más de lo que se previó en un principio (se esperaba que tardara el doble). Podemos decir entonces que el secado solar es una opción válida cuando se dispone de tiempos suficientes para el secado, hasta 1-2 días.

3.2.2. Curvas de velocidad de secado en secador de charolas y secador solar parabólico

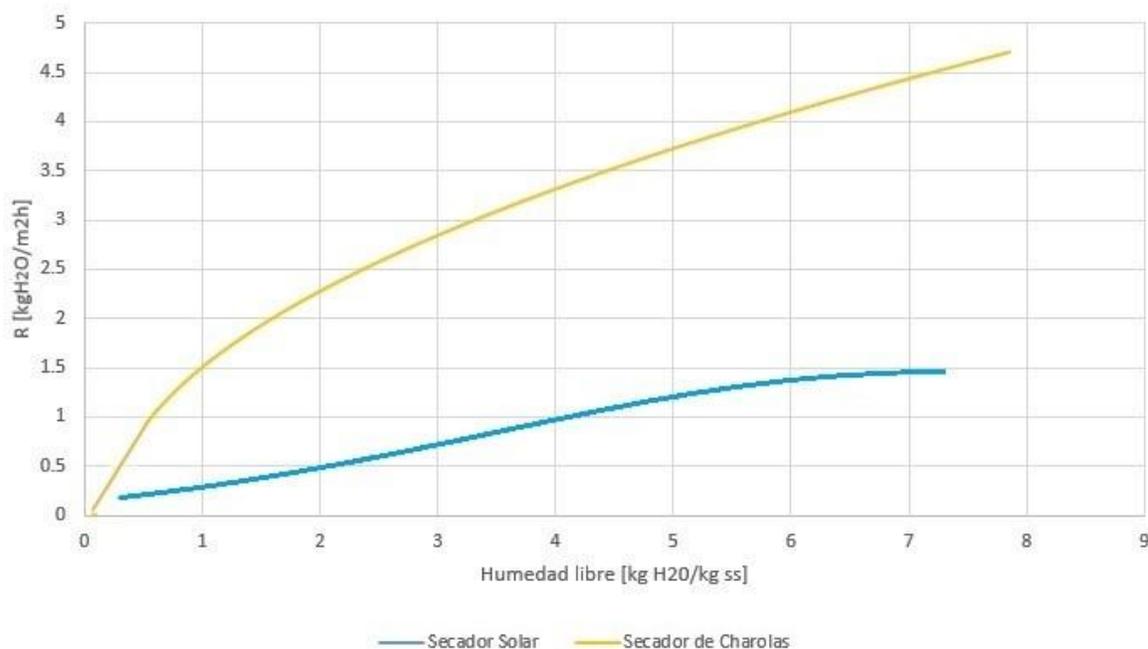


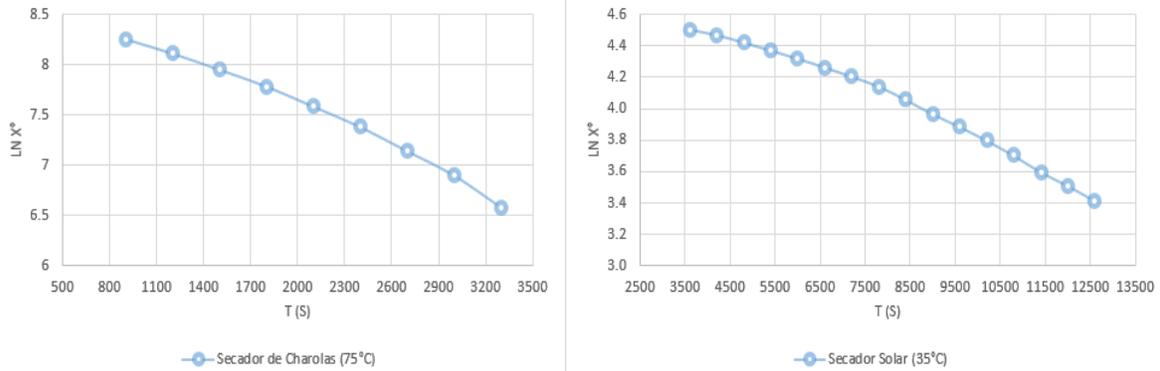
Figura 32. Curvas de velocidad de secado comparativas del secador de charolas y el secador solar parabólico.

La Figura 32 muestra la tendencia del comportamiento característico de la velocidad de secado; para el secador solar parabólico, durante las primeras horas el producto pierde humedad libre a una velocidad casi constante.

En ambas curvas existe una disminución de la velocidad de secado hacia el final del proceso debido a una reducción de la superficie efectiva de transferencia atribuida al encogimiento del producto. Hawlader (2000), menciona que este comportamiento es debido a que no llega a existir una película de agua en la superficie del producto debido a la rapidez del secado y por lo tanto el agua se desplaza a la superficie desde el interior de la muestra, evaporándose casi inmediatamente. Ahmed (2001), describe un comportamiento similar de las curvas de velocidad en la deshidratación de chile a 60°C en estufas convencionales.

Con respecto a la velocidad de secado en relación al contenido de humedad libre, la velocidad de secado igualmente es superior en el secador de charolas que en el secador solar, y aunque se puede observar en las curvas graficadas que el comportamiento de secado es uniforme cabe recalcar que la diferencia de tiempos y velocidad de secado se vio afectado también por las condiciones que se podían controlar en un secador y en el otro no (siendo la más relevante la condición climatológica para el caso del secador solar), la cantidad de flujo de aire utilizado en cada secador ya que en el secador de charolas la comparación del flujo de aire que entraba al secador solar era demasiado grande y por ende este tenía mayores posibilidades de llegar en un tiempo determinado al porcentaje de humedad deseada en la Manzana Red Delicious.

3.2.3. Coeficiente de difusión del secador de charolas y secador solar parabólico



Figuras 33 y 34. Logaritmo natural de la relación de humedad con respecto al tiempo en secador de charolas y solar parabólico.

En la Figura 33 y 34 se trazaron las gráficas de la variación del logaritmo natural de la humedad total con respecto al tiempo, en el secador de charolas y solar parabólico. A partir de estas gráficas se puede deducir que el secador de charolas es quien presenta la velocidad de secado con mayor rapidez. A partir de los valores de la pendiente se utilizan para determinar los valores del coeficiente de difusión efectiva.

Este coeficiente es un parámetro que caracteriza la pérdida de humedad durante el periodo de secado de velocidad constante, y se relaciona con la migración de humedad tanto en estado líquido como vapor.

