



**UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO**

**División de Ciencias e Ingeniería**

**Estudio del secado de chile habanero con  
energía solar.**

**TESIS RECEPCIONAL**

Para obtener el Grado de

*Ingeniero en Sistemas de Energía*

**PRESENTA**

**OMAR MARTÍNEZ VALENZUELA**

**DIRECTOR DE TESIS**

**DR. JOSÉ HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ**

Chetumal, Quintana Roo, Septiembre 2009



**UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO**  
**División de Ciencias e Ingeniería**

**Tesis elaborada bajo la supervisión del Comité de Asesoría y aprobada como requisito parcial, para obtener el grado de:**

**INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA**

**COMITÉ**

**Director:** Dr. José Hernández Rodríguez \_\_\_\_\_

**Asesor:** M.E.S. Roberto Acosta Olea \_\_\_\_\_

**Asesor:** M.C. Jaime Cuevas Domínguez \_\_\_\_\_

**Chetumal, Quintana Roo, Septiembre de 2009**

*Aborrecí, por tanto, la vida, por que la obra que se hace debajo del sol me era fastidiosa; por cuanto todo es vanidad y aflicción de espíritu. Asimismo aborrecí todo mi trabajo que había hecho debajo del sol, el cual tendré que dejar a otro que vendrá después de mí. Y ¿quién sabe si será sabio o necio el que se enseñoreará de todo mi trabajo en que yo me afané y en que ocupe debajo del sol mi sabiduría? Esto también es vanidad. Volvió, por tanto, a desesperanzarse mi corazón acerca de todo el trabajo en que me afané, y en que había ocupado debajo del sol mi sabiduría. ¡Que el hombre trabaje con sabiduría, y con ciencia y con rectitud, y que haya de dar su hacienda a hombre que nunca trabajo en ello! También es esto vanidad y mal en grande. Porque ¿qué tiene el hombre de todo su trabajo, y de la fatiga de su corazón, con que se afana debajo del sol?*

Eclesiastés 2:17-22

## AGRADECIMIENTOS

Mejores son dos que uno; por que tienen mejor paga de su trabajo. Porque si cayeren, el uno levantara a su compañero, pero ¡ay del solo! que cuando cayere, no habrá segundo que lo levante. También si dos durmieren juntos, se calentaran mutuamente; más ¿cómo se calentara uno solo? Y si alguno prevaleciere contra uno, dos le resistirán; y cordón de tres dobleces no se rompe pronto.

Eclesiastés 4: 9-12.

La familia con la que me ha tocado compartir esta vida es unida y me ha apoyado en muchas necesidades, en este caso el estudio para superación, es por ello que les doy mi más sincero agradecimiento a:

A mi madre: Sandra Luz Valenzuela Sánchez por su amor, palabra que encierra todo lo que ha hecho por mí.

A mis tías: Irma Valenzuela Sánchez y Alma R. Valenzuela Sánchez por su apoyo y gran cariño.

A mis tíos: Julio C. Licona Díaz y Kabirt Retolaza Castrejón por su apoyo y guía.

A mis hermanos: Luz María y Marcos por sus ánimos y compañía.

A mis primos: Alma D. Pamela y Kabirt Retolaza Valenzuela, Natalia Monserrat Licona Valenzuela, por sus alegrías y amistad.

A mis compañeros de estudio: Vicente de Paul, Joaquín, Gabriel, David, Irving, Gener, Sergio, Paul Argenis, Juan, Fernando, Luis, Pedro, Tannia, Isis, sin ellos el paso por la universidad hubiese sido insípido.

A el Doc. Oscar Gonzales Astorga por su amistad y orientación. Y al señor Rene Almeida por su apoyo.

Pasan por mi mente compañeros universitarios de diferentes carreras con los que compartí buenos momentos Dilcia, Raúl, y Liliana gracias por la compañía.

A Ana Jael y su familia, Euan Correa, sin ellos ¿cómo agradecería a Dios?

El autor desea expresar su más sincero agradecimiento a los profesores M.E.S. Roberto Acosta Olea y al M.C. Jaime Cuevas Domínguez, por su colaboración en la preparación de este manuscrito. Además, manifiesta su agradecimiento especial al Dr. José Hernández Rodríguez, cuya familiaridad con las necesidades e ideas en los procesos de secado resultó de enorme utilidad durante la fase inicial de programación de esta tarea. Gracias también a todos los integrantes del consejo escolar por sus valiosos comentarios y a la División de Ciencias e Ingenierías por el apoyo dado en la realización, impresión y empastado de este trabajo de tesis.

¡A TODOS GRACIAS!

## RESUMEN

Los fenómenos difusionales en alimentos son la base de todos los procesos de transferencia de materia ocurridos durante el proceso o almacenamiento de los alimentos. Por lo tanto el conocimiento de sus bases físicas (ecuaciones y modelos) así como su análisis experimental son de gran importancia.

Varios estados de la república mexicana han realizado pruebas de secado en alimentos como medio de conservación, sobre todo en los productos agrícolas que más se producen en cada estado.

En el año 2006 se produjo 3,390 toneladas de chile habanero (*Capsicum chinese jaq*) en el estado de Quintana Roo, el cual el 50% se exporta a nivel internacional.

En la Universidad de Quintana Roo se realizaron pruebas satisfactorias de secado solar del chile habanero concluyendo con este trabajo de tesis en el que se presentan de forma general: la metodología a utilizar en el proceso pre-secado, los resultados sobresalientes de las pruebas realizadas y recomendaciones.

El presente trabajo de tesis se compone de cinco capítulos y que se estructuran de la siguiente manera:

Capitulo 1.- Se describen los conceptos fundamentales de secado, las propiedades físicas y químicas de los agentes que interactúan con los vegetales, así como las técnicas que existen para la conservación de alimentos y los equipos utilizados a nivel industrial. Finalizando con la mención de las principales características del chile habanero el cual es el producto sujeto del presente estudio.

Capitulo 2.- Se presenta los principios termodinámicos que gobierna el proceso de secado, así como las variables climatológicas a tomar en cuenta para llevar a cabo el secado solar y algunos ejemplos de estudios realizados a productos deshidratados, mediante el método de secado solar.

Capitulo 3.- Se presenta la metodología utilizada en la realización de las pruebas de secado tanto en un túnel de secado en laboratorio, como el proceso de secado solar en campo, haciendo mención de los instrumentos utilizados y las técnicas adecuadas para la obtención de un producto de calidad.

Capitulo 4.- Se analiza los resultados obtenidos de las pruebas realizadas del secado solar en campo, observando los tiempos de secado y describiendo la observación del proceso de deshidratación.

Capitulo 5.- Se presentan las principales conclusiones de este trabajo de investigación.

## CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS .....	ii
LISTA DE TABLAS.....	iii
INTRODUCCIÓN.....	v
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	vii
<b>CAPITULO 1. CONCEPTOS GENERALES.....</b>	<b>1</b>
1.1 Definiciones fundamentales. ....	1
1.2 Técnicas de conservación de alimentos.....	2
1.3 Chile habanero.....	4
1.4 Secado. ....	5
<b>CAPITULO 2 . SECADO.....</b>	<b>13</b>
2.1 Fundamentos teoricos del secado.....	13
2.2 Secado solar. ....	31
2.3 Secado de productos agrícolas.....	36
<b>CAPITULO 3 . METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>38</b>
3.1 Pruebas de secado.....	38
3.2 Materiales y herramientas utilizados.....	39
3.3 Diagrama de flujo del proceso de las pruebas de secado. ....	41
3.4 Funcionamiento del equipo de secado. ....	46
<b>CAPITULO 4 . ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>51</b>
4.1 Peso seco. ....	51
4.2 Pruebas con chile habanero entero. ....	51
4.3 Pruebas con chile habanero cortado en rebanadas.....	53
4.4 Resultados y discusión. ....	55
<b>CAPITULO 5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>60</b>
<b>GLOSARIO.....</b>	<b>62</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>64</b>

## LISTA DE FIGURAS

<i>Número</i>	<i>Página</i>
Figura 1-1. Dibujo que muestra en corte transversal la anatomía del chile habanero ( <i>Capsicum chinense</i> jaq) .....	4
Figura 1-2. Fotografía en donde se observa el equipo de deshidratación por prensado.....	6
Figura 1-3. Fotografía en donde se muestra el equipo y aditamentos para llevar a cabo el método de deshidratación por ósmosis. ....	7
Figura 1-4. Fotografía en donde se observa el equipo utilizado en el método de deshidratación por liofilización. ....	7
Figura 1-5. Fotografía en donde se muestra el equipo utilizado en el método de deshidratación por centrifugación. ....	8
Figura 1-6. Fotografía en donde se muestra el secador de bandeja o armario.....	9
Figura 1-7. Fotografía de un secador de túnel.....	10
Figura 1-8. Fotografía del secador tipo tambor en operación.....	10
Figura 1-9. Fotografía del secador de lecho fluidizado.....	11
Figura 2-1. Esquema del modelo físico del secado. ....	14
Figura 2-2. Ilustración del mecanismo de transferencia de humedad.....	15
Figura 2-3. Gráfica de la curva de los diferentes tipos de humedades en un sólido. ....	17
Figura 2-4 Gráfica de la curva típica de secado de materiales húmedos. ....	18
Figura 2-5. Gráficas de las curvas típicas de secado y de velocidad de secado. ....	19
Figura 2-6 Diagrama en donde se observa la curva de saturación del aire húmedo. ....	26
Figura 2-7 Diagrama psicrométrico ASHRAE (Guy-Fawcett, 1975).....	27
Figura 2-8. Ilustración que muestra el efecto de la $a_w$ en reacciones de deterioro.....	30
Figura 2-9. Dibujo que muestra los componentes de un secador solar. ....	35
Figura 3-1. Equipos utilizados para la realización de pruebas en laboratorio. ....	40
Figura 3-2. Fotografías de los equipos utilizados para la realización de pruebas en campo.....	40
Figura 3-3. Fotografía del secador solar tipo indirecto.....	41
Figura 3-4. Diagrama que muestra el flujo de procesos de las pruebas de secado.....	42
Figura 3-5. Dibujo que demuestra el proceso de secado en el secador tipo túnel. ....	46
Figura 3-6. Dibujo que demuestra el funcionamiento del secador solar indirecto con recirculación de aire. ....	47
Figura 3-7. Perfil de temperaturas en pruebas del 25 de junio del 2009. En donde t1: temperatura ambiente, t2: temperatura salida colector y t3: temperatura bandeja de secado. ....	48
Figura 3-8. Diagrama de condiciones climatológicas.....	49
Figura 3-9. Diagrama Estereográfico para latitud de 18.3° .....	49
Figura 3-10. Diagrama Ortográfico solar para latitud 18.3° .....	50
Figura 3-11. Curvas de temperatura e Irradiancia solar con respecto al tiempo.....	50
Figura 4-1. Fotografía de la muestra de chile habanero indicando el peso seco final.....	51
Figura 4-2. Fotografía de la muestra de mohosidad en pruebas de secado al aire libre y secado en secador solar directo.....	52
Figura 4-3. Fotografía de la muestra de chile habanero seco sometida en secador tipo túnel.....	52
Figura 4-4. Gráfica que muestra la curva de secado.....	55
Figura 4-5. Gráfica que muestra la pérdida del contenido de humedad. ....	56



Figura 4-6. Gráfica que muestra la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo. ....57

Figura 4-7. Gráfica que muestra la relación de contenido de humedad con respecto al tiempo.....58

Figura 4-8. Gráfica que muestra la correlación logarítmica a 50° C y 55° C .....58

Figura 4-9. Gráfica que muestra las curvas de actividad de agua  $a_w$ .....59

### LISTA DE TABLAS

<i>Número</i>	<i>Página</i>
Tabla 2-1. Proporciones de volumen en gases.....	23
Tabla 2-2. Tabla de Volumen específico y densidad para 1 atm. ....	24
Tabla 2-3. Tabla de humedad de saturación a diferentes temperaturas. ....	25
Tabla 2-4. Definición de Climas y Microclimas.....	33
Tabla 2-5. Comparación de secador solar con secado al aire libre y secadores de recursos fósiles. ....	35
Tabla 4-1. Datos obtenidos en las pruebas realizadas en el secado de chile habanero a diferentes temperaturas y técnicas.....	54

## NOMENCLATURA

A	Área de secado, m <sup>2</sup> .
a <sub>w</sub>	Actividad del agua, Adimensional.
D <sub>eff</sub>	Coefficiente de difusión efectivo, m <sup>2</sup> /s.
HR	Humedad relativa, %.
I <sub>s</sub>	Irradiancia, W/m <sup>2</sup> .
kgVA	Kilogramo de Vapor de agua.
kgAS	Kilogramo de aire seco.
L	Espesor del material, m <sup>2</sup> .
M	Contenido de humedad base húmeda, kg de agua/kg de material húmedo.
m	Masa del sólido húmedo, kg.
m <sub>s</sub>	Masa del sólido seco, kg.
n	Número de moles del gas, mol.
P	Presión total, Pa.
p <sub>v</sub>	Presión de vapor
R	Número de Reynolds, p <sub>v</sub> DH/μ.
T	Temperatura, °C.
T <sub>s</sub>	Temperatura seca, °C.
t	Tiempo de secado, min.
V	Volumen, m <sup>3</sup> .
W	Masa de agua evaporada, kg.
W <sub>s</sub>	Humedad de saturación, kgVA/kgAS
W <sub>x</sub>	Flujo másico del aire.
X	Contenido de humedad base seca, kg de agua/kg de material seco.
X <sub>WA</sub>	Humedad crítica.
λ	Calor latente de vaporización de agua, J/kg.
ρ	Densidad, kg/m <sup>3</sup> .
ve	Volumen específico, m <sup>3</sup> /kg.
vs	Velocidad de secado, kg de agua/(m <sup>2</sup> /s).

## INTRODUCCIÓN

El sol, fuente natural de energía, con un valor de  $3.83 \times 10^{30}$  J/s de energía emitida diaria. El planeta tierra recibe parte de esta energía, la cual es aprovechada por todo ser viviente. El hombre aprovecha esta energía solar para llevar a cabo diferentes actividades. Una de las actividades que realiza el hombre aprovechando la energía renovable es el secado (deshidratación) de diferentes productos entre los cuales los productos agrícolas y madereros son los más destacados.

Desde hace varios años, se ha mejorado el proceso de secado desarrollando tecnología con la cual se disminuye el tiempo del proceso de secado y aumenta la calidad del producto, sin embargo, esta tecnología está basada en el uso de la energía eléctrica y gas LP, los cuales constituyen en el proceso de secado un costo elevado y un peligro para el personal operativo, ya que, debido a algún desperfecto se puede producir un corto circuito y por consiguiente una explosión.

Con el transcurso del tiempo se ha demostrado que el uso de la energía solar trae beneficios, entre los que se recalcan: son abundantes y no contaminantes. Por lo que, para el mejor aprovechamiento se han elaborado diferentes dispositivos, como los secadores solares los cuales son una buena opción para el secado de productos agrícolas.