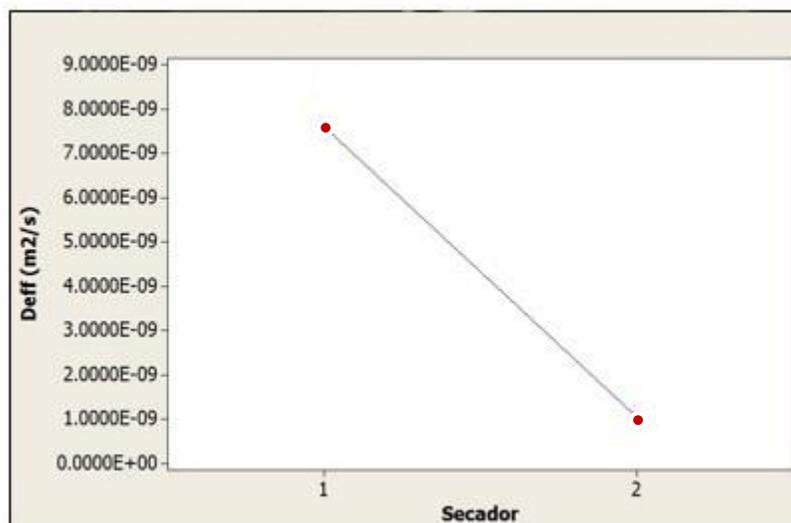


Figura 35. Análisis de ANOVA de valores individuales de Deff (m²/s) vs. Tipo de secador.

Se muestra en la Figura 35, como era de esperarse, que el secador solar (2) tuvo resultados inferiores de coeficiente de difusión comparado con el secador de charolas (1), esto es debido a que las

temperaturas que alcanza el secador solar son inferiores con respecto al segundo, y el coeficiente de difusión es dependiente de la temperatura.

Cuadro 5. <i>Resultados de difusividad efectiva.</i>	
Secador	Deff (m ² /s)
Charolas	6.7503 E-09
Solar parabólico	1.0247 E-09

No obstante, los resultados obtenidos (Cuadro 5) se mostraron próximos a los reportados por (Rodríguez et al., 2014) en estudio sobre la cinética de secado del anacardo en secador convectivo, en donde se reportan los valores de coeficientes de difusión en varias especies de frutas y verduras con altos contenidos de humedad con valores entre 9.59 E-09 y 1.69 E-08. Con esto podemos concluir que el secador solar parabólico arroja resultados óptimos y competitivos contra el secado usando otros tipos de secador.

3.2.4. Flujo de calor en secador de charolas y secador solar parabólico

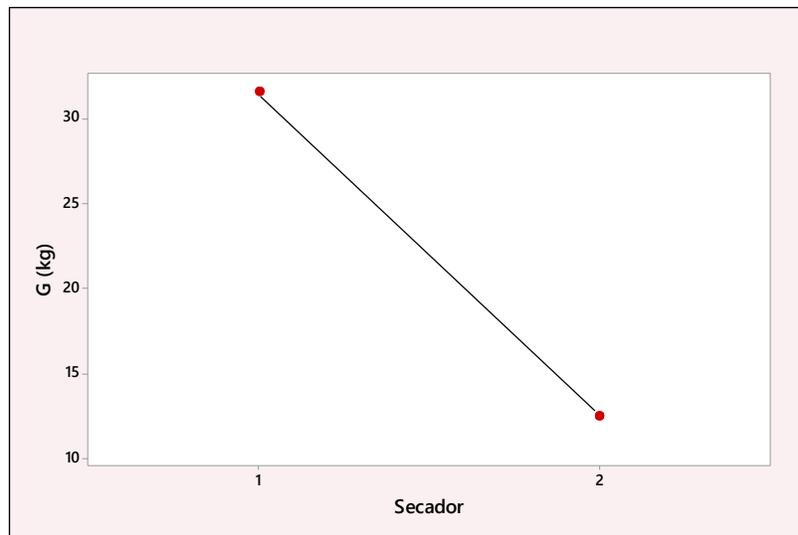


Figura 36. Análisis de ANOVA de valores individuales de G (kg) vs. Tipo de secador.

Como se puede observar en Figura 36, el secador solar (2), tuvo un menor flujo de aire que el secador de charolas, sin embargo, este operó durante un mayor tiempo en comparación con el secador de charolas, (el triple de tiempo).

Se puede decir, industrialmente, que si se requiere una operación rápida, lo ideal es usar el secador de charolas que aunque requiera mayor energía para llevar a cabo la operación, lo hace poco más de tres veces más rápido que el secador solar.

3.2.5. Eficiencia térmica en secador de charolas y secador solar parabólico

Se comparó la energía que requiere cada tipo de secador por metro cúbico a sus diferentes temperaturas de operación. En el caso del secador solar parabólico el calor requerido por 1m^2 fue de 678.0247kJ , mientras que en de charolas se requirió de $15,975.08\text{kJ}$ por cada metro cúbico.

En el caso del calor requerido por metro cuadrado, en la Figura 37 se muestra que el secador de charolas (1), necesita mayor cantidad de calor para secar 1m^2 de rodajas de manzana operando con un motor de 420 Voltios y 3 Amperes, el cual hace que el aire entre en el serpentín que consta de 48 tubos y 110 aletas por tubo, y en su interior entra el vapor sobrecalentado que calienta el aire; sin embargo, al operar durante menor tiempo que el secador solar parabólico, se puede decir que aunque necesite de mayor energía para operar, lo hace tres veces más rápido que el solar, el cual solo necesita de una bomba para operar, la misma funciona con 2.5 Amperes y 12 Voltios.

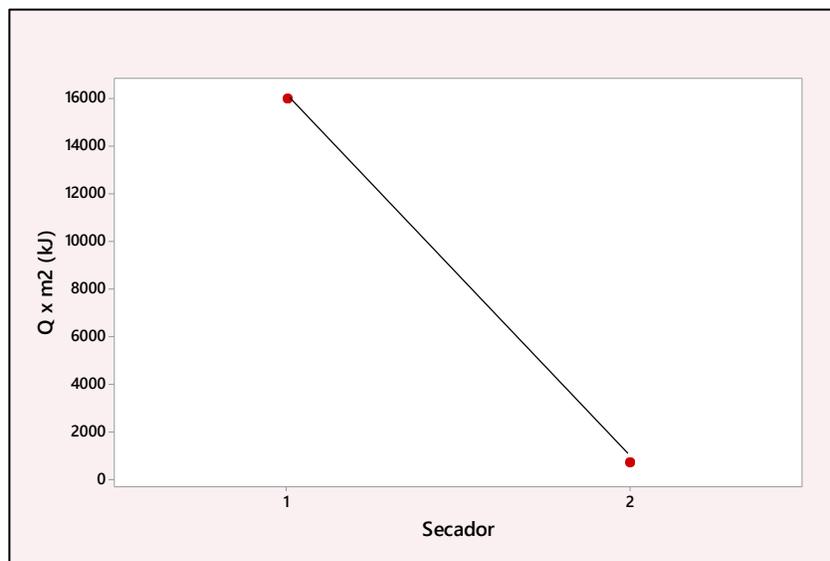


Figura 37. Análisis de ANOVA de valores individuales de $Q \times \text{m}^2$ (kJ) vs. Tipo de secador.

Un proceso de secado es óptimo cuando el tiempo en el que se lleva a cabo es el mínimo, utilizando un mínimo de energía, lo cual está estrechamente relacionado con la eficiencia del secador empleado. En el caso del secador solar los resultados indican que se requiere de una menor cantidad de calor por área, sin embargo cuando tiempo de secado se reduce la eficiencia aumenta y los periodos de permanencia del producto en este secador son muy largos en comparación del secador de charolas, por lo cual utilizar menor cantidad de energía no resulta tan útil y eficaz para la operación si se cuenta con poco tiempo para llevar a cabo la deshidratación.

3.2.6. Consumo de energía de la operación

En el Cuadro 6 se observa que la energía gastada en el secador de charolas es mayor que la requerida para el proceso de secado en el secador solar parabólico, esto se ve reflejado en gastos de consumo energético.

Cuadro 6. <i>Resultados de consumo de energía de operación.</i>				
Equipo de secado	Consumo de energía en Voltios (V)	Tiempo de operación de secado (hr)	Consumo de energía en Vatios (W)	Consumo de energía por corrida (Wh)
Charolas	420	1.33	252	335.16
Solar parabólico	12	5.16	7.2	37.152

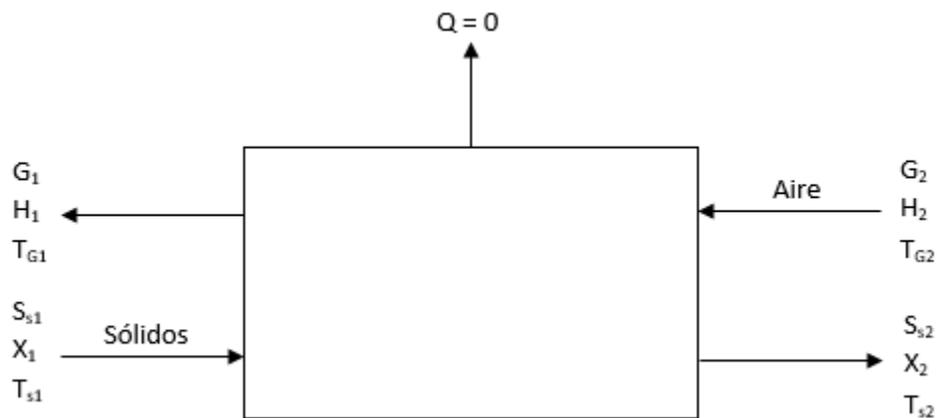
El secador de charolas gasta 335.16Wh por corrida, es decir durante un tiempo de 1.33h. Esto quiere decir que gastara si está en funcionamiento por una hora continua 252W. El secador solar parabólico consume 37.152Wh, pero a diferencia del tiempo en el secador de charolas este equipo necesito 5.16h para llegar a secar las rodajas de manzana a niveles de humedad similares a los obtenidos en el primer equipo mencionado; dando como resultado que necesito un consumo de 7.2W por hora.

Analizando estos datos existe una diferencia significativa en el costo de consumo energético, sin embargo tanto el tiempo de secado como la cantidad de producto obtenido por corrida siguen siendo mayores en el secador de charolas. Esto podría contrarrestar el gasto energético ya que se obtiene mayor cantidad de producto por hora que en el solar parabólico, a pesar de que este sea más ahorrativo en lo referente al consumo energético.

3.3. Objetivo Particular 3

3.3.1 Balances de materia y energía

a) Secador de charolas



Donde:

S_s es la entrada (1) y salida (2) del flujo.

X es la humedad total a la entrada (1) y salida (2).

T_s es la temperatura del sólido a la entrada (1) y la salida (2).

G es la entrada (1) y salida (2) del flujo de aire.

H es la humedad del aire a la entrada (1) y la salida (2).

T_G es la temperatura del aire a la entrada (1) y la salida (2).

Datos para balance de energía del secador de charolas.			
Aire		Sólidos	
Entrada	Salida	Entrada	Salida
G_2 $H_2 = 0.010 \text{ kgH}_2\text{O}/\text{kg a seco}$ $T_{G2} = 70^\circ\text{C}$ $\lambda = 2501 \text{ kJ}/\text{kg}$	G_1 H_1 $T_{G1} = 36^\circ\text{C}$	$S_{s1} = 0.2685 \text{ kg}$ $X_1 = 5.25 \text{ kgH}_2\text{O}/\text{kg s seco}$ $T_{s1} = 25^\circ\text{C}$ $C_p = 3.73 \text{ kJ}/\text{kg } ^\circ\text{K}$	$S_{s2} = 0.031 \text{ kg}$ $X_2 = 0.11 \text{ kgH}_2\text{O}/\text{kg s seco}$ $T_{s2} = 62^\circ\text{C}$

Balance de materia con respecto a la humedad:

$$S_{s1} X_1 + G_{s2} H_2 = S_{s2} X_2 + G_{s1} H_1$$

$$S_s (X_1 - X_2) = G_s (H_1 - H_2)$$

Para obtener S_s :

$$S_s = 0.2685 (1 - 0.11) = 0.2389 \text{ kg s.seco}/\text{h}$$

Sustituyendo valores en el balance de materia:

$$0.2389 (5.25 - 0.11) = G_s (H_1 - 0.010)$$

Balance de energía para el secador es:

$$GH'_{G2} + S_s H'_{s1} = GH'_{G1} + S_s H'_{s2} + Q$$

Se calcula la entalpía del gas de entrada H'_{G2}

$$C_s = 1.005 + 1.88 (H_2)$$

$$C_s = 1.005 + 1.88 (0.010) = 1.0238$$

$$H'_{G2} = C_s (T_{G2} - T_0) + H_2 \lambda$$

$$H'_{G2} = 1.0238 (70) + 0.010 (2501)$$

$$H'_{G2} = 96.676 \text{ KJ/kg a.seco}$$

Se calcula la entalpía del gas a la salida H'_{G1}

$$C_s = 1.005 + 1.88 (H_1)$$

$$H'_{G1} = C_s (T_{G1} - T_0) + H_1 \lambda$$

$$H'_{G1} = (1.005 + 1.88 H_1) (36) + H_1 (2501)$$

$$H'_{G1} = 36.18 + 2567 H_1$$

Se calcula entalpías de sólidos:

$$H'_{s1} = C_{p \text{ sólido}} (T_{s1} - T_0) + X_1 C_{p \text{ humedad}} (T_{s1} - T_0)$$

$$H'_{s1} = 3.73 (25) + 5.25 (4.187)(25) = 642.75 \text{ KJ/kg}$$

$$H'_{s2} = C_{p \text{ sólido}} (T_{s2} - T_0) + X_2 C_{p \text{ humedad}} (T_{s2} - T_0)$$

$$H'_{s2} = 3.73 (62) + 0.11 (4.187)(62) = 259.78 \text{ KJ/kg}$$

Sustituyendo en el balance de energía:

$$G (96.676) + 0.2685 (642.75) = G (36.18 + 2567 H_1) + 0.031 (259.78) + 0$$

El balance de materia:

$$0.2389 (5.25 - 0.11) = G_s (H_1 - 0.010)$$

Cuando se resuelven simultáneamente, se obtiene:

$$G_s = 31.5418 \text{ kg a.seco/h}$$

$$H_1 = 0.0392 \text{ kg H}_2\text{O/kg a.seco}$$

Calculando a Q:

$$Q = G_s C_s \Delta T = (31.5418) (1.0238) (28) = 904.1898 \text{ KJ}$$

$$\text{Donde } \Delta T = [(70-25) + (36-25)] / 2 = 28^\circ\text{C}$$

Si el área de secado es de 0.0566m^2 , entonces el calor requerido por 1m^2 es $15\ 975.0848 \text{ KJ}$

b) Secador solar parabólico

Datos para balance de energía del secador solar parabólico.			
Aire		Sólidos	
Entrada	Salida	Entrada	Salida
G_2 $H_2 = 0.010 \text{ kgH}_2\text{O}/\text{kg a seco}$ $T_{G2} = 35^\circ\text{C}$ $\lambda = 2501 \text{ kJ}/\text{kg}$	G_1 H_1 $T_{G1} = 21^\circ\text{C}$	$S_{s1} = 0.065 \text{ kg}$ $X_1 = 5.25 \text{ kgH}_2\text{O}/\text{kg s seco}$ $T_{s1} = 25^\circ\text{C}$ $C_p = 3.73 \text{ kJ}/\text{kg } ^\circ\text{K}$	$S_{s2} = 0.0085 \text{ kg}$ $X_2 = 0.11 \text{ kgH}_2\text{O}/\text{kg s seco}$ $T_{s2} = 27^\circ\text{C}$