La deshidratación es una técnica más ampliamente utilizada para la conservación de alimentos. Son ampliamente conocidas las ventajas de los alimentos deshidratados, ya que al reducir el contenido de humedad en ellos se previene el crecimiento de microorganismos y se minimizan las demás reacciones que los deterioran<sup>1</sup>.

El secado de productos agrícolas es un método utilizado en diferentes partes del mundo, México aprovecha este método para la conserva de algunos de sus productos. En Quintana Roo destaca el empleo del secado solar a la intemperie en productos como la flor de Jamaica, el grano de arroz entre otros. En el caso de este trabajo, se utilizó el proceso de secado solar tipo indirecto para la conserva de productos agrícolas.

---

<sup>1</sup> Modelado de la cinética de secado del pimiento rojo. Universidad de la Serena. Departamento de ingeniería en alimentos. A. Vega.

El estudio se realizó en la ciudad de Chetumal, en el municipio de Othón P. Blanco del estado de Quintana Roo ubicado en la latitud 18.483, longitud -88.3. Recibió en los días de prueba un promedio anual de 750 Watts/m<sup>2</sup> de radiación solar<sup>2</sup>.

En el estado de Quintana Roo, se produce el chile habanero en gran escala en invernaderos apoyados por la tecnología de riego tipo hidroponía.

El consumo de chile, está ligado a la historia de América y en particular a la de México. Además de su importancia económica, el chile es una fuente excelente de colorantes naturales, vitaminas y minerales.<sup>3</sup> Los chiles jalapeño y habanero son ejemplo de chiles con y sin capacidad para irritar el sistema digestivo, respectivamente.

---

<sup>2</sup> Datos medidos durante la prueba de secado.

<sup>3</sup> Guzman-Maldonado, S. H., Torres-Pacheco, I y Gonzalez-Chavira, M. Genetic Variability and Processing effect on Nutraceutical Factors of Jalapeño Pepper. 16 th. International Pepper Conference. Pozo-Camponodico, O. Ed. Tampico, Tamaulipas. 2002.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

Los combustibles fósiles contaminan y son caros, por lo que el utilizar la energía solar que es barata, no necesita transporte y no contamina, se puede reducir el consumo de los mismos. El uso de la energía solar durante el secado, permite obtener un producto de calidad sin deteriorar el ambiente.

El estudio del secado solar permite llegar a conocer correctamente el proceso de secado para obtener un producto final de calidad con sello verde o ecosello (medio visual que hace referencia a productos o servicios que afecten en menor grado el medio ambiente, en comparación con productos o servicios similares que la población consume<sup>4</sup>), además de evitar daños al producto, consumo excesivo de energía, desgaste del equipo o disminución del rendimiento y las mejores condiciones de temperatura y tiempo requerido para que el producto pierda exceso de humedad.

Los principales productos agrícolas de la zona sur de Quintana Roo son: jitomate, papaya, naranja, limón, chile habanero, tamarindo, piña y caña. Es conocido el secado de flor de jamaica y arroz, exponiendo el producto al aire libre extendido sobre una superficie plana expuestos a los rayos solares, con la desventaja de que también simultáneamente se expone al polvo, lluvia e insectos, por lo que el proceso debe ser vigilado constantemente y manipulado para lograr un secado homogéneo; sin embargo este método suele tener graves consecuencias sobre el producto final, ya que se obtiene de baja calidad en lo que se refiere a sabor y textura, y en ocasiones con algunos contaminantes debido al polvo e insectos.

De los principales productos agrícolas que algunos estados de la república mexicana cosecha, se han realizado estudios de secado. Aunque existen productos elaborados a partir del chile habanero deshidratado (chile habanero en polvo), no se conoce un estudio de secado de chile habanero, a pesar de su gran demanda en el mercado tanto nacional como internacional.

---

<sup>4</sup> <http://desarrollososteniblepoli.blogspot.com/>

## CAPITULO 1. CONCEPTOS GENERALES.

En este capítulo se mencionan los conceptos fundamentales del secado con el objeto de comprender las bases del proceso de secado de alimentos.

### 1.1 DEFINICIONES FUNDAMENTALES.

#### **Conserva de alimentos:**

El procesado y conservación de los alimentos, son mecanismos empleados para proteger a los alimentos contra los microbios y otros agentes responsables de su deterioro para permitir su futuro consumo. Los alimentos en conserva deben mantener un aspecto apetitoso, sabor y textura, así como su valor nutritivo original.

#### **Secado solar de alimentos.**

El secado solar de alimentos puede tener una gran ventaja si se aplica en lugares remotos, donde existen abundantes cosechas durante el verano, mismas que están condenadas a una rápida descomposición si no se tiene un método simple y económico para su preservación.

El secado solar de alimentos puede ser llevado a cabo en casi todas las locaciones, tomando en cuenta la cantidad de radiación solar y la humedad relativa del lugar mediante cartas climáticas.

En el secado de productos agrícolas al aire libre la luz directa del Sol no es aconsejable, en el caso de las frutas se oxidan rápidamente, pierden su color natural y obtienen un mal aspecto, las atacan los insectos o los pájaros, por lo que el producto final se contamina. En el caso de los vegetales; el producto se pone amarillo y pierde propiedades. También es afectado por el polvo y sin la vigilancia al estar expuesto a alguna lluvia repentina el producto puede descomponerse.

#### **Transferencia de calor por convección.**

En este caso, el sólido húmedo se seca al pasar sobre el o a través una corriente de aire caliente. El aire caliente sirve para transferir calor al sólido y para eliminar el vapor formado. Si el aire caliente es suministrado al sistema a temperatura y humedad constante, se observa que el proceso de secado ocurre en tres etapas diferentes: Inicialmente la etapa de inducción (sin pérdida de humedad en el producto), la

velocidad de secado constante; cuando alcanza un cierto grado de humedad la velocidad comienza a disminuir progresivamente hasta ser nula cuando el material está completamente seco<sup>5</sup>.

## 1.2 TÉCNICAS DE CONSERVACIÓN DE ALIMENTOS.

Hay muchos agentes que pueden destruir las propiedades nutritivas de la comida fresca. Los microorganismos, como las bacterias y los hongos, degradan los alimentos con rapidez. Las enzimas, que están presentes en todos los alimentos frescos, son sustancias catalizadoras que favorecen la degradación y los cambios químicos que afectan, en especial, la textura y el sabor. El oxígeno atmosférico puede reaccionar con componentes de los alimentos, que se pueden volver rancios o cambiar su color natural. Igualmente dañinas resultan las plagas de insectos y roedores, que son responsables de enormes pérdidas en las reservas de alimentos.

El deterioro del alimento presenta características diferentes dependiendo del tipo de cambio que intervienen que pueden ser: cambios no microbianos tanto internos como externos o bien cambios producidos por microorganismos.<sup>6</sup>

Las causas responsables de la aparición de estos cambios, que se traducen en fenómenos de alteración en los alimentos, por lo común se pueden clasificar en:

- **Físicas:** pueden aparecer durante la manipulación, preparación o conservación de los productos y, en general, no perjudican, por si solas, a la comestibilidad del alimento, pero si a su valor comercial. Un ejemplo de este tipo son los daños que pueden producirse durante la recolección mecánica, golpes durante la manipulación y heridas.
- **Químicas:** se manifiesta durante el almacenamiento de los alimentos, pero su aparición no es debida a la acción de enzimas. Son alteraciones más graves que las anteriores y con frecuencia puede perjudicar la comestibilidad del producto. Entre estas se puede citar el enranciamiento y pardeamiento.

---

<sup>5</sup> Teoría simplificada del secado de sólidos. El secado de sólidos en la industria química. G. Nonhebel, M.A., D.Sc., C. Eng., F.,F.R.I.C., M.I. Chem. E. Editorial Reverté, S.A. 1979

<sup>6</sup> Procesos de conservación de alimentos. Segunda edición. Casp, A. Abril, J.

- **Biológicas:** son sin dudas las más importantes, a su vez se pueden subdividir en:
  - Enzimáticas: por acción de enzimas propias del alimento, por ejemplo, la senescencia de las frutas.
  - Parasitarias: debidas a la infestación por insectos, roedores y pájaros. Importantes no solo por las pérdidas económicas que suponen los productos consumidos o dañados por ellos, sino por el hecho de que dañan al alimento y lo ponen a disposición de infecciones provocadas por microorganismos.
  - Microbiológicas: debidas a la acción de microorganismos, que son responsables de las alteraciones más frecuentes y más graves.

### **Métodos de conservación.**

La conservación de alimentos es importante para proveer alimentos sanos y de buena calidad a la población, por lo que utilizar diferentes métodos de conservación permite aprovechar al máximo, las cosechas de frutas y hortalizas que de no procesarse, alcanzarían niveles altos de pérdidas en campo mayores al 50%.<sup>7</sup>

A continuación se mencionan algunos métodos de conservación aplicados en alimentos:

- Métodos de conservación por acción corta:
  - Refrigeración.
  - Atmosfera modificada.
  - Tratamientos químicos superficiales.
  - Tratamientos especiales de almacenamiento y embalaje.
- Métodos de conservación por acción química:
  - Preservación con azúcar.
  - Preservación con sal.
  - Conservación por fermentación.
  - Regulación de acidez, pH.
  - Usos de aditivos químicos.
- Métodos de conservación por tratamientos físicos:
  - Uso de altas temperaturas, tratamiento térmico.
  - Uso de bajas temperaturas, congelamiento.
  - Deshidratación y concentración.
  - Uso de radiaciones ionizantes.

---

<sup>7</sup> Chacon, S. A., Manual de procesamiento de frutas tropicales a escala artesanal, en el salvador. Santa Tecla, La libertad, El Salvador. 2006.



### 1.3 CHILE HABANERO.

#### **Chile habanero.**

Como se muestra en la figura 1.1 el chile habanero (*Capsicum chinense* jaqs) es una baya hueca en forma de trompo, poco carnosa, con dos y hasta ocho hojas modificadas que constituyen el aparato reproductor femenino de la flor y se denominan carpelos.

Las características son: muy picante, aromático, de color generalmente verde antes de alcanzar la madurez; sin embargo, cuando madura puede presentar variantes de color amarillo y naranja.

La anatomía de la planta: las paredes que dividen el interior del fruto son incompletas y el extremo inferior se unen para formar unas estructuras membranosas que comúnmente se denominan con el nombre de venas, las cuales se insertan en la placenta que es de color blanco amarillento y de apariencia esponjosa. La placenta es el lugar donde se sintetizan los capsaicinoides (alcaloides responsables del sabor picante de todo el chile), principalmente la capsaicina y la dihidrocapsaicina.

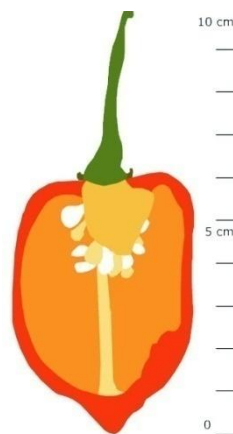


Figura 1-1. Dibujo que muestra en corte transversal la anatomía del chile habanero (*Capsicum chinense* jaq)

#### **Denominación de origen.**

En México, las regiones que producen esta variedad de chile son Baja California Sur, San Luis Potosí, Chiapas, Sonora, Tabasco y Veracruz. Más del 50% de la producción que es destinada a los mercados nacional e internacional proviene de los estados de Yucatán, Campeche y Quintana Roo. De ahí que productores y autoridades de Yucatán en 2006 promovieran ante el Instituto Mexicano de la Propiedad

Industrial (IMPI) la denominación de origen con lo que únicamente el chile habanero y sus derivados (como son las salsas) producidos en el estado de Yucatán puede ostentarse como “Chile habanero”.

En mayo del año 2008 el chile habanero recibe la denominación de origen en la región de la península de Yucatán.

**Usos:**

De la producción total de 3,390 toneladas en el año 2006<sup>8</sup>, el 75% se destino para su consumo en fresco, el 22% se utilizó por la industria en la elaboración de salsas y polvos, y el 3% se destinó a la obtención de semilla<sup>9</sup>. Se desconoce el valor de perdidas.

#### 1.4 SECADO.

**Deshidratación de alimentos:**

La deshidratación es una de las técnicas más antiguamente utilizada para la conservación de alimentos. El secado al Sol de frutas, granos, vegetales, carnes y pescados ha sido ampliamente utilizado desde los albores de la humanidad proporcionando al hombre una posibilidad de subsistencia en épocas de carencia. Hoy en día la industria de alimentos deshidratados constituye un sector muy importante dentro de la industria alimentaria extendiéndose por todo el mundo. El tamaño de las instalaciones varía desde simples secadores solares hasta grandes y sofisticadas instalaciones de secado. En el mercado se encuentra una amplia variedad de productos deshidratados (vegetales, frutas, carnes, pescados, cereales y productos lácteos) o formulados a partir de ingredientes deshidratados como es el caldo de las salsas y sopas en polvo<sup>10</sup>.

Generalmente se entiende por deshidratación la operación mediante la cual se elimina total o parcialmente el agua a la sustancia que la contiene. Esta definición puede ser aplicada a sólidos, líquidos o gases y tal como está expresada puede servir para describir varias operaciones unitarias como la evaporación y la adsorción. Sin embargo, su tratamiento teórico y la tecnología empleada las diferencian completamente.

---

<sup>8</sup> [www.inifap.gob.mx/quienes.../nota\\_chile\\_habanero-final.pdf](http://www.inifap.gob.mx/quienes.../nota_chile_habanero-final.pdf)

<sup>9</sup> [http://www.conaproch.org/ch\\_chiles\\_diccionario\\_chilehabanero.htm](http://www.conaproch.org/ch_chiles_diccionario_chilehabanero.htm)

<sup>10</sup> Maupoey, P. F. Andrés, A. M. Introducción al secado de alimentos por aire caliente. Pag 7

### Técnicas de deshidratación.

Las técnicas de deshidratación son variadas y dependen en gran parte de la especialidad o campo en la que se utilice, en este caso tomando en cuenta la eliminación de agua en productos agroalimentarios las técnicas de deshidratación más conocidas son:

- **El prensado.** También llamado compresión, es una operación que tiene por finalidad separar un líquido de un sistema de dos fases sólido-líquido, comprimiendo el sistema en condiciones que permitan al líquido fluir y salir mientras el sólido queda retenido entre las superficies compresoras. Un ejemplo de esta técnica se observa en la figura 1.2.