Balance de materia con respecto a la humedad:

$$S_{s1} X_1 + G_{s2} H_2 = S_{s2} X_2 + G_{s1} H_1$$

$$S_s (X_1 - X_2) = G_s (H_1 - H_2)$$

Para obtener S_s :

$$S_s = 0.065 (1 - 0.11) = 0.0578 \text{ kg s.seco}/\text{h}$$

Sustituyendo valores en el balance de materia:

$$0.0578 (5.25 - 0.11) = G_s (H_1 - 0.010)$$

Balance de energía para el secador es:

$$GH'_{G2} + S_s H'_{s1} = GH'_{G1} + S_s H'_{s2} + Q$$

Se calcula la entalpía del gas de entrada H'_{G2}

$$C_s = 1.005 + 1.88 (H_2)$$

$$C_s = 1.005 + 1.88 (0.010) = 1.0238$$

$$H'_{G2} = C_s (T_{G2} - T_0) + H_2 \lambda$$

$$H'_{G2} = 1.0238 (35) + 0.010 (2501)$$

$$H'_{G2} = 60.843 \text{ KJ}/\text{kg a.seco}$$

Se calcula la entalpía del gas a la salida H'_{G1}

$$C_s = 1.005 + 1.88 (H_1)$$

$$H'_{G1} = C_s (T_{G1} - T_0) + H_1 \lambda$$

$$H'_{G1} = (1.005 + 1.88 H_1) (21) + H_1 (2501)$$

$$H'_{G1} = 21.105 + 2540.48 H_1$$

Se calcula entalpías de sólidos:

$$H'_{s1} = C_p \text{ sólido } (T_{s1} - T_0) + X_1 C_p \text{ humedad } (T_{s1} - T_0)$$

$$H'_{s1} = 3.73 (25) + 5.25 (4.187)(25) = 642.75 \text{ KJ/kg}$$

$$H'_{s2} = C_p \text{ sólido } (T_{s2} - T_0) + X_2 C_p \text{ humedad } (T_{s2} - T_0)$$

$$H'_{s2} = 3.73 (27) + 0.11 (4.187)(27) = 113.157 \text{ KJ/kg}$$

Sustituyendo en el balance de energía:

$$G (60.843) + 0.065 (642.75) = G (21.105 + 2540.48 H_1) + 0.0085 (113.157) + 0$$

El balance de materia:

$$0.0578 (5.25 - 0.11) = G_s (H_1 - 0.010)$$

Cuando se resuelven simultáneamente, se obtiene:

$$G_s = 12.4947 \text{ kg a. seco/h}$$

$$H_1 = 0.0245 \text{ kg } H_2O / \text{kg a. seco}$$

Calculando a Q:

$$Q = G_s C_s \Delta T = (12.4947) (1.0238) (3) = 38.3762 \text{ KJ}$$

$$\text{Donde } \Delta T = [(35-25) + (21-25)] / 2 = 3^\circ\text{C}$$

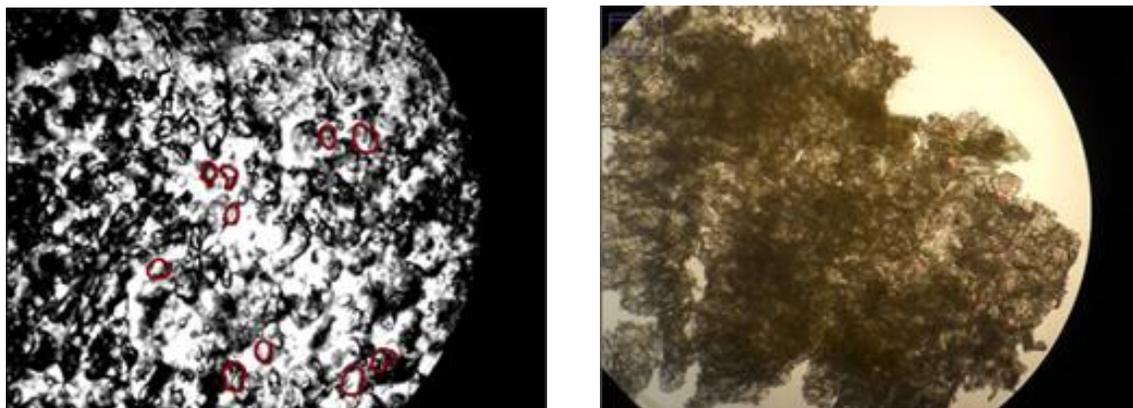
Si el área de secado es de 0.0566m^2 , entonces el calor requerido por 1m^2 es 678.0247 KJ

3.4. Objetivo Particular 4

3.4.1. Microscopía y cambio estructural

A continuación se muestran los resultados obtenidos a partir del tratamiento de datos con el programa ImageJ. Se reportan las medidas de poros a 75°C en lo que respecta al secador de charolas y la máxima temperatura alcanzada en el secador solar (35°C).

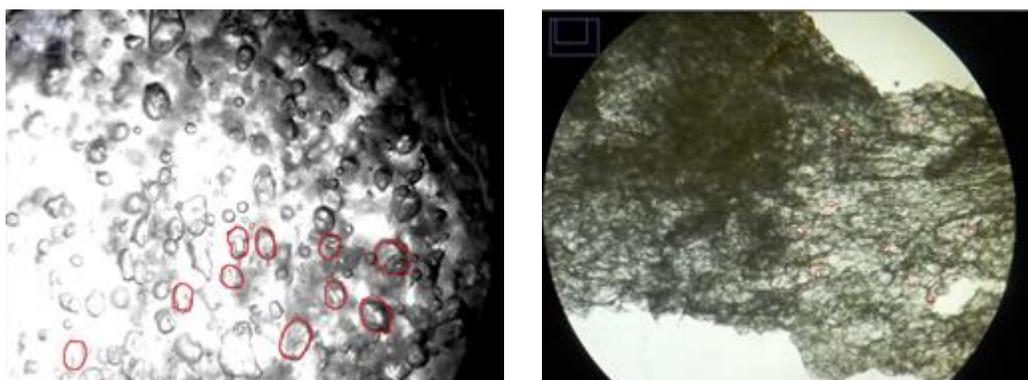
a) Secador de Charolas.



Figuras 38 y 39. Microscopia de manzana en secador de charolas al inicio y final del proceso de secado.

Cuadro 7.		
<i>Resultados de tamaño y circularidad de poro en secador de charolas.</i>		
Tiempo de secado (h)	Área de poro (micras)	Circularidad de poro (micras)
0	1.7423	0.759
1.33	0.010	0.614

b) Secador solar parabólico.



Figuras 40 y 41. Microscopia de manzana en secador solar parabólico al inicio y final del proceso de secado.

Cuadro 8.		
<i>Resultados de tamaño y circularidad de poro en secador solar parabólico.</i>		
Tiempo de secado (h)	Área de poro (micras)	Circularidad de poro (micras)
0	1.7292	0.8713
5.16	0.012	0.617

Se observó que la estructura de la manzana deshidratada se colapsó debido a la deshidratación en ambos secadores. Se aprecian espacios intercelulares que presentan formas irregulares, los cuales aparecen llenos de líquido, así mismo las células presentan un aspecto vítreo debido a la elevada concentración de su fase líquida ocupando la mayor parte de la muestra. Sin embargo conforme va pasando el tiempo se van reduciendo el tamaño de estos espacios, gracias a la evaporación del agua hacia el medio. Lo anteriormente citado se observa en los cambios entre las Figuras 38 y 39, así como en las microscopías del secador solar parabólico, en las Figuras 40 y 41.

Haciendo una comparación entre los dos equipos expuestos, en el secador de charolas la formación de poros y espacios intercelulares iban reduciendo su tamaño de manera más pronta conforme pasaba el tiempo del proceso de secado, mientras en el secador solar parabólico estos espacios intercelulares disminuían con menor velocidad. La diferencia de temperatura alcanzada en cada secador es un factor importante en la apariencia final del producto. Sin embargo, se observó que aunque el tamaño de estos espacios intercelulares cambiaba a menor velocidad existía más semejanza a la forma de circularidad, ya que el aumento de temperatura era más lento no existía un cambio agresivo y por lo tanto seguía existiendo la forma semejante a un círculo (los espacios de gas/líquido ocluido o poros) pero con menor dimensión dando como resultado un menor daño en estructura celular.

Tomando en cuenta el tiempo establecido para el proceso de deshidratación, en el secador solar existe un menor daño en la estructura de la manzana, siendo éste el que resulta más efectivo hablando de un menor daño estructural.

Con el objeto de describir la deformación de los contornos de las placas de manzana a lo largo del secado (Cuadro 7 y 8), se analizaron las siluetas de las placas de manzana que se mostraron al inicio del secado y posterior a este (tanto en las muestras obtenidas en secador de charolas y solar), los contornos de las placas antes del proceso fueron lisos y con una forma más cercana a la circular. Sin embargo, con el avance de la deshidratación, se produjeron deformaciones del material lo que generó contornos irregulares en las placas de manzana deshidratadas.

En las muestras deshidratadas a 75°C se observó una mayor deformación que aquella del material deshidratado a 35°C, resultado de una deshidratación más lenta en el secador solar parabólico y por ende, a un cambio estructural menos agresivo.

3.4.2. Actividad de agua

Se analizó el comportamiento de la actividad de agua para predecir la estabilidad en cuanto al deterioro microbiológico de la manzana.

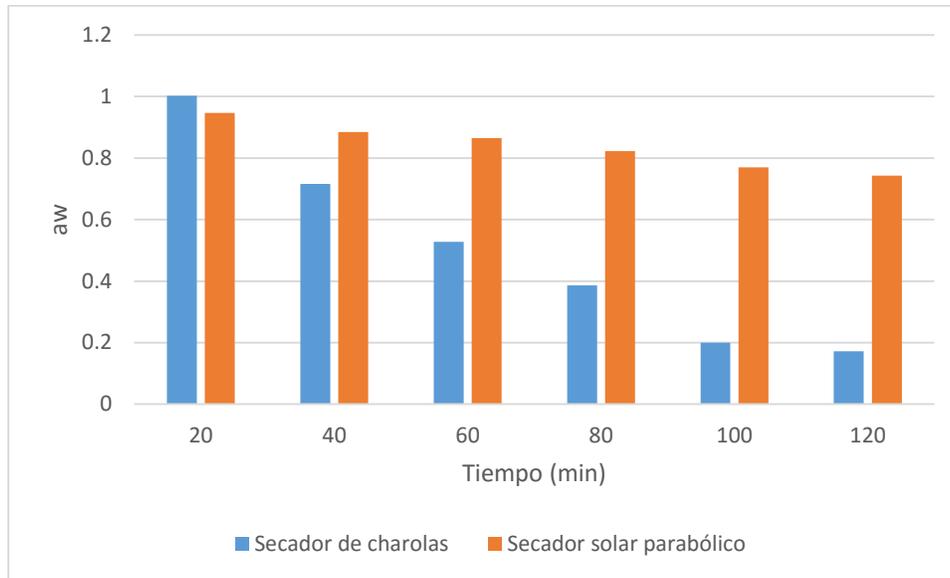


Figura 42. aw vs tiempo (Secador de charolas y secador solar parabólico)

En la Figura 42 se observan los resultados de aw en ambos secadores a los 120 min, esto con el fin de tener el mismo parámetro de tiempo para hacer la comparación. No obstante, en el secador solar el valor de aw a los 300 minutos de operación fue de 0.426, aunque es claro que el tiempo de permanencia en este secador fue mucho mayor en comparación con el de charolas. El valor de aw en el secador de charlas al final del periodo de operación fue de 0.172.

Las frutas y verduras deshidratadas con aire caliente, normalmente llegan a niveles intermedios de humedad, donde los valores de actividad de agua oscilan entre 0.6 y 0.8; a estos niveles normalmente mantienen sus propiedades sensoriales y por lo general muestran una buena resistencia al ataque microbiano (Cao et al., 2007). No obstante los alimentos totalmente deshidratados, por ejemplo, tienen valores de aw aproximadamente iguales a 0.30 para controlar no sólo el crecimiento microbiano sino también otras reacciones de deterioro. Con lo anteriormente citado podemos deducir que el secador de charolas alcanza valores de aw muy por debajo de lo recomendado para alimentos deshidratados, demostrando así la efectividad de proceso; sin embargo, el secador solar parabólico, a pesar de mantener un valor de actividad de agua superior al primer tipo de secador mencionado, consigue niveles dentro del rango de lo aceptable para alimentos deshidratados. Un mayor tiempo de permanencia en el secador bastaría para alcanzar valores similares con el secador de charolas.

3.5. Objetivo Particular 5

3.5.1. Colorimetría

Las Figuras 43, 44 y 45 muestran el comportamiento de cada patrón o atributo de color arrojados en el colorímetro, siempre comparando el secador solar contra el secador de charolas.