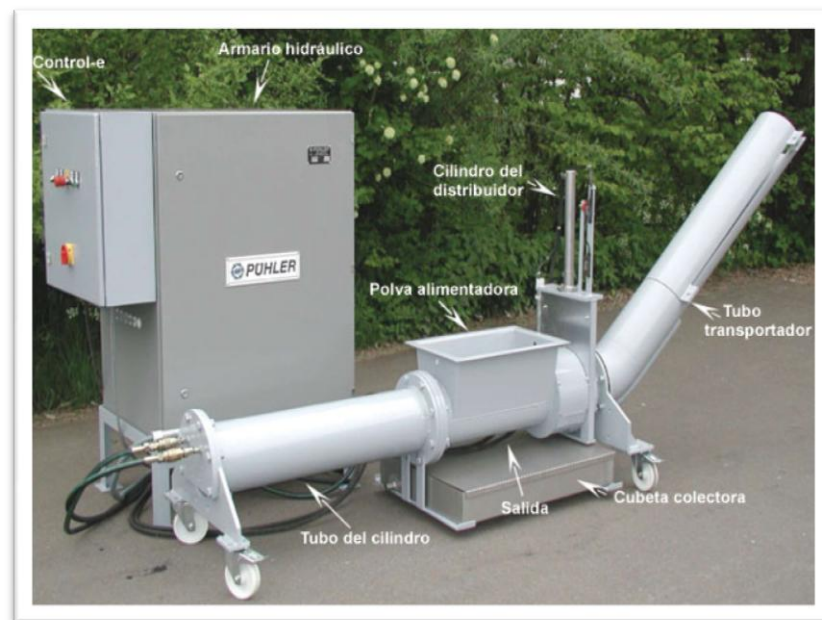


Figura 1-2. Fotografía en donde se observa el equipo de deshidratación por prensado

- **Ósmosis.** Cuando un producto se sumerge en una disolución concentrada de sal o azúcar, se produce un flujo de agua desde el interior de las células del alimento hacia la disolución más concentrada a través de una membrana semipermeable (membrana celular). Este flujo se establece a causa de una diferencia entre el potencial químico del agua en el alimento y en la solución que lo rodea. Un equipo que se utiliza para esta técnica se observa en la figura 1.3.



Figura 1-3. Fotografía en donde se muestra el equipo y aditamentos para llevar a cabo el método de deshidratación por ósmosis.

- **Liofilización.** En esta operación, el líquido a eliminar, previamente congelado, se separa del producto que los contiene por sublimación. De ahí que sea necesario partir del material congelado y trabajar en condiciones de vacío. En la figura 1.4, se ilustra el equipo requerido para llevar a cabo la operación.

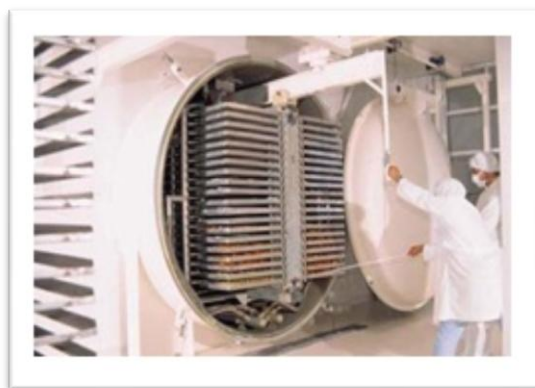


Figura 1-4. Fotografía en donde se observa el equipo utilizado en el método de deshidratación por liofilización.

- **Centrifugación.** Al aplicar a un material mojado una fuerza centrífuga suficiente elevada, el líquido contenido en el material se desplaza en la dirección de la fuerza, produciendo así una separación del líquido y del sólido. En la figura 1.5, se observa el equipo utilizado para esta operación.

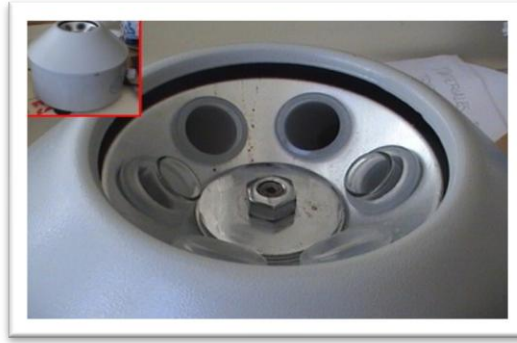


Figura 1-5. Fotografía en donde se muestra el equipo utilizado en el método de deshidratación por centrifugación.

### Clasificación de secadores de productos agrícolas.

Una clasificación de los equipos de secado se pueden hacer con base a:

- Las características y propiedades físicas del producto húmedo. Procedimiento apropiado para la selección de un grupo de secadores para su estudio preliminar en un problema dado.
- El procedimiento para transmitir el calor al sólido húmedo. Más interesante industrialmente y revela diferencias en el diseño y funcionamiento de los secadores.

De acuerdo al segundo criterio se distinguen los **secadores directos**, que utilizan gases calientes en contacto con el sólido húmedo para suministrar el calor y arrastrar el líquido vaporizado, los **secadores indirectos** en los que el calor se transmite al sólido húmedo a través de la pared que lo contiene, eliminándose el líquido vaporizado independientemente del medio calefactor, así puede haber: secadores dieléctricos y secadores por radiación.

### Tipos de secadores.

**Secadores de bandejas:** Normalmente funciona en régimen intermitente. Está formado por una cámara metálica rectangular que contiene unos soportes móviles sobre los que se apoyan los bastidores. Cada bastidor lleva un cierto número de bandejas poco profundas, montadas unas sobre otras con una separación conveniente que se cargan con el material a secar. En la figura 1.6 se observa el equipo y un ejemplo de las bandejas colocadas en el bastidor móvil.

Se hace circular aire caliente entre las bandejas por medio del ventilador acoplado al motor haciéndole pasar previamente por el calentador constituido por un haz de tubos por cuyo interior circula normalmente vapor de agua. Los tabiques distribuyendo uniformemente el aire sobre las pilas de bandejas.

Por medio del conducto de salida se evacua continuamente aire húmedo y a través de la abertura de entrada penetra aire fresco. Al final del ciclo de secado, normalmente largo, se saca de la cámara al conjunto de los bastidores para proceder a la descarga del producto seco y una nueva carga.



Figura 1-6. Fotografía en donde se muestra el secador de bandeja o armario.

El secado de este equipo puede ser:

- De flujo horizontal, si el aire circula paralelamente al lecho a secar.
- De flujo transversal, si el aire circula perpendicularmente al lecho a secar.

Los secadores de bandejas son útiles para secar pequeñas cargas de productos valiosos. En general se aplican cuando la capacidad necesaria no excede de 25 a 50 kg/h de producto seco.

En ellos se puede secar prácticamente cualquier material, pero a causa de la mano de obra requerida para la carga y descarga, su operación resulta costosa para su baja capacidad de producción.

**Secador de túnel:** Son semejantes a los secadores de bandejas pero de funcionamiento semi continuo, para lo cual las bandejas conteniendo el producto a secar se cargan sobre carretillas que se trasladan a lo largo del túnel de secado. Un ejemplo de estos equipos se observa en la figura 1.7.

Cuando se introduce una nueva carretilla, la primera es evacuada conteniendo el producto seco, mientras las restantes adelantan una posición en su trayectoria.



Figura 1-7. Fotografía de un secador de túnel

**Secador tipo tambor:** El secado en estos equipos (figura 1.8) se basa en la colocación del alimento, líquido o semilíquido, sobre la superficie interior de un cilindro horizontal que gira lentamente y en la eliminación del agua en el curso de aproximadamente 300° de una revolución.

El cilindro es calentado interiormente con vapor de agua a presión y menos frecuente, con agua caliente u otro líquido transmisor a elevada temperatura. El producto seco se separa en forma de película continua mediante una cuchilla que rasca longitudinalmente la superficie del cilindro.



Figura 1-8. Fotografía del secador tipo tambor en operación.

**Secador de lecho fluidizado:** Los secadores modernos en lecho fluidizado pueden adoptar muchas formas, pero básicamente consiste en una simple cámara provista en su base de una rejilla para distribuir uniformemente los gases calientes a lo largo y ancho del lecho. Un modelo de este equipo se observa en la figura 1.9.

El producto se mantiene en estado fluidizado (a veces con la ayuda de una vibración mecánica) con lo que se consigue una gran superficie efectiva de contacto entre el sólido que se seca y el aire. Este hecho, unido a que el sólido, en el lecho fluidizado, está sometido a una acción de mezcla muy intensa, permite utilizar aire caliente a temperaturas muy elevadas. De este modo se consiguen grandes velocidades de transferencia de materia entre el sólido y el aire y por lo tanto tiempos de secado muy cortos. Esto hace que la retención en el secador sea pequeña siendo necesarias instalaciones relativamente pequeñas que ocupan poco espacio en planta.



Figura 1-9. Fotografía del secador de lecho fluidizado.

### **Deshidratación por aire caliente:**

En este proceso se realiza debido a la transferencia de calor por convección mediante el contacto directo de la sustancia con el aire caliente en el cual tiene lugar la evaporación. Para que el proceso de secado se realice eficientemente, se requiere de establecer las condiciones básicas del proceso como son: temperatura, humedad relativa del aire de secado, flujo de aire, tamaño y forma del producto (humedad, tamaño, forma física y estructura).

La temperatura del aire caliente constituye un parámetro básico en el proceso de deshidratación con aire caliente. El incremento de la temperatura aumenta la difusividad del agua dentro del producto, acelerando de esta forma el proceso. Pero no se debe hacer un excesivo incremento de la temperatura, porque provoca



deterioro de la calidad del producto, debido a que se pueden presentar reacciones de pardeamiento, formación de costra superficial, gelatinización de los productos que presentan altos contenidos de almidones y pérdidas de compuestos volátiles (aromas).

El tiempo de secado depende en gran medida de la cantidad de aire que pasa a través del producto. Por lo tanto, se debe establecer la cantidad de producto que se quiere secar por unidad de tiempo y dimensionar el flujo de aire que se requiere para tal fin.

Otro factor importante son el tamaño y la forma de los trozos del producto a deshidratar. La velocidad de secado de un trozo delgado de producto húmedo, es inversamente proporcional al cuadrado del espesor de la pieza. Esta relación está basada en el hecho de que se presenta una mayor resistencia para remoción de la humedad en las áreas internas que en las áreas extremas. Como consecuencia de esto, se puede disminuir el tiempo de secado, si se tiene unos tamaños de partículas adecuados.

## CAPÍTULO 2 . SECADO.

En el capítulo que a continuación se presenta, se describen los fundamentos teóricos para el estudio de la deshidratación del chile habanero, desde un resumen de las teorías y leyes térmicas que dan razón del estudio en este trabajo, hasta la dinámica que se ejerce sobre el material sometido al proceso de secado.

Se presentan los principios y variables que intervienen en los métodos de secado solar y los diversos factores climatológicos para el máximo aprovechamiento del recurso natural aplicado en el secado.

### 2.1 FUNDAMENTOS TEORICOS DEL SECADO.

#### **Fundamentos de secado.**

La deshidratación es una operación en la que está presente el transporte simultáneo de calor y masa. En esta operación debe aportarse el calor sensible y el calor de sublimación necesario para la evaporación, o sublimación, mientras el agua o el vapor de agua se transportan por el interior del alimento hasta la superficie de evaporación de donde el vapor de agua se transfiere desde la superficie del alimento hacia la atmosfera circundante. Los mecanismos por los que el calor se transfiere al alimento proporcionan como se ha visto anteriormente un criterio de clasificación de los tipos de secadores más utilizados actualmente. Por ser los secadores por aire caliente o convectivos los más utilizados en la industria alimentaria, este trabajo se centra en la operación de secado convectivo con aire caliente.<sup>11</sup>

#### **Características a tomar en cuenta en el proceso de secado.**

La velocidad con la que se seca un producto depende de varios factores, algunos directamente relacionados con el producto y otros relacionados con el aire de secado, entre los que cabe destacar:

- Isoterma de sorción del producto.
- Dimensiones del producto.
- Velocidad superficial relativa del aire respecto al sólido
- Temperatura del aire.

---

<sup>11</sup> Maupoey, F. P., Grau, A. M. Introducción al secado de alimentos por aire caliente.

- Humedad relativa (HR).

### Transferencia de calor.

La transferencia de calor de los alrededores evapora la humedad de la superficie, la cual puede ser transportada a la superficie del producto y ahí ser evaporada o se evapora internamente y luego es transportada como vapor a la superficie.<sup>12</sup>

El ciclo típico de secado consiste en tres etapas: 1) Calentamiento del alimento a la temperatura de secado. 2) Evaporación de la humedad de la superficie del producto hasta que se alcance el contenido de humedad crítico y 3) La etapa de velocidad de secado decreciente.<sup>13</sup> En la figura 2.1, se representa con un modelo físico la operación unitaria de secado. La fuente de calor que generalmente es aire, suministra el calor latente necesario para evaporar la humedad del alimento y actúa al mismo tiempo como un sumidero de calor.

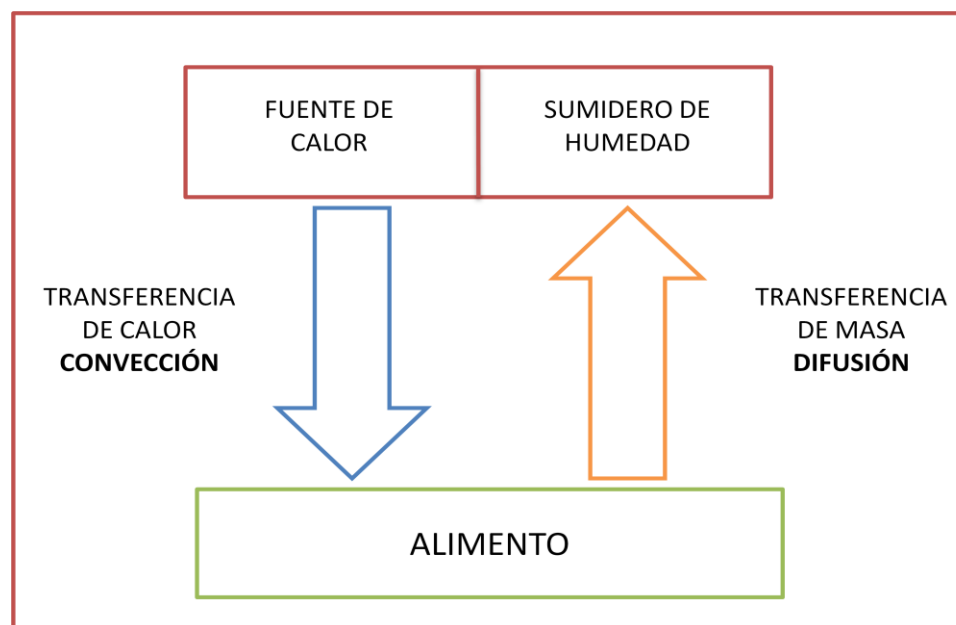


Figura 2-1. Esquema del modelo físico del secado.

### Concepto de difusión.

Usualmente en sistemas complejos se utiliza para describir la velocidad con que un determinado componente del sistema se transfiere de un lugar a otro del mismo, aunque los mecanismos por los que esta

<sup>12</sup> Heldman, D. R., y Lund, D. B. Marcel Dekker, Food engineering handbook. Inc. New York. 1992.

<sup>13</sup> Rodríguez, J. A. Principios de secado. Universidad Autónoma de Baja California Sur.

transferencia ocurre no responden a una pura difusión molecular, que tiene lugar cuando existen en el sistema gradientes de concentración y las sustancias se transfieren de una región a otra impulsada por el movimiento de las moléculas.

### Difusividad del agua en alimentos.

Los mecanismos propuestos de transporte de humedad son numerosos y a menudo complejos. Los mecanismos del transporte de humedad durante el secado son la difusión de presión, difusión térmica, difusión forzada y difusión ordinaria (transporte neto de material sin movimiento del fluido)<sup>14</sup> en la figura 2.2 se ilustran algunos de estos mecanismos.

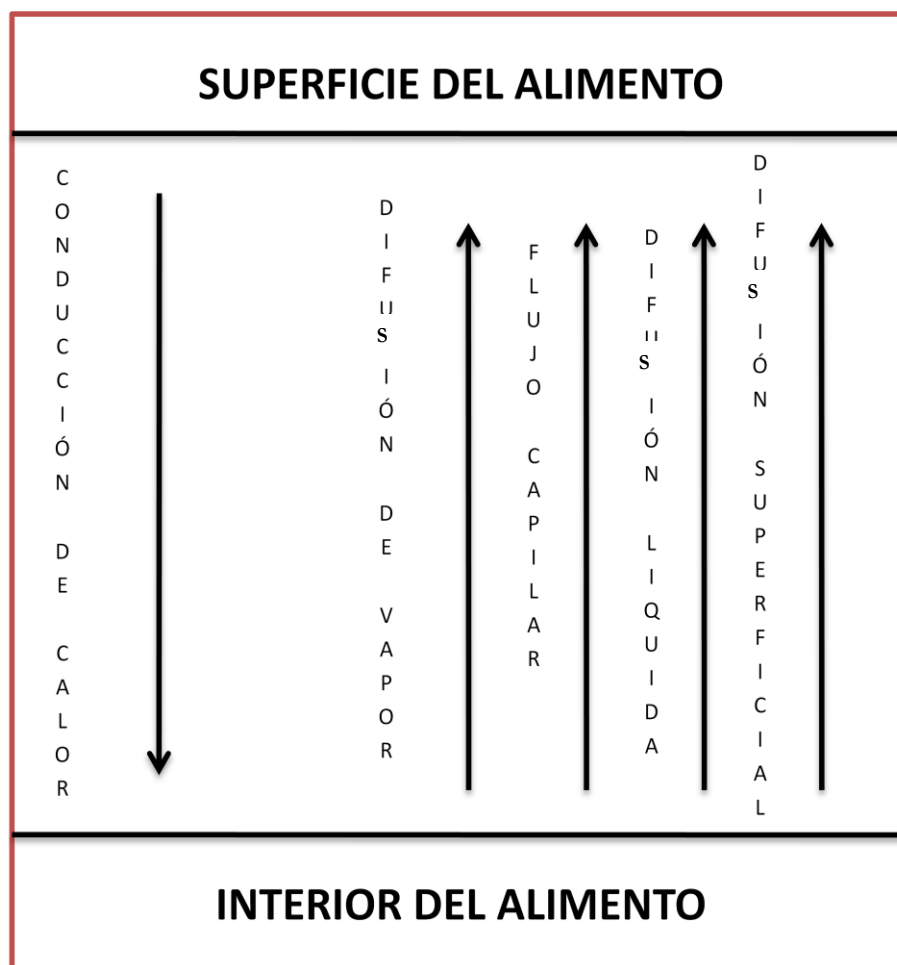


Figura 2-2. Ilustración del mecanismo de transferencia de humedad.

<sup>14</sup> Van Arsdel, W. B. Food Dehydration, Vol. 1. Avi. Westport, Connecticut. 1963.

Para el secado de alimentos, a menudo se asume que el mecanismo de transporte de humedad dominante es por difusión y la velocidad de movimiento de agua se describe por un valor denominado de la **difusividad efectiva** ( $D_{eff}$ ).

$$D_{eff} = S \times 4 \times L^2 \quad (1)$$

donde: S es la pendiente y L es el espesor del material.

### Conceptos básicos asociados con el proceso de secado.

La terminología y los conceptos básicos asociados con el secado son los siguientes:

- **Contenido de humedad:** Es el contenido de humedad de un sólido dividido entre el peso del sólido seco o húmedo (contenido de humedad base seca (bs,  $X$ ) y contenido de humedad base humedad (bh,  $M$ ) respectivamente.)

$$X = \frac{m - m_s}{m_s} \quad (2)$$

$$M = \frac{m - m_s}{m} \quad (3)$$

Las equivalencias entre estas expresiones son:

$$X = \frac{M}{1 - M} \quad (4)$$

$$M = \frac{X}{1 + X} \quad (5)$$

La humedad asociada a un producto puede estar presente como:

- **Humedad no ligada:** Es la humedad en exceso del contenido de humedad en equilibrio.
- **Humedad ligada:** Es la humedad que se encuentra unida fuertemente al alimento, tiene propiedades diferentes a las del seno del líquido.

- **Contenido de humedad libre:** Es la humedad atrapada mecánicamente en los espacios vacíos del sistema y tiene propiedades similares a las del seno líquido.
- **Contenido de humedad de equilibrio:** Es el contenido de humedad de un producto en equilibrio con las condiciones de temperatura y humedad de los alrededores. Cuando el aire es puesto en contacto con un material húmedo, se alcanza eventualmente un equilibrio entre el aire y el alimento. Una gráfica del contenido de humedad de equilibrio contra la humedad a diferentes temperaturas es usada para ilustrar el efecto de la temperatura. El contenido de humedad de equilibrio usualmente disminuye con un aumento en la temperatura y depende si la cantidad de humedad es llevada de mayor a menor (desorción) o de menor a mayor (adsorción)

Los diferentes tipos de humedad presentes en un sólido de humedad  $M$ , expuesto a un gas de humedad relativa conocida  $\psi$  se muestra gráficamente en la figura 2.3

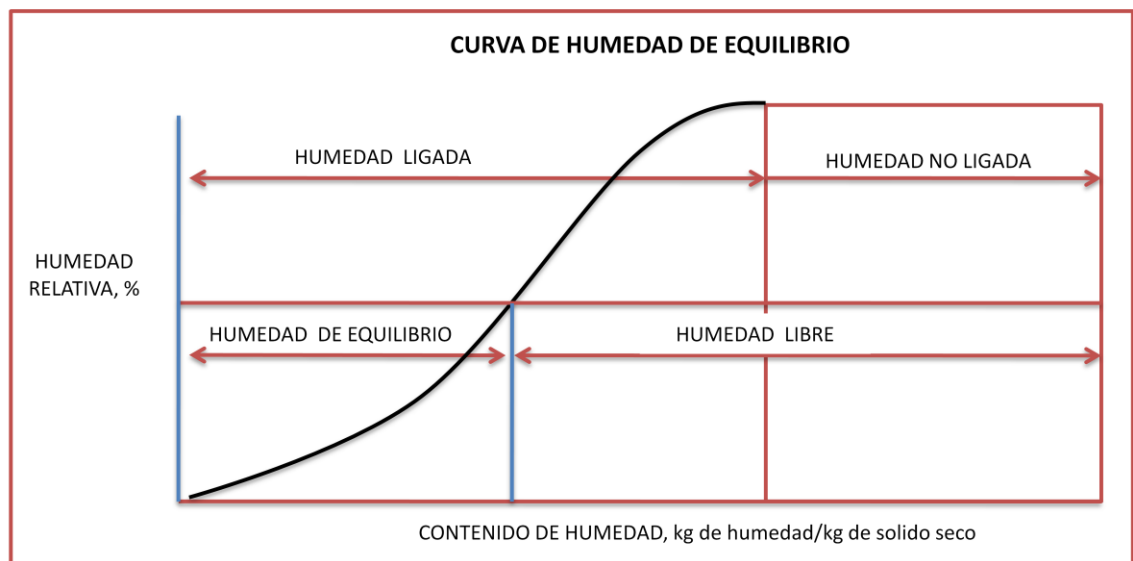


Figura 2-3. Gráfica de la curva de los diferentes tipos de humedades en un sólido.<sup>15</sup>

- **Curva de secado:** Si durante una prueba (experimento) de secado, se mantienen constantes todas las variables y se determinan periódicamente el contenido de humedad del sólido se obtiene una serie de datos que pueden Gráficarse en un sistema coordinado, en la forma X (contenido de

<sup>15</sup> Treybal, R. E. Mass – Transfer Operations. Thirt Edition. Singapore. 1981

humedad base húmeda del material) frente a  $t$  (tiempo transcurrido desde que se inició la operación de secado), dando lugar a una curva típica de secado como la que se muestra en la figura 2.4.

En algunos casos, el contenido inicial de humedad puede estar por debajo del valor crítico y el secado transcurrirá completamente con velocidad decreciente sin periodo de velocidad constante. Las curvas de velocidad decreciente pueden ser cóncavas, convexas o aproximarse a una línea recta; pueden presentar un punto de inflexión cuando ocurre un cambio en la forma física del material, como por ejemplo, cuando se produce contracción y rotura y cuando se forma una película en la superficie del material parcialmente seco.

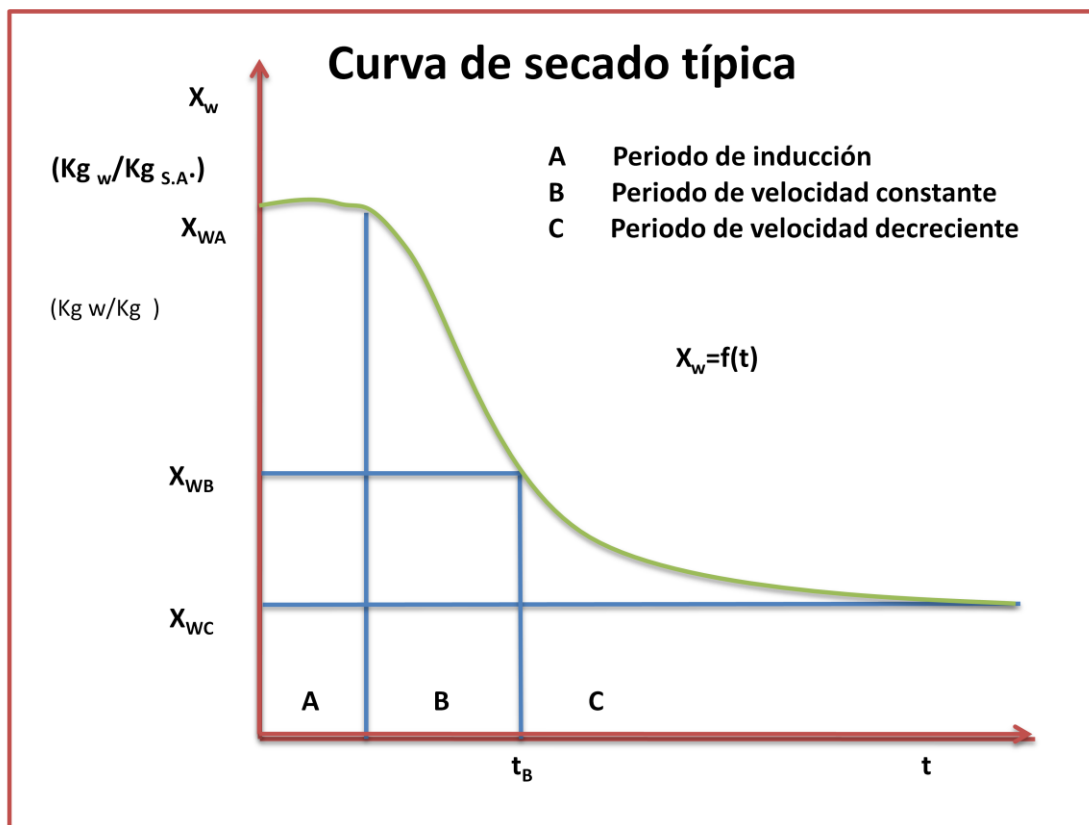


Figura 2-4 Gráfica de la curva típica de secado de materiales húmedos.

La figura 2.4 muestra una curva típica de materiales muy húmedos en la que se observan tres zonas características:

- Una primera zona A, en la cual la pendiente de la curva aumenta ligeramente con el tiempo y se denomina “Periodo de inducción”.

- Otra zona B, de pendiente constante.
- Y una tercera zona C, en la cual la pendiente disminuye con el tiempo.

En los materiales con humedades iniciales bajas, el secado transcurre en todo momento con velocidad de secado decreciente.

- **Velocidad de secado:** Se define velocidad de secado como la velocidad con que disminuye la humedad del producto por unidad de tiempo por unidad de superficie de secado, es decir:

$$v_s = -\frac{dX_w}{dt} \quad (6)$$

Por tanto, la pendiente de la curva de secado ( $dX_w/dt$ ) nos da la velocidad de secado, en la que también pueden diferenciarse las tres zonas definidas anteriormente como puede verse en la figura 2.5, así como su correspondencia con la curva de secado.

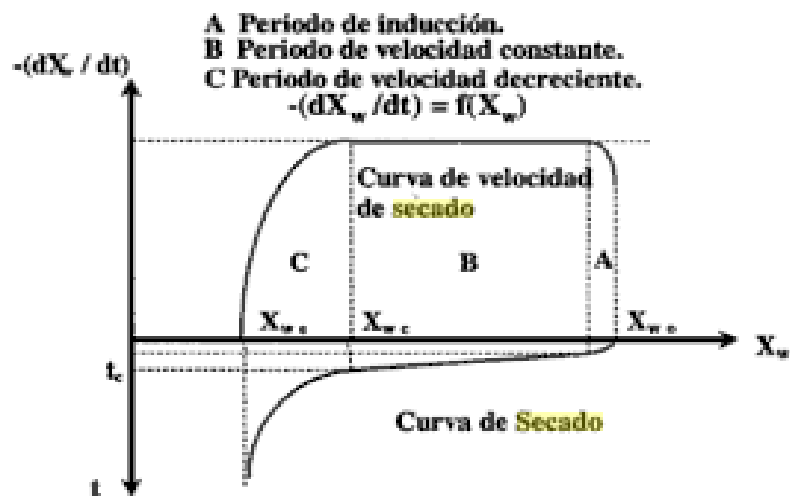


Figura 2-5. Gráficas de las curvas típicas de secado y de velocidad de secado.

### Etapas típicas en la operación de secado.

#### *Período de inducción o de velocidad de secado creciente (A-B).*

En esta etapa se inicia el proceso de secado de manera que el producto se calienta y aumenta la temperatura de la interface, produciéndose una adaptación del material a las condiciones de secado.



Este periodo depende también de numerosos factores, su duración será función del contenido inicial de humedad del sólido, de su temperatura y de la velocidad del aire. Pero a los fines de cálculo se prescinde de él, ya que se considera que en su transcurso el secado tiende al régimen estacionario, es decir a los periodos B y C, en los que se centra el estudio de secado.

### ***Período de velocidad de secado constante (B-C).***

La expresión *periodo de secado a velocidad constante*, es a veces confusa, pues la velocidad solo es constante si las condiciones externas son constantes, y por ello sería mejor denominarlo *periodo de secado de bulbo húmedo*, sin embargo, la primera expresión es la más usada, y su uso se mantiene.