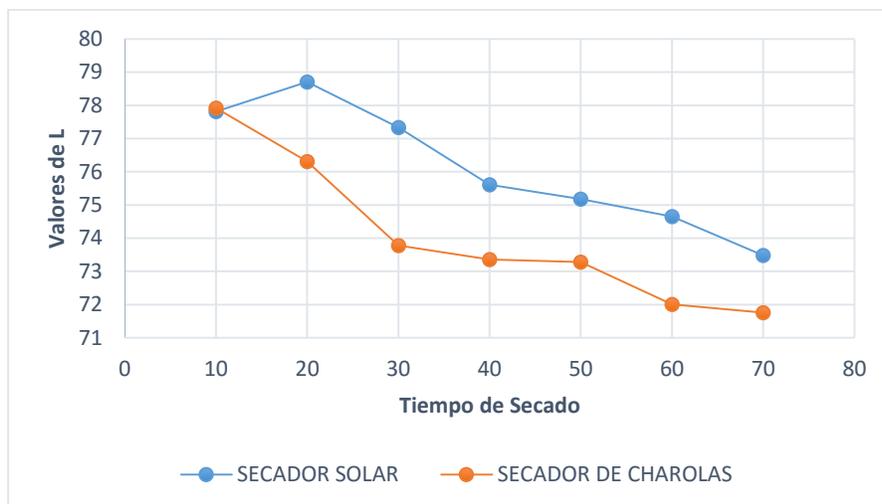


Figura 43. Grafica comparativa de valores de L (Secador solar parabólico vs Secador de charolas).

El factor “L” indica la claridad de las muestras; durante el proceso de deshidratación de las manzanas, en el momento en que se comienza a perder humedad inicia un cambio y daño estructural. Los resultados obtenidos y observables en la Figura 43 nos indican que en el secador de charolas se obtienen tonos más claros a diferencia de las manzanas deshidratadas en el secador solar parabólico. Esta disminución podría deberse a la extracción del aire de las muestras y a la compactación progresiva de las mismas, lo que aumenta la homogeneidad en el índice de refracción del tejido, potenciando la absorción de luz en la zona superficial, con la consiguiente caída de la claridad.

En los resultados obtenidos por Contreras et al., 2008 en manzanas de la misma variedad no impregnadas recién deshidratadas por aire a 30 y 50°C, se presentan > valores de L* (muestras más claras) que los alcanzados en la actual investigación, probablemente debido a que el contenido de glucosa en la emulsión de fortificación incorporada posterior al proceso de secado, que favorece las reacciones de pardeamiento enzimático durante el tiempo de almacenamiento.

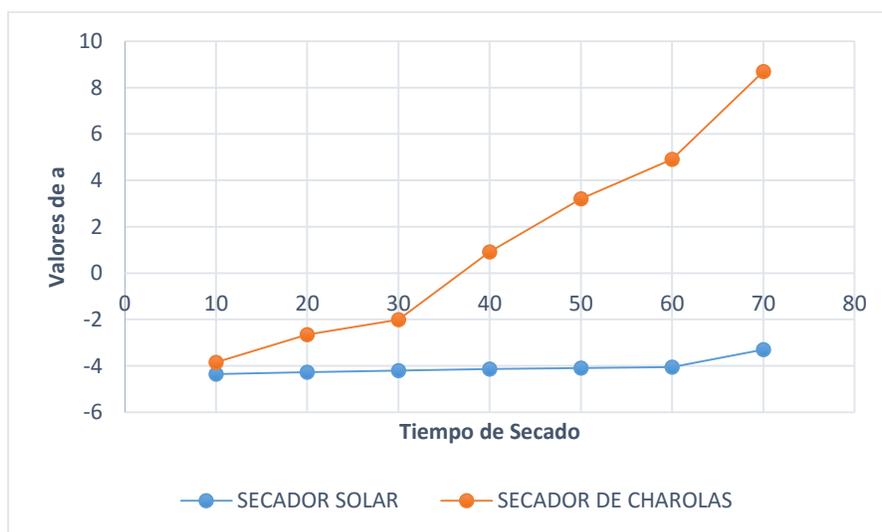


Figura 44. Grafica comparativa de valores de a (Secador solar parabólico vs Secador de charolas).

El parámetro “a” presentó diferencias asociadas con el tiempo de secado, mostrando un ligero incremento (Figura 44), causado principalmente por la degradación de pigmentos de clorofila, responsables de la componente verdosa del color del producto. En el secador de charolas este valor fue al final mayor que en el secador solar parabólico, lo cual indica un cambio de color mayor en las muestras obtenidas con el primer secador mencionado; podemos concluir entonces que el daño estructural así como de tono es más notorio en el secador de charolas pues las muestras se tornan en coloraciones más verdosas.

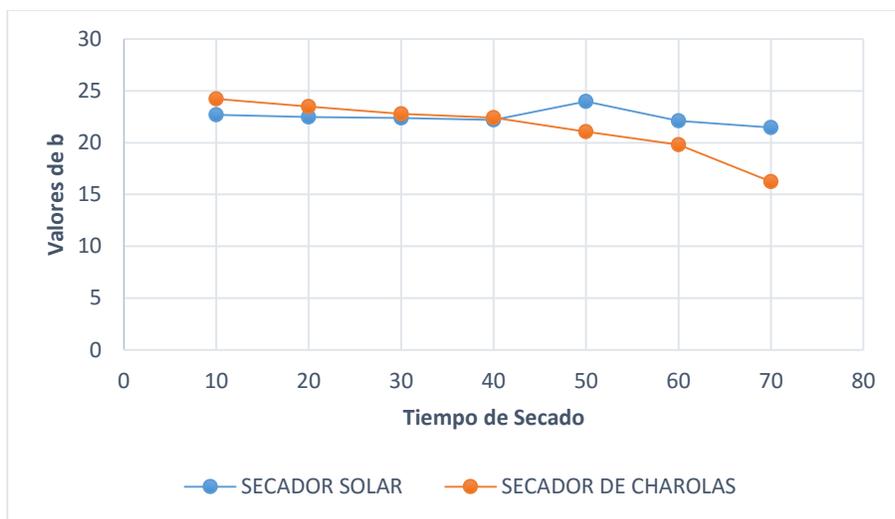


Figura 45. Grafica comparativa de valores de b (Secador solar parabólico vs Secador de charolas).

El parámetro “b” muestra un descenso con respecto al paso del tiempo de secado (Figura 45); estos cambios podrían atribuirse también a la degradación de clorofilas más que a un pardeamiento del tejido. En este caso, el secador de charolas arroja muestras con valores menores en el parámetro b lo cual indica que hay tendencias a los tonos azules (no de manera drástica o totalmente visuales) pero en contraste, las muestras del secador solar se mantienen con valores superiores, acercándose más a los tonos amarillos que son más característicos en las manzanas deshidratadas.