La velocidad con que se elimina agua de la superficie del sólido es menor que la velocidad con que llega a ella desde el interior mismo. De esta manera la superficie del material se mantiene constantemente mojada y se comporta como una masa de líquido. De aquí que la velocidad de secado sea igual a la velocidad de evaporación del agua, que será a su vez proporcional a la velocidad del flujo de calor que llega desde el aire al sólido. En tales condiciones, la temperatura de la interface será constante y el calor que llega al sólido se invierte totalmente en evaporar el líquido. A medida que transcurre el tiempo, el sólido se va secando y llega un momento en el que la velocidad con que el agua llega a la superficie se hace menor que la velocidad de evaporación que implicaría el uso de toda la energía que llega del aire en evaporar agua del alimento. Desde este momento parte del calor que llega al sólido se invierte en calentarlo. El contenido de humedad del producto en dicho instante se conoce como humedad crítica ( $X_{WA}$ ).

El contenido de humedad crítico depende en parte de las condiciones externas del secado, pero a menudo en la práctica, su variación es menor que la incertidumbre de su valor exacto.

Después de pasar este punto el producto empieza una etapa de cambios muy significativos como son: la velocidad de secado tiende a disminuir y el color y la rugosidad de la textura del producto aumentan<sup>16</sup>.

### ***Modelos que definen el período de velocidad constante<sup>17</sup>.***

Transferencia de masa:

---

<sup>16</sup> Introducción a las operaciones de separación. Marcilla, A. Publicaciones de la Universidad de Alicante. 1999.

<sup>17</sup> Torres, E. Notas del curso: Secado Solar. XXVI Semana Nacional de Energía Solar, Chetumal, Quintana Roo. México. 2002.

$$\frac{dm}{dt} = Ak_g(P - p_v) \quad (7)$$

Transferencia de calor:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{Ah_c(T_a - T_{bh})}{\lambda} \quad (8)$$

Transferencia interna de humedad:

$$-\frac{dm}{dt} = D\rho_s A \frac{dm}{dx} \quad (9)$$

Para determinar la velocidad de secado durante el periodo constante expresada en términos de la transferencia de calor, puede escribirse, que el calor sensible que proporciona el aire para la evaporación de cierta cantidad de agua del material, es igual al flujo de calor entre la superficie a secar a la temperatura del bulbo húmedo y la corriente de aire a la temperatura de bulbo seco, lo cual se expresa como sigue:

$$q_s = W_x C_p (T_{bs} - T_{bh}) = h_c A (T_{bs} - T_{bh}) \quad (10)$$

Donde  $W_x$  es el flujo másico del aire. Ahora, si se tiene que el calor latente de vaporización del agua, ecuación 11, es igual al calor total transferido  $q_s$  evaluado en la ecuación 10 y se puede describir:

$$\lambda = C_p (T_{bs} - T_{bh}) \quad (11)$$

$$q_L = W\lambda = h_c A (T_{bs} - T_{bh}) \quad (12)$$

por lo tanto,

$$W = \frac{h_c A}{\lambda} (T_{bs} - T_{bh}) \quad (13)$$

donde,  $W$  es la masa de agua evaporada por unidad de tiempo y se expresa como en la ecuación 8,

$$W = \frac{dm}{dt}$$

***Período de velocidad de secado decreciente.***

Al final del período de velocidad de secado constante el material alcanza el contenido crítico de humedad, caracterizado porque el suministro de agua desde el interior del material es insuficiente para mantener la superficie en condiciones de saturación, se incrementa la resistencia del flujo de agua hacia esta, haciendo retroceder el frente de evaporación hacia el interior del material, paralelamente la temperatura en la superficie del material tiende a la temperatura del bulbo seco de la corriente de aire. Como consecuencia la velocidad de secado decrece.

En los casos en los que la disminución de la velocidad de secado es lineal con el contenido de humedad, se supone que la evaporación del agua que contiene el material continua produciéndose en la misma forma que en el periodo de velocidad constante, con la salvedad de que no ocurre en toda la superficie, ya que comienzan a aparecer zonas secas, de manera que la velocidad de secado disminuye a medida que lo hace la superficie mojada; llega así un momento en el que toda la superficie queda seca y entonces se supone que el proceso continua en una de las dos formas siguientes.

1. Si existe un frente de evaporación que se desplaza hacia el centro del sólido, de manera que el vapor que se produce es el que se difunde a través de la masa seca hacia el exterior, la velocidad de secado dependerá de la velocidad de difusión de dicho vapor.
2. El otro mecanismo posible sería el de difusión del líquido a través de la masa solida y su posterior evaporación en la superficie, por lo que la velocidad de secado dependerá de la velocidad de difusión del líquido.

Existen diversas teorías para explicar los mecanismos relacionados con el periodo de velocidad de secado decreciente, como son los modelos basados en la capilaridad, difusión de vapor ó líquido y gradientes térmicos y de concentración.

El fenómeno puede ser interpretado en términos de contenido de humedad, mediante la ley de Fick:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (14)$$

Esta ecuación se resuelve en forma analítica para la difusión de agua en un sólido en una dimensión y se obtiene la ecuación 15<sup>18</sup>.

$$Y = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp \left[ -(2n-1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{L^2} \right] \quad (15)$$

Donde Y es un número adimensional que representa el contenido de humedad del sólido,  $X_0$  es el contenido de humedad inicial en base seca;  $X_e$  es la humedad de equilibrio en base seca; t es el tiempo de secado y L es el espesor del material que se seca.

- **Psicometría del aire de secado.**

- **Generalidades:**

- **Propiedades aire seco.**

El aire que respiran todos los seres vivos se debe considerar como **aire húmedo**, ya que es una mezcla de aire seco y vapor de agua.<sup>19</sup> El **aire seco** es una mezcla de gases, que en espacios exteriores al nivel del mar está compuesto por las proporciones indicadas en la tabla 2.1.

Tabla 2-1. Proporciones de volumen en gases.

Volumen	Gas	Símbolo
78%	Nitrógeno	N <sub>2</sub>
21 %	Oxígeno	O <sub>2</sub>
0.96 %	Argón...	Otros
0.04 %	Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>

<sup>18</sup> Crank, J. The mathematics of diffusion. Pergamon Press. Oxford. 1975.

<sup>19</sup> Martín, M. Manual Calor. Manuales de diseño ICARO, Ayuntamiento de las palmas de Gran Canaria. 2006.

La temperatura del aire, tomada con un termómetro normal, se denomina **Temperatura Seca** ( $T_s$ ) y se mide en grados centígrados ( $^{\circ}\text{C}$ ) en escala Celsius, o en grados absolutos en escala Kelvin ( $^{\circ}\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273^{\circ}$ ).

La cantidad de aire se suele medir por su **volumen** ( $\text{m}^3$ ), pero en física se prefiere utilizar la unidad de masa, que es el (**Kg de aire seco**), ya que el volumen ocupado depende de la Temperatura Seca, además de la presión, en función de la **Ley de los gases perfectos (16)**:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (16)$$

La ley de los gases perfectos también se puede expresar de forma simplificada indicando que 1 Kg-mol de gas a  $T = 273^{\circ}\text{K}$  ( $0^{\circ}\text{C}$ ) y  $P = 1$  atmósfera ocupa  $V = 22.4 \text{ m}^3$ .

La **densidad** de un gas es  $\rho = M/V$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ). Considerando que el peso molecular aparente del aire es  $P_m = 29$ , se puede deducir de la ecuación general que la densidad del aire seco a 1 atm de presión es inversamente proporcional a su temperatura absoluta:

$$\rho(\text{kg}/\text{m}^3) = 353/T(^{\circ}\text{K}) \quad (17)$$

El **volumen específico**  $ve = V/M$  ( $\text{m}^3/\text{kg}$ ) es el inverso de la densidad ( $ve = 1/\rho$ ) y aumenta proporcionalmente a la temperatura absoluta, tal como se aprecia en la siguiente tabla para 2 atmósfera de presión:

Tabla 2-2. Tabla de Volumen específico y densidad para 1 atm.

$T_s$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$0^{\circ}$	$10^{\circ}$	$20^{\circ}$	$30^{\circ}$	$40^{\circ}$
$T_s$ ( $^{\circ}\text{K}$ )	$273^{\circ}$	$283^{\circ}$	$293^{\circ}$	$303^{\circ}$	$313^{\circ}$
$ve$ ( $\text{m}^3/\text{Kg}$ )	0.77	0.80	0.83	0.86	0.89
$\rho$ ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )	1.29	1.25	1.20	1.16	1.13

○ **Propiedades aire húmedo.**

El aire húmedo es una mezcla de aire seco y vapor de agua. Un volumen de aire seco en contacto con el agua líquida tiende a evaporarla hasta saturarse de vapor de agua. La proporción del vapor de agua que puede contener una masa de aire seco aumenta con la temperatura, pudiendo ocupar todo el volumen a 100°C.

El **aire húmedo saturado** contiene la máxima proporción de vapor que puede admitir el aire seco a una temperatura (el fenómeno se debe a que la proporción entre la presión parcial del vapor de agua y la de aire seco es igual a la proporción de sus volúmenes. En el caso del aire húmedo saturado, la presión parcial del vapor de agua se iguala a la “presión de vapor” del agua líquida a la misma temperatura), no admitiendo una mayor cantidad de vapor aunque este en contacto con agua líquida, e incluso tendrá que condensar parte de su vapor, formando niebla, si disminuye la temperatura.

Si en una bolsa se estanca y a presión normal se introduce un kilogramo de aire seco y suficiente agua líquida, el agua tenderá a evaporarse hasta saturar el vapor de aire seco. La proporción de esta masa de vapor de agua en la masa del aire se denomina **humedad de saturación (Ws)** y se mide en gramos de vapor de agua por kilogramo de aire seco (kgVA/kgAS). La humedad de saturación Ws depende exclusivamente de la temperatura seca, con un rápido incremento según la tabla 2.3:

Tabla 2-3. Tabla de humedad de saturación a diferentes temperaturas.

Temperatura (°C)	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°
Ws(kgVA/kgAS)	3.7	5.4	7.6	10.7	14.4	20	27.1	36.4	49
Presión vapor (mbar)	6	9	12	17	23	32	43	58	78

La humedad de saturación ( $W_s$ ) también se puede expresar como **presión de vapor (mbar)**, existiendo una equivalencia aproximada de  $1 \text{ (gVA/KgAS)} = 1.6 \text{ (mbar)}$  a temperaturas moderadas (de  $0^\circ - 30^\circ$ ).

- **Diagrama psicométrico.**

La relación entre la temperatura seca ( $T_s$ ) y la humedad de saturación del aire húmedo, se muestra en la figura 2.6:

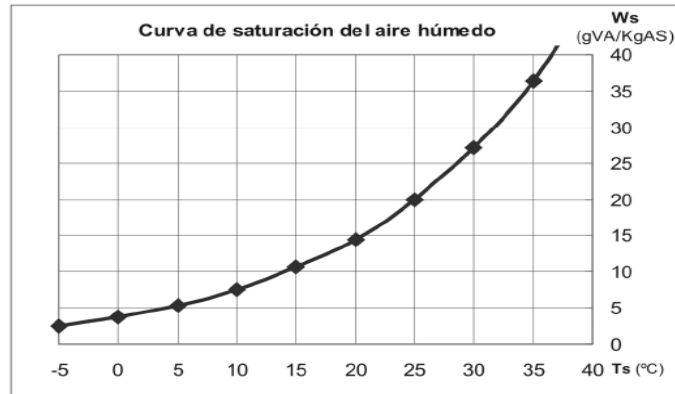


Figura 2-6 Diagrama en donde se observa la curva de saturación del aire húmedo.

La representación Gráfica de las combinaciones posibles de temperatura seca y humedad absoluta del aire húmedo, y su relación con otras propiedades físicas, se denomina **Diagrama Psicrométrico o Abaco de Mollier**, y se presenta en la figura 2.7:

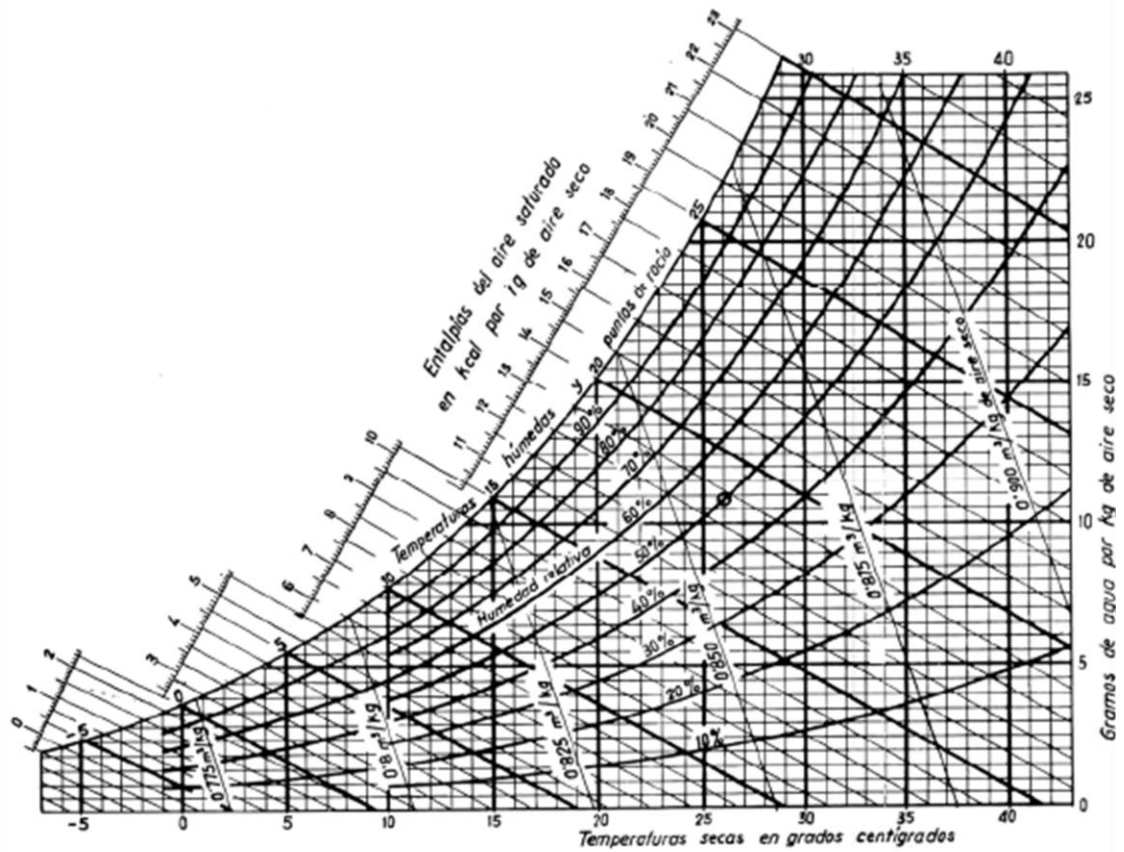


Figura 2-7 Diagrama psicrométrico ASHRAE (Guy-Fawcett, 1975)

Este diagrama aparenta ser francamente complejo, pero en la práctica se puede utilizar como una potente calculadora gráfica que permite representar y cuantificar todos los procesos físicos que se puedan producir con el aire húmedo.

### Parámetros psicrométricos.

La **psicrometría** es el estudio de los fenómenos físicos y térmicos en el aire húmedo, entendido como mezcla de aire seco y vapor de agua. Los parámetros que se pueden estimar de una determinada masa de aire húmedo son los siguientes:

La **temperatura seca (Ts)** es uno de los parámetros fundamentales, la cual se puede medir mediante un simple termómetro.

La proporción de vapor de agua mide la humedad absoluta (W), y se puede representar como un punto en la zona inferior de la curva de saturación. También será posible determinar su **humedad relativa**



**(HR)**, como porcentaje (%) de la humedad absoluta respecto a la humedad de saturación. En el diagrama psicrométrico figuran las curvas de diferentes humedades relativas:

$$HR = \left( \frac{W}{W_s} \right) \times 100[\%] \quad (18)$$

Cuando una masa de aire húmedo se enfría puede llegar a una temperatura tal que su humedad absoluta coincidirá con su humedad de saturación, lo que se denomina **Temperatura de punto de rocío (Trp)**. Dicho aire saturado, si se sigue enfriando hasta  $T_s'$ , condensará en forma líquida el vapor de agua que no es capaz de soportar, disminuyendo la humedad absoluta ( $W-W'$ ).

La **entalpía (E)** es la cantidad de calor acumulado en una masa de aire (kJ/kg o kcal/kg), debido a la suma de **calor sensible (Qs)**, empleado en calentar el aire hasta su temperatura seca, mas el **calor latente (Ql)** que ha absorbido su vapor de agua para pasar de líquido a gas.

La entalpía toma como valor de referencia ( $E=0$ ) el calor acumulado en un aire totalmente seco ( $W=0$ ) a la temperatura  $T_s = 0^\circ\text{C}$ . Analíticamente se puede estimar conociendo el calor específico de aire  $\gamma_a = 0.24 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C} = 1.00 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ , y que el calor de vaporización del agua en el aire equivale a  $C_v = 0.6 \text{ kcal/g} = 2.5 \text{ kJ/g}$ , según la siguiente expresión:

$$E = Q_s + Q_l = \gamma_a \times T_s + C_v \times W \quad (19)$$

$$E \left( \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right) = 0.24 \left( \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}^\circ\text{C} \right) \times T_s(^\circ\text{C}) + 0.60 \left( \frac{\text{kcal}}{\text{g}} \right) \times W \left( \frac{\text{gVA}}{\text{kgAS}} \right) \quad (20)$$

$$E \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = 1.00 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}^\circ\text{C} \right) \times T_s(^\circ\text{C}) + 2.5 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{g}} \right) \times W \left( \frac{\text{gVA}}{\text{kgAS}} \right) \quad (21)$$

La entalpía también se puede determinar directamente en el diagrama psicrométrico (mediante la escala graduada a la izquierda de la curva de saturación) al igual que todos los parámetros definidos anteriormente.

La temperatura húmeda ( $T_h$ ) se puede medir con un **termómetro de bulbo húmedo**, sometido a una fuerte corriente de aire, que registrará una temperatura inferior a la temperatura seca ( $T_s$ ) registrada por un termómetro de bulbo seco. Un sicrómetro es un aparato con ambos tipos de termómetros que se

utiliza para determinar con precisión la temperatura absoluta y el resto de los parámetros a partir de las temperaturas seca y húmeda.

Por último, el diagrama también permite estimar el **volumen específico (ve)** ( $\text{m}^3/\text{Kg}$ ) de una masa de aire húmedo, mediante las líneas diagonales casi verticales. Se puede observar el aumento del volumen específico con la temperatura, pero también con el incremento de la humedad absoluta, puesto que el vapor de agua es bastante más ligero que el aire, con un volumen específico 1.6 veces mayor.

Una consecuencia de la menor densidad del aire relativamente cálido y húmedo es su tendencia a ascender y acumularse en las partes altas de las cabinas de secado (en la práctica se nota directamente en el producto por el olor a humedad).

### Actividad de agua.

El agua es el solvente en donde ocurren las reacciones químicas y enzimáticas de la célula y es indispensable para el desarrollo de los microorganismos<sup>20</sup>.

Se denomina **actividad de agua ( $a_w$ )** a la relación entre la presión de vapor de agua del substrato de cultivo (P) y la presión de vapor de agua del agua pura ( $P_0$ ):

$$a_w = \frac{P}{P_0} \quad (22)$$

El valor de la actividad de agua da una idea de la cantidad de agua disponible metabólicamente.

El valor mínimo de  $a_w$  en el cual las bacterias pueden crecer varía ampliamente, pero el valor óptimo para muchas especies es mayor a 0.99. Algunas bacterias halófilas (bacterias que se desarrollan en altas concentraciones de sal) crecen mejor con  $a_w = 0.80$ .

El valor de la actividad de agua está relacionado con el de la humedad relativa (HR) de la siguiente forma:

$$HR = a_w \times 100 \quad (23)$$

En la figura 2.8 se muestra la influencia de la actividad de agua en las principales reacciones de deterioro en alimentos. Las bajas actividades de agua retardan o eliminan el crecimiento de microorganismos, pero

---

<sup>20</sup> [http://www.unavarra.es/genmic/cursos/microbiologia%20general/notas\\_de\\_microbiologia\\_de\\_los\\_al.htm](http://www.unavarra.es/genmic/cursos/microbiologia%20general/notas_de_microbiologia_de_los_al.htm)

provocan altas velocidades de autoxidación. Las mayores reacciones de oscurecimiento de Maillard (no enzimáticas) se tienen a actividades de agua intermedias (0.6 a 0.7)<sup>21</sup>.

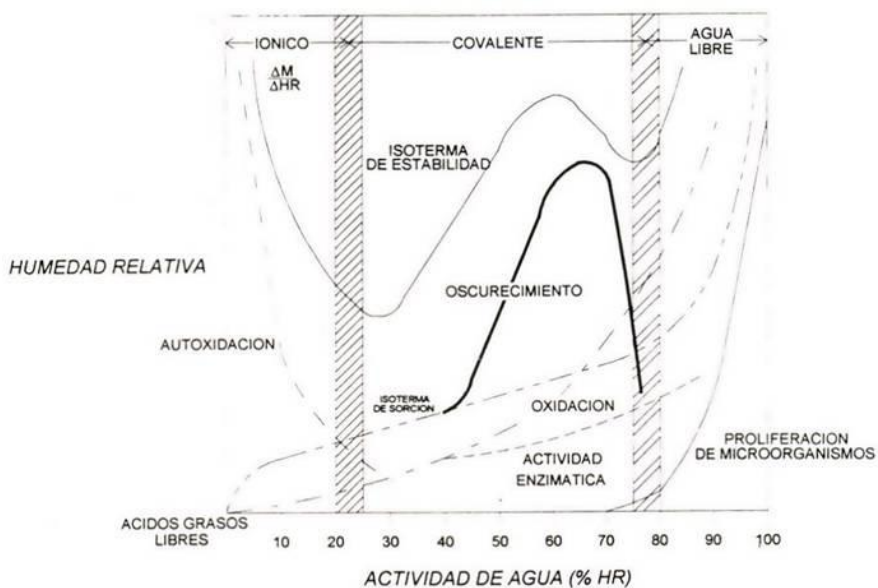


Figura 2-8. Ilustración que muestra el efecto de la  $a_w$  en reacciones de deterioro.

<sup>21</sup> Franzen, K. A. Nonenzymatic browning of skim milk during dehydration. M. Sc. Thesis. Purdue University. 1988.

## 2.2 SECADO SOLAR.

El secado solar es un tema inmenso, cuenta con una historia vasta la cual conforme ha ido avanzando hasta la actualidad se han realizado muchos estudios con el fin de obtener un máximo provecho. Con estos estudios se puede realizar un análisis con el fin de predecir los tiempos de secado, dependiendo del lugar en el mundo en donde se lleve a cabo el proceso de secado. En este capítulo se presentan de manera resumida los factores a tomar en cuenta para comprender dicho proceso.

### **Energías renovables.**

Las energías renovables son aquellas que se producen de manera continua y son inagotables a escala humana. Además tienen la ventaja adicional de poder complementarse entre sí, favoreciendo la integración entre ellas.<sup>22</sup>

Son respetuosas con el medio ambiente, y aunque ocasionen efectos negativos sobre el entorno, son mucho menores que los impactos ambientales de las energías convencionales como combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón) y la energía nuclear.

Las principales energías renovables que hoy día están siendo empleadas en diferentes países son:

- Eólica
- Hidráulica
- Biomasa
- Geotérmica
- Solar

El Sol es la fuente de energía de la tierra ya que la energía solar captada por la tierra, y posteriormente disipada como irradiación infrarroja, determina el calentamiento o enfriamiento del aire, la cantidad de agua evaporada o precipitada, y las diferencias de presión que provocan vientos y brisas.

La radiación solar se genera por la superficie incandescente (5,700 °K) del Sol, una estrella "enana" de 1.4 millones de Km de diámetro. La radiación recorre 150 millones de Km hasta llegar al exterior de la atmósfera de la Tierra, incidiendo con una intensidad constante de  $I_0 = 1,353 \text{ W/m}^2$ , llamada constante solar de la radiación extraterrestre.

---

<sup>22</sup> Rosas, M y Cendra, J. Energía Solar Térmica.

**Irradiación solar.**

La potencia de la radiación solar que se recibe en un instante determinado sobre un metro cuadrado de superficie se conoce como irradiancia ( $I_s$ ) y se expresa en  $W/m^2$ . Para una distancia media Tierra-Sol el valor se conoce como **Constante Solar** ( $S_0$ ). El valor determinado por la NASA indica que la constante solar es de  $1,353 W/m^2 (\pm 1.6\%)^{23}$ .

***Las radiaciones solares y su intensidad.***

Los meteorólogos definen los diversos tipos de energía de radiación electromagnética emitidos por el Sol con una terminología cuyos conceptos más importantes para la práctica son los siguientes:

Radiación solar directa:	Radiación procedente del ángulo sólido del disco solar sobre una superficie perpendicular a la dirección de los rayos.
Radiación difusa:	Radiación recibida por una superficie plana procedente de un ángulo sólido. (fuera de disco solar).
Radiación Cenital:	Componente vertical de la radiación difusa (superficie receptora horizontal).
Radiación Reflejada:	Radiación, directa y difusa, reflejada por la superficie de la tierra que incide sobre una superficie receptora plana.
Radiación Global:	Suma de la radiación solar directa, la radiación difusa y la radiación reflejada que incide sobre una superficie plana desde un ángulo sólido.
Radiación global sobre superficies horizontales:	Componente vertical de la radiación global; en el caso ideal, suma de las componentes verticales de la radiación solar directa y de la radiación cenital, sin la radiación reflejada.

***Instrumentos para la medida de la irradiancia.***

Existen dos tipos de dispositivos básicos para la medición de la radiación solar, el piranómetro y el pirheliómetro. El piranómetro recibe la radiación en todas direcciones del hemisferio y por lo tanto mide la radiación global, la adición de radiación directa y difusa incidentes en una superficie. El piranómetro se puede aplicar a la medida de la radiación difusa empleando una banda opaca que sombree el instrumento a

<sup>23</sup> Ibañes, M. Rosell, J. Tecnología Solar.

la radiación directa. El pirheliómetro tiene una abertura colimada que restringe su visión de la bóveda celeste, habitualmente a 5°, y por ello se utiliza la medida de la radiación directa enfocándolo al Sol.

### El Clima.

El clima es la descripción del ambiente exterior en un lugar determinado.<sup>24</sup> Los parámetros físicos que definen el ambiente exterior se denominan elementos del clima, destacando:

- Temperatura del aire
- Humedad del aire
- Soleamiento
- Nubosidad
- Meteoros (lluvia, nieve, nieblas...)

Las causas que provocan los elementos climáticos en un lugar determinado se denominan factores del clima, entre las que podemos mencionar:

- Latitud del lugar
- Altitud y relieve
- Tipo de terreno, masas de agua o vegetación
- Obstrucciones solares y eólicas

Los climas se definen según sus variables espaciales y temporales. La escala geográfica permite la siguiente clasificación de climas y microclimas (tabla 2.4), considerando al microclima como la definición del clima de un lugar muy concreto, que permite la determinación detallada y ampliada de parámetros ambientales característicos:

Tabla 2-4. Definición de Climas y Microclimas

<b>Definición</b>	<b>Escala espacial</b>	<b>Ejemplos</b>
Climas	Continental	Subtropical
	Regional	Canario
	Comarcal	Medianías
Microclimas	Local	Campus de Tafira
	Puntual	Entrada de la Escuela

<sup>24</sup> El Soleamiento. //editorial.cda.ulpgc.es/ambiente/2\_clima/2\_soleamiento/index.html

El estudio temporal del clima se realiza por medio de técnicas estadísticas, por su carácter variable y aleatorio, para determinar sus valores medios y extremos, y además, para definir las fluctuaciones en ciclos diarios o anuales.

### **Secador solar.**

Un secador solar es un equipo que a través de uno de sus componentes transforma la energía radiante proveniente del Sol en energía térmica capaz de proporcionar la energía necesaria para evaporar la humedad contenida en un producto.<sup>25</sup>

Los secadores solares se pueden clasificar en dos grupos, dependiendo de la forma como se transmita el calor a los productos húmedos, y que son: directos e indirectos.

### ***Componentes esenciales en secadores solares indirectos.***

Los secadores solares indirectos pueden estar constituidos de tres componentes: una cámara de secado en donde el producto es deshidratado, un colector solar en donde se calienta el aire, y algún tipo de sistema de ventilación.<sup>26</sup> En la figura 2.9 se muestra un ejemplo de secador que contiene dichos elementos:

---

<sup>25</sup> Keeey, R.B. Theoretical foundations of drying technology in advances in drying. Edit. Aron S. Mujadar. Vol 1. 1999.

<sup>26</sup> Green, M y Schwarz, D. Solar Drying Technology for Food Preservation. (GITZ-GATE), 2001.