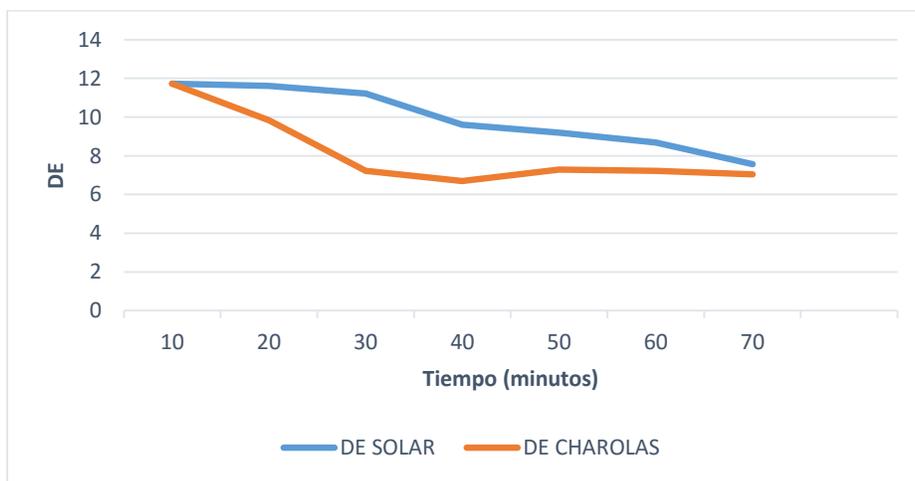


Figura 46. Grafica comparativa de valores de DE (Secador solar parabólico vs Secador de charolas).

Por último se obtuvo el valor de luminosidad para percibir el cambio de coloración de la manzana fresca sin procesar y durante el proceso en los diferentes equipos de secado, cuyos resultados se observan en la Figura 46.

Sobre los datos de ΔDE , el parámetro que indica la claridad de las muestras lo que quiere decir es que entre más se acerque al 100 existe más claridad en ellos, mientras que si el valor se acerca a 0 este tiende a oscurecer, durante el proceso de deshidratación de las manzanas, en el momento en que se comienza a perder humedad inicia un cambio y daño estructural. Por lo que podemos observar que en el secador de charolas los valores son más bajos, esto quiere decir más cercanos al 0, dándonos como resultado que existe más oscurecimiento en el proceso de secado con el equipo de secador de charolas que en secador solar.

Tanto los parámetros obtenidos en a, b y DE, de esta investigación en el secador de charolas son similares a los expuestos en 2008 por Contreras.

Aunque existiera un retraso en el pardeamiento enzimático gracias a los antioxidantes utilizados previos al proceso de secado, atribuimos los comportamientos antes expuestos a que al ser más lento el proceso en el secador solar parabólico la manzana se expone a un daño mayor haciendo que exista un pardeamiento enzimático más notorio.

El resultado final (a los 70 minutos) para el secador de charolas es de ($L=71.76$) mientras que para el secador solar fue de ($L=73.48$); lo que indica que a no hay gran diferencia en los parámetros a y b, puesto que los tonos característicos en estos no son muy visuales, al menos no tanto en comparación con la claridad de la muestra. Con esto podemos decir que el secador solar aunque es más tardado si hubiera más control para las pruebas de color puede llegar a competir con un producto final obtenido en un equipo como el secador de charolas si lo que buscamos es una manzana más clara y mejor presentación al consumidor.

CONCLUSIONES

Se desarrolló un proyecto que muestra la factibilidad del uso de energía solar para procesos de secado, que puede llevar beneficios comunes en la región o para proyectos de investigación o pequeñas industrias. Si bien el deshidratador diseñado no es el más eficaz o el más moderno, si es un proyecto de aplicación real, en el que se pudo construir un equipo para evaluar su funcionamiento y que traerá beneficios reales.

Se logró el objetivo de la construcción del secador solar de bajo costo y no contaminante; teniendo en cuenta que la aplicación de los secadores solares ha adquirido una gran importancia en el tratamiento de productos para acelerar la germinación, en la termoterapia de diferentes cultivos, para eliminar las plagas y los virus, así como para la deshidratación de los excedentes de las cosechas y la obtención de productos de primera necesidad y a bajo costo. El diseño de estos equipos se ha encaminado a dar soluciones geométricas de la superficie que absorbe el calor, que incrementen el rendimiento de la captación solar, conjuntamente con el empleo de materiales de mejores propiedades ópticas. Las diferencias entre los diversos equipos para secado solar se encuentran fundamentalmente en la configuración del plato o cámara de secado, el construido en este proyecto cuenta con un tamaño práctico que facilita no solamente el transporte del equipo, sino también su uso al no requerir un área amplia de trabajo; todos estos factores influyen en la transferencia de calor por radiación, lo que determinará el valor de las pérdidas energéticas y al final el rendimiento del secador.

Se puede concluir que algunas ventajas del secador solar parabólico diseñado en este proyecto fueron: la calidad del producto deshidratado es generalmente superior cuando se selecciona una buena tecnología del proceso, las condiciones sanitarias y nutritivas (en caso de alimentos) son mejores porque el producto no está expuesto a la acción directa del sol, la lluvia, el polvo y los insectos, el área utilizada en la deshidratación es varias veces menor que la empleada en el secado natural, las operaciones de deshidratación son más sencillas y pueden automatizarse.

Al estudiar la deshidratación de manzana Red Delicious en un secador solar tipo parabólico y compararlo con un secador de charolas, se observó que en el secador solar las propiedades físicas, fisicoquímicas y estructurales del producto fueron similares que en un secador de charolas, esto quiere decir que el secador construido es capaz de secar un alimento como la manzana Red Delicious sin dañar sus propiedades finales del producto. El mayor inconveniente está reflejado en la velocidad de secado, es decir si lo que se necesita es tiempo como en una industria, este prototipo tarda más del triple del tiempo en secar el producto; cabe destacar que el tiempo de experimentación fue entre los meses de Octubre-Noviembre y existieron cambios climáticos imprevistos, dándonos como resultado bajas temperaturas y tardando más tiempo en secar. Haciendo las equivalencias en gastos energéticos si el secador solar parabólico se ocupara en los meses que existe mayor radiación solar y existiera menos cambios climáticos drásticos, aumentaría la temperatura, aumentando también la velocidad de secado y disminuyendo el tiempo necesario para llevar a cabo el proceso de deshidratación.

Comparado con otros métodos el secador diseñado es una alternativa viable debido a sus bajos costos, además es de sencilla construcción y fácil transportación debido a sus dimensiones. Podemos observar que el secador solar es competitivo con los secadores convencionales como es el caso del de charolas, es importante mencionar que el solar parabólico tiene la limitante de que su eficiencia baja muchísimo en días con gran nubosidad, lo sucede de acuerdo a la época del año, en la zona centro del país es común en épocas de lluvia, por lo que proponemos el uso del secador solar en combinación con uno convencional, con el fin de que sea usado como un pre-tratamiento y los tiempos de permanencia así como la energía gastada en el de charolas disminuya.