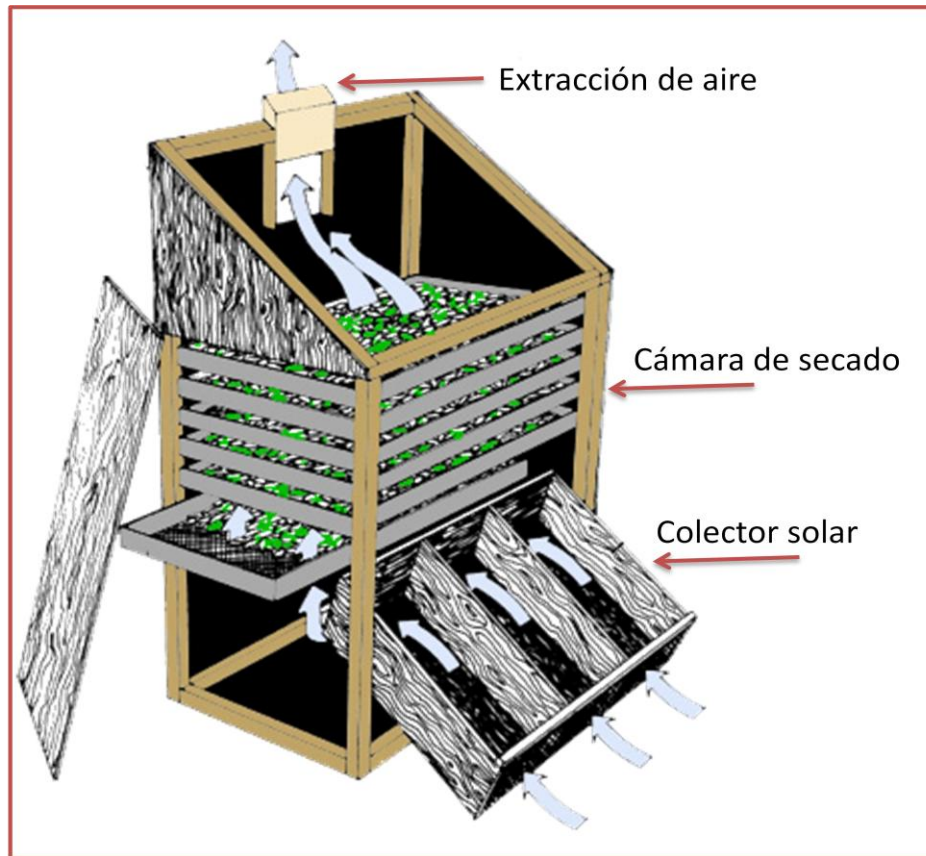


Figura 2-9. Dibujo que muestra los componentes de un secador solar.

***Ventajas y desventajas de secado solar contra otros métodos de secado.***

El secado solar es una técnica que se ha venido empleando desde hace muchos años con éxito, y que presenta algunas ventajas y desventajas con respecto a otras técnicas. En la tabla 2.5, se presenta una comparación entre el secado solar y otras técnicas.

Tabla 2-5. Comparación de secador solar con secado al aire libre y secadores de recursos fósiles.

Tipo de secador	Ventajas (+), Desventajas (-) de secadores solares
Solar vs Aire libre	+ Se puede obtener una buena calidad en el producto deshidratado. + Se reduce pérdidas y contaminación por insectos, basura e insectos.



	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Protege el alimento de la luz del sol, la cual preserva mejor nutrición y color.</li> <li>+ Reduce mano de obra en el proceso de secado.</li> <li>- De acuerdo a la calidad de los materiales a utilizar se puede incrementar el costo.</li> <li>- En algunos casos la calidad del producto se reduce.</li> <li>- En algunos casos, el valor de elaboración del producto no se incrementa.</li> </ul>
<b>Solar vs Energías fósiles</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ No depende de combustible.</li> <li>+ En ocasiones es más económico.</li> <li>+ Reduce el impacto de contaminantes.</li> <li>- Requiere de una adecuada irradiancia solar.</li> <li>- Preferible trabajar en climas calientes y secos.</li> <li>- Requiere más tiempo de secado.</li> </ul>

### 2.3 SECADO DE PRODUCTOS AGRÍCOLAS.

#### **Antecedentes del secado y secado solar.**

Como se ha mencionado anteriormente el proceso de secado y secado solar es un método usado en todo el mundo, a continuación se describe algunos ejemplos de estudios que han realizado en diferentes países, esto con el fin de resaltar la importancia del aprovechamiento de la energía solar.

#### **Chile jalapeño:**

Proceso de secado de chile en un secador solar indirecto. Ché Yam, Miguel Ángel. Chetumal, Quintana Roo. México. 2008.

Las pruebas de secado se realizaron en el parque eólico-solar de la universidad de Quintana Roo. Se sometió una muestra de 4 kg de chile jalapeño que en 35 hrs se redujo la humedad hasta un 25% realizada con una

temperatura ambiente máxima de 36.9°C y una irradiancia solar de 1,057 W/m<sup>2</sup>. Dentro de la cabina de secado se registro una temperatura máxima de 59°C

**Tomate:**

Elaboración de tomate en la provincia de San Juan, Argentina. Mujica Rivas, María Fernanda. 2004.

Este secado se llevo a cabo en la estación experimental agropecuaria San Juan de INTA, desde el año 2004, ensayos tendientes a la búsqueda de variedades de tomate aptas para el secado y de nuevos tratamientos del tomate previos y posteriores al secado que brindaron productos inocuos, de calidad y con altos rendimientos en cuanto a la relación de producto fresco que se necesito para la obtención de tomate seco. Realizado al secado solar directo con una temperatura ambiente media máxima de 32.8°C y humedad relativa media con valores que oscilan entre los 46% y 52% durante el verano.

**Chile Poblano:**

Modelos aplicados al proceso del chile poblano. Mendoza Medina, J. L.; Martínez Soto, G.; Irapuato, Guanajuato, México.

Trozos de chile poblano fresco se sometieron a deshidratación con aire caliente en un túnel experimental a 55 y 75°C con una velocidad de aire de 1.5 m/s. las muestras perdieron entre 79.5% y 94 % de peso.

**Berenjena:**

Cinética de secado de berenjenas. Chaves, M. G.; Sgroppo, C. C.; Avanza, J. R. Bellavista, Argentina. 2003.

Se realizaron pruebas de secado de berenjena a 50°C, 70°C y 90°C con una velocidad de aire de 0.2 y 0.5 m/s y una humedad relativa de aire de entre 50 y 60 % y diferentes diámetros de espesor observando un contenido de humedad de 92.6 %.

**Pepino:**

Modificación de la superficie de rebanada de pepino durante el proceso de secado solar en la ciudad de México, Ruiz, M y Arias, J. Memoria XXIX Semana Nacional de Energía Solar. 2005.

Se realizaron pruebas de secado solar de pepino en la UAM Iztapalapa, México. Con un secador solar indirecto el cual alcanzo temperaturas internas máximas de hasta 68.9° C y una temperatura ambiente de 27.7°C, las pruebas duraron cinco horas, las muestras de pepino estaban cortadas en rebanadas de 0.5 mm y se observo que el pepino pierde un contenido de humedad de (95 – 97 %) y se observo el cambio físico por la pérdida de agua.

### CAPÍTULO 3 . METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.

Para el desarrollo de la investigación del proceso de secado solar se diseñó un secador solar indirecto y al mismo tiempo se realizaron pruebas a nivel laboratorio en un secador tipo túnel, que permitieron evaluar distintos aspectos de secado, pero fundamentalmente el cálculo del tiempo de secado.

Se realizaron diversas pruebas para determinar las mejores condiciones para un secado óptimo del chile habanero. Estas pruebas fueron importantes para adentrarse al proceso de secado solar de productos agrícolas ya que se observó cómo afecta la estructura del producto en el tiempo de secado.

Al obtener experiencia en el proceso del producto se empezó a estudiar más a fondo la mejor forma de que el producto se pudiera deshidratar en un menor tiempo y con una buena calidad, en este caso se explicará de forma más detallada el proceso de deshidratación final.

Cabe señalar que solo se incluyen las pruebas más representativas de esta investigación (dos en laboratorio y una en campo) ya que otras pruebas que se realizaron solo sirvieron para afinar la metodología y el proceso que se debía seguir para lograr un secado de calidad. Las pruebas que no se anexan en este documento son las realizadas en el secado solar directo, pruebas realizadas con chiles enteros en túnel de viento, pruebas con chiles partidos a la mitad en forma transversal y longitudinal en túnel de viento, primeras pruebas con chile rebanado con longitudes de 0.2 mm el cual se sometió a escaldado en secador solar.

#### 3.1 PRUEBAS DE SECADO.

Las pruebas de secado se realizaron en el taller de ingenierías de la Universidad de Quintana Roo y las pruebas de campo en el parque eólico-solar, también de dicha universidad.

En las diferentes pruebas realizadas se mantuvo monitoreadas las siguientes variables:

- La evolución del peso y humedad de la muestra con el tiempo de secado.
- Humedades relativas y temperaturas ambiente y del medio secante.
- La evolución del volumen, densidad, y dimensiones de la muestra con el tiempo de secado.

- Los cambios micro estructurales en la matriz solida.
- La evolución de los parámetros de calidad de la muestra (color, textura y sabor.) durante el secado.

#### **Obtención del peso seco de referencia.**

El valor del peso seco o humedad base seca de la muestra sirve como referencia en las pruebas de secado.

Para realizar las pruebas de secado primero se procedió a determinar el peso seco total de una muestra de 70 gr de chile habanero entero, esta prueba se realizó en un horno con carbón, en el cual se obtuvo 6.34 gr de chile habanero seco.

### 3.2 MATERIALES Y HERRAMIENTAS UTILIZADOS.

Los equipos empleados para medir y registrar las mediciones se muestran divididos por tipo de prueba, como es laboratorio (secador tipo túnel) y de campo (secado solar indirecto), a continuación se presentan.

En la figura 3.1 se muestran los equipos empleados para las pruebas realizadas en laboratorio: (a) Termohigrómetro, (b) Termopar tipo T, (c) Termómetro digital, (d) Variac, (e) Balanza granataria, (f) Túnel de viento.

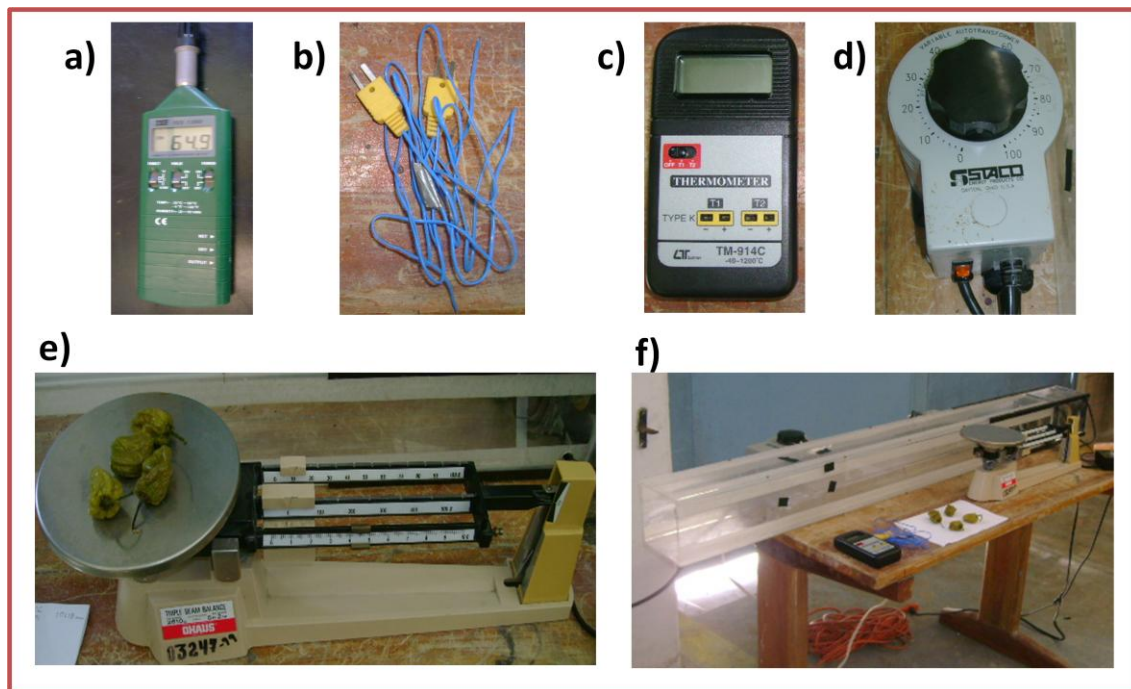


Figura 3-1. Equipos utilizados para la realización de pruebas en laboratorio.

En la figura 3.2 se muestran los equipos empleados para las pruebas realizadas en campo: (a) Termohigrómetro, (b) Termopar tipo T, (c) Piranómetro, (d) Multímetro, (e) Balanza granataria, (f) Adquisidor de datos.

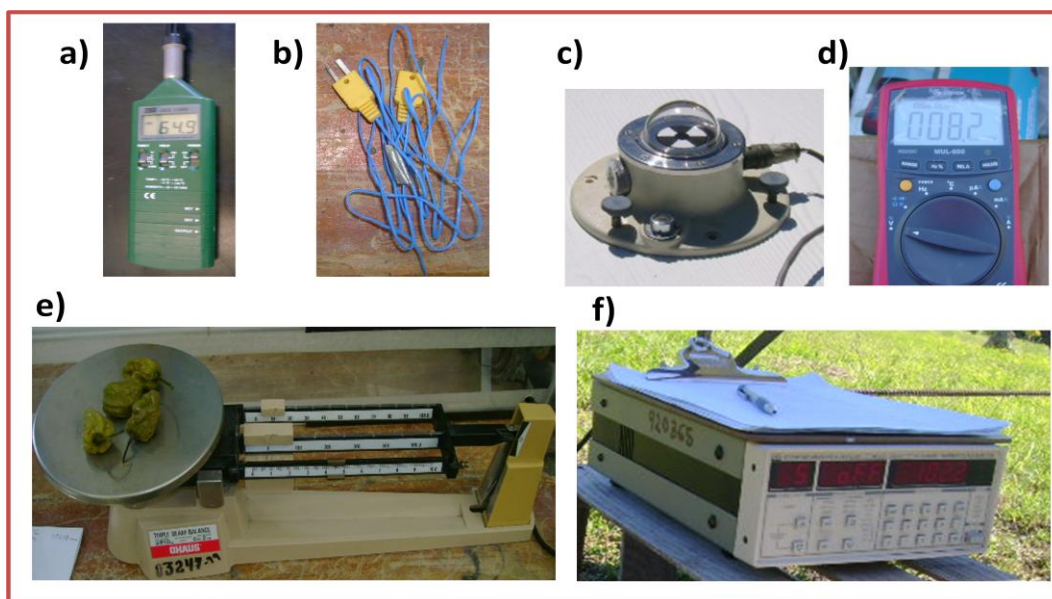


Figura 3-2. Fotografías de los equipos utilizados para la realización de pruebas en campo.

**Secador solar tipo indirecto.**

El secador que se utilizó para las pruebas de campo se construyó en el taller de ingenierías y se muestra en la figura 3.3. El secador es un secador solar indirecto con tres charolas dentro de la cabina, la cual se construyó con un laberinto interno para el flujo proporcional de aire.



Figura 3-3. Fotografía del secador solar tipo indirecto.

**3.3 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE LAS PRUEBAS DE SECADO.**

A continuación se resumen las etapas seguidas durante las diferentes pruebas del proceso de secado, y que están esquematizadas en la figura 3.4.