REFERENCIAS

- Aguilera J. (2005). Why food microstructure. *Journal of Food Engineering*; volumen 67 (3-11).
- Ahmad S.; Morgan M.; Okos M. (2001). Effects of microwave on the drying, checking and mechanical strength of baked biscuits. *Journal of Food Engineering*; volumen 50 (63-75).
- Almada M., Stella M., Machaín M., y Pulfer J. (2005). Guía de uso de secadores para frutas, legumbres, hortalizas, plantas medicinales y carnes. Asunción, Paraguay. Septiembre 22, 2015, de UNESCO Sitio web: <http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Montevideo/pdf/ED-Guiasecaderosolar.pdf>
- Almazar, R., & Muñoz, F. (1994). *Ingeniería de la Energía Solar*. México: El Colegio Nacional.
- Alzamora S.M., Cerrutti, P., Guerrero S. y López-Malo, A. (1995). Minimally processed fruits by combined methods. In *Food preservation by moisture control - fundamentals and applications*. Lancaster, USA, Eds. Welte Chanes, J. & Barbosa-Cánovas, G., Technomic Pub. Co.
- Badui, D. S. (1999). *Química de los Alimentos*, México. Ed. Pearson Educación.
- Benítez C. (2011). "Cosecha y pos-cosecha de peras y manzanas en los valles irrigados de la Patagonia" Disponible en la Biblioteca del INTA Alto Valle.
- Brennan J.G., Butters J.R., Cowell N.D., (1998). *Las operaciones de la ingeniería de los alimentos*. España. Editorial Acribia.
- Calvo C., Durán L. (1997). *Óptica y color: Temas en tecnología de alimentos*. V. 1. Instituto Politécnico Nacional. México D. F.
- Cao H., Zhang M., Mujumdar A., Xiao G., y Sun J. (2007). Study on reduction of water activity and storage stability for dehydrated *Brassica parachinensis* with intermediate moisture. *Drying Technology*. 25: 669-674.
- Coca P., (1992). *Manual del aluminio*. México. Ed. Reverté.
- Contreras C, Chiralt A, Martínez, N. (2008). Influence of microwave application on convective drying: Effects on drying kinetics, and optical and mechanical properties of apple and strawberry. *J Food Eng*; volumen 88 (número 1).
- Devahastin S., Suvarnakuta P., Soponronnatit S. (1989). A comparative study of low-pressure superheated steam and vacuum drying of a heat-sensitive material. *Dry Technol*.
- Earle, R. L., (1998). *Ingeniería de los alimentos: Operaciones básicas del procesado de los alimentos*. Zaragoza, España. Editorial Acribia.

Fellows P. (1994). Tecnología del proceso de los alimentos: Principios y prácticas. Zaragoza, España. Editorial Acribia.

Fito P., Andres A, Barat J. y Albors A. (2001). Introducción al secado por are caliente. (1° Edición). Valencia, España. Editorial U.P.V.

Foust S., Wenzel A., Clump W., Maus L. (1987). Principios de Operaciones Unitarias. (2° Edición). Valencia, España. Editorial Cecsa.

Geankoplis C.J. (2006). Procesos de transporte y operaciones unitarias. (4° Edición). México. Compañía Editorial Continental.

Hawlder M., Chua K.J., Mujumdar A.S., Chou S.K., and Ho H.C. (2000). Convective drying of banana, guava and potato pieces: effect of cyclical variations of air temperature on drying kinetics and color change. *Drying Technology* 18; volumen 4 (907–936).

Hernández E., Sandoval S., Rodríguez J., Velasco O. A. (2010). Modelización del secado de madera de *Pinus pseudostrobus* utilizando el método de la curva característica. *Bois et forêts des tropiques*; volumen 306 (número 4).

Herrera P., (2006). Construcción de un secador de charolas giratorio y su valoración con ajo (tesis de pregrado). Universidad Tecnológica de la Mixteca. Oaxaca, México.

Ibarz, A., y Barbosa-Cánovas, G. (2005). Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos. México. Ediciones Mundi-Prensa.

InfoAgro. (2010). El cultivo de la Manzana. Septiembre 22, 2015, de InfoAgro.com Sitio web: http://www.infoagro.com/frutas/frutas_tradicionales/manzana.htm

Jarén C. (2005). Perfil del consumidor de frutas, hábitos y tendencia. *Fruticultura Professional*; volumen 149 (72-78).

Kaya A., Aydin O., Demirtas C. (2007). *Drying Kinetics of Red Delicious Apple*. *Biosystems Engineering-BIOSYST ENG* , vol. 96, no. 4, pp. 517-524. Febrero 09, 2016, de Elsevier Sitio Web: www.elsevier.com/

Kramer A., Twigg, B. A. (1970). *Quality Control for the Food Industry*. The Avi Publishing Westport, Conn. 213-216

Kuskoski, E., Asuero, G., Troncoso, M., Mancini-Filho, Jorge, and Fett, Roseane. (2005). Aplicación de diversos métodos químicos para determinar actividad antioxidante en pulpa de frutos. *Food Science and Technology (Campinas)*, 25(4), 726-732. Febrero 09, 2016, de Scielo Sitio Web: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-20612005000400016&lng=en&tlng=es.

Leistner, L. y Rodell, W. (1976). The stability of intermediate moisture foods with respect to microorganism, en Intermediate Moisture Foods. Applied Science Publisher Ltd. Londres, (301-308).

Manrique A. (1984). Energía Solar, Fundamentos y Aplicaciones Fototérmicas. México. Editorial Harla.

Montero P. (2005). Modelado y Construcción de un Secadero Solar Híbrido para Residuos Biomásicos. Seminario de Proyectos II, Ing. en Energía, UAM-I, México, D.F

Moreno G., (2000). Manual de construcción y operación de una secadora solar. Seminario de Proyectos II, Ing. en Energía, UAM-I, México, D.F.

Orrego C. (2003) Procesamiento de Alimentos. (1° Edición). Manizales Colombia. Universidad Nacional de Colombia.

Pedro, C. (1992). Manual de aluminio. (2° Edición), Vol. 1. Zaragoza, España. Editorial Reverté.

Perry J., (2008). Perry's Chemical Engineering Handbook". (8° Edición). New York. Mc Graw Hill.

Rico E., Pérez A., Ruiz Ma. De la L., Robledo L. (2010). Innovación en el Diseño y Construcción de un Secador Solar para frutas y hortalizas. Presentado en el XII Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos. Guanajuato, México.

Rodríguez, J., Corzo, O., Bracho, N., Pereira, A., Vásquez, A. (2014). Determinación experimental del coeficiente de difusión de agua durante el secado de láminas de córdoba. Universidad de Oriente, Venezuela; volumen 23.

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural Pesca y Alimentación (SAGARPA). (1998). Procesamiento de frutas y verduras a nivel casero. Febrero 09, 2016, de SAGARPA Sitio Web: <http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasaapt/Procesamiento%20de%20frutas%20y%20verduras%20a%20nivel%20casero.pdf>

Scout W.J. (1953). Water relations of Staphylococcus aureus at 30°C. Journal of Biology Science. 546-549.

Senner, A. (1994). Principios de Electrotecnia. Barcelona, España. Editorial Reverté.

Singh, R. P.; Heldman, D.R. (1998). Introducción a la Ingeniería de los alimentos. Zaragoza, España. Ed.Acribia. S.A.

Strumillo C. (1986). Drying principles, applications and design. Suiza. Gordon and Breach Science publishers.

Treybal, R. E. (2001). Operaciones de transferencia de masa. (2° Edición). México. McGraw-Hill.

Ubero, P. (2004). Técnicas de Microscopía aplicada. Zaragoza, España. Universidad de Murcia.

Young, H. (1992). University Physics. (7° Edición). San Francisco. Addison Wesley.

Verrips, C. T. y Van Rhee, R. (1981). Heat inactivation of Staphylococcus epidermis at various water activities. Applied Environmental Microbiology; volumen 41 (1128).