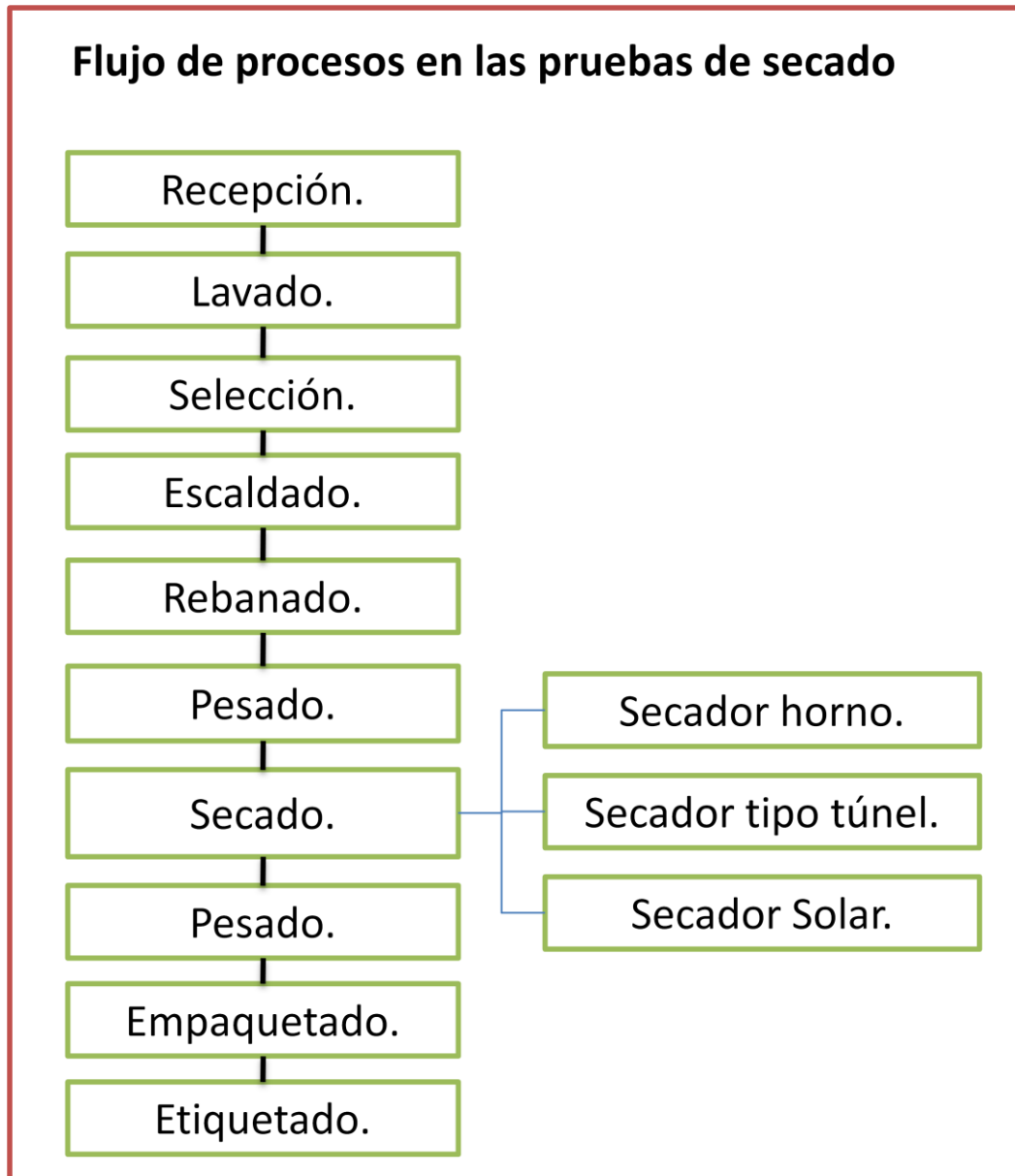


Figura 3-4. Diagrama que muestra el flujo de procesos de las pruebas de secado.

#### Descripción del proceso de las pruebas de secado.

**Recepción del chile habanero:** El producto se compró en el mercado local de la ciudad de Chetumal, Quintana Roo.

**Lavado y desinfección:** Se lavó el producto con abundante agua limpia, a la cual se le agrega unas gotas de cloro o yodo en concentraciones de 10 gotas por litro de agua. Con esta operación se busca eliminar todo tipo de contaminantes externos como polvo, residuos de plaguicidas, partes de insectos, entre otros.

**Selección según estado sanitario y defectos:** Se descartaron los chiles con signos de enfermedades y pudrición o defectos fisiológicos.

**Escaldado o blanqueo:** Se sumergió el chile habanero por un periodo de tres minutos en agua hirviendo saturada de sal, pasados los tres minutos se retiró el producto y a continuación se procedió a sumergir en agua helada para detener la cocción, luego se escurrió bien toda el agua.

**Corte:** El corte del producto es de mucha importancia ya que el grueso del producto afecta en el tiempo de secado, se recomienda realizar cortes en rebanadas mayores de 1.2 mm y no más de 3 mm.

**Pesado:** Se procedió a pesar el producto a introducir en el secador para llevar un control y estudio de la distribución de calor dentro de la cabina de secado, el producto se introdujo en partes de 50 gr y 100 gr. En pruebas finales se introdujo un total de 976 gr distribuidos en las tres bandejas de secado.

**Distribución en las bandejas de secado:** En la cabina de secado las rodajas son colocadas sobre mallas de forma esparcida evitando la aglomeración de las rodajas, para que la circulación del aire sea pareja a través del producto sobre la bandeja.

Cuando se usa el secador, este debe ser cerrado inmediatamente para proteger el producto del polvo y los insectos.

**Secado al Sol en secador solar tipo indirecto:** El secador al ser de tipo indirecto proporciona una corriente de aire fluida por la convección forzada, en cuanto a la temperatura, pruebas realizadas en un secador tipo túnel se observó que con una temperatura de 55° C seis horas fueron suficientes para retirar el exceso de humedad en el producto, en el secador solar tipo indirecto se logró registrar una temperatura máxima de 59.8° C, sin embargo la temperatura variaba con el tiempo (sobre todo al inicio y final de las pruebas, debido a la temperatura ambiente y a la poca irradiancia solar) y al abrir el secador para pesar las muestras había pérdidas de calor con lo que el tiempo de alargaba.



Cuando las condiciones climáticas fueron favorables el secado se llevaba al cabo en dos días, intercambiando las bandejas de secado cada dos horas, en un tiempo de quince horas se obtuvo el producto seco.

**Toma de mediciones:** En el transcurso del proceso de secado se recolectaron datos climatológicos para analizar la condición climática con la cual el producto fue alterado.

**Peso del producto seco:** Las primeras pruebas de secado (secador tipo túnel) se procedió a pesar el producto pasada 6 - 8 horas, en otras pruebas se peso el producto cada hora para determinar las curvas de secado hasta obtener el peso deseado. Para la medición en el secador solar se introdujo la balanza granataria en el secador con una bandeja con el producto a someter.

**Empaque y Almacenamiento:** Los vegetales deshidratados requieren de un almacenamiento adecuado pues al reducirles el contenido de agua, sus reacciones físico - químicas y los caracteres microbiológicos se encuentran inhibidos en gran porcentaje, siendo por esta misma característica, muy susceptibles a reactivarse si las condiciones lo permiten.

Las características necesarias del material del empaque son<sup>27</sup>:

- **Inocuidad:** Los materiales de empaque no deben transmitir al contenido ninguna sustancia extraña que posibilite daño a la salud del consumidor o que modifique las características del alimento.
- **Resistencia:** Debe ser resistente a la ruptura, al desgarre, tener apropiada elasticidad y solidez y ser estables a los cambios de temperatura.
- **Impermeabilidad:** Supone la resistencia al paso de agua, vapor de agua, gases, aromas, grasas y luz.

En los experimentos realizados, después del pesado final se guardo el producto en bolsas de papel celofán por partes según el orden en el que se introdujeron en las bandejas de la cabina de secado. Las bolsas fueron rotuladas indicando el peso inicial de la muestra, la hora de introducción al secador y el peso final de la muestra, la hora de introducción al empaque y la fecha de prueba.

---

<sup>27</sup> Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. Deshidratación de frutas. Centro de Investigación NATAIMA. Espinal, Tolima, Colombia.

**Observaciones del empaquetado:**

Al principio las muestras de las pruebas se guardaron dentro de bolsas de plástico resellable pero se observó que dichas muestras, en un periodo no mayor de una semana presentaron alteraciones como crecimiento de moho en el producto.

Se optó por introducir las muestras secas en bolsas de papel celofán, en las cuales el producto se mantiene por más tiempo y sin presentar señales de putrefacción en las muestras. Las observaciones realizadas son:

- **Almacenamiento:** Se guardaron en diferentes lugares el producto para observar las variantes con respecto al lugar de almacenamiento.

Una muestra se guardó dentro de una caja de madera con una resistencia eléctrica que le proporcionó una atmósfera seca.

Otra muestra se guardó en un cajón de madera dentro de un cubículo expuesto a un ambiente húmedo de alrededor de 24° C.

- **Calidad del producto final:** El producto se presenta con una textura arrugada manteniendo un color intenso y un estado rígido, con fuerte aroma natural.

### 3.4 FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO DE SECADO.

#### Secador tipo túnel.

Para la realización de pruebas de secado en laboratorio se utilizó un secador tipo túnel el cual se suministró energía por medio de un variac, el cual calentaba una resistencia interna hasta obtener la temperatura deseada. Las muestras se colocaron en la bandeja de muestras elaborado con una malla de acero. Las pruebas se realizaron con una velocidad de viento de 1.5 m/s y temperaturas de 40, 45, 50 y 55 grados Celsius, se obtenía la medición de dicha temperatura por medio de termopares tipo T calibre 36 y un termómetro digital. A intervalos regulares de tiempo se retiraban las muestras para proceder a tomar el peso del producto, ya capturado el peso del producto se volvía a introducir en el interior del túnel de secado. En la figura 3.5 se observa una representación del proceso de secado en el secador tipo túnel.

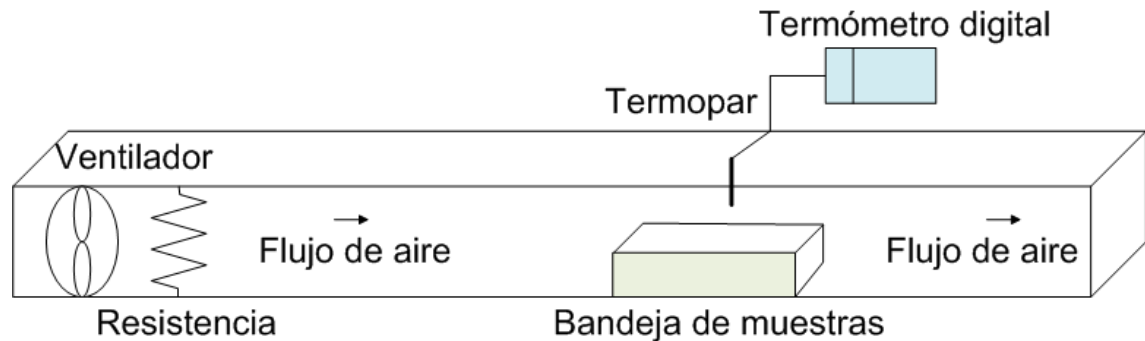


Figura 3-5. Dibujo que demuestra el proceso de secado en el secador tipo túnel.

#### Secador solar indirecto.

Para las pruebas de secado en campo se utilizó el secador solar indirecto que se observa en la figura 3.3, durante su operación en el colector solar se registraron temperaturas de hasta 59.8° C, el aire es succionado mediante un extractor permitiendo la convección forzada de aire a través del colector permitiendo así el flujo del aire ya caliente al interior de la cabina de secado, en la salida del extractor de aire se conecta un tubo de PVC que lleva la extracción del aire caliente de la cabina de secado nuevamente a la entrada de aire del colector solar. En la figura 3.6 se observa el proceso del flujo de aire.

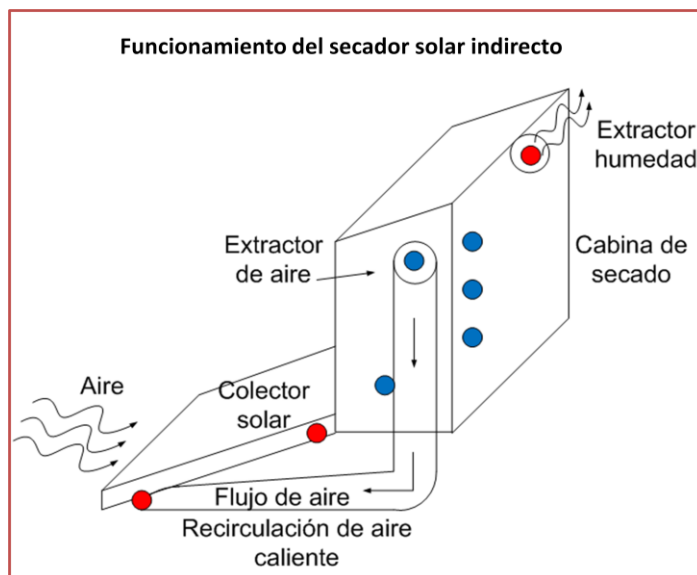


Figura 3-6. Dibujo que demuestra el funcionamiento del secador solar indirecto con recirculación de aire.

Dentro de la cabina de secado se encuentran tres bandejas de secado, en donde se distribuyeron las muestras de chile habanero, éstas al estar en contacto con el aire caliente fueron sometidas al proceso de intercambio de calor, al disminuir el contenido de humedad el producto, la cabina de secado se saturaba de humedad (sumidero de humedad) impidiendo que el proceso de transferencia de masa continuara, por lo que en aproximadamente cada hora se procedía a poner en marcha el extractor de humedad por un periodo de cinco minutos.

Para medir la temperatura que alcanzaba el secador se colocaron termopares tipo T, en la figura 3.6 se observan los termopares ubicados externamente (representados por círculos rojos) y los internos (representados de color azul). Los termopares internos se ubicaban en medio de cada bandeja de secado, a la salida del colector y a la salida de aire del extractor.

En la figura 3.7 se muestra el perfil de temperaturas alcanzadas en el secador solar con respecto al tiempo de duración de la prueba, en donde se observa que las temperaturas por arriba de los  $55^{\circ}\text{C}$  que alcanza la cabina de secado se registran en un periodo de cuatro horas de alrededor de las 11:00 am hasta las 15:00 pm.

La temperatura registrada en la salida del colector se observa menor a la temperatura de la cabina, esto puede ser causado por la transferencia de calor de las paredes de la cabina de secado al interior de la cabina ya que en pruebas anteriores se observaba que la temperatura a la salida del colector solar era mayor que la

cabina sin embargo al incrementar la velocidad del aire de recirculación este tendía a disipar el calor del colector por lo que es probable que es lo que sucedió en este caso.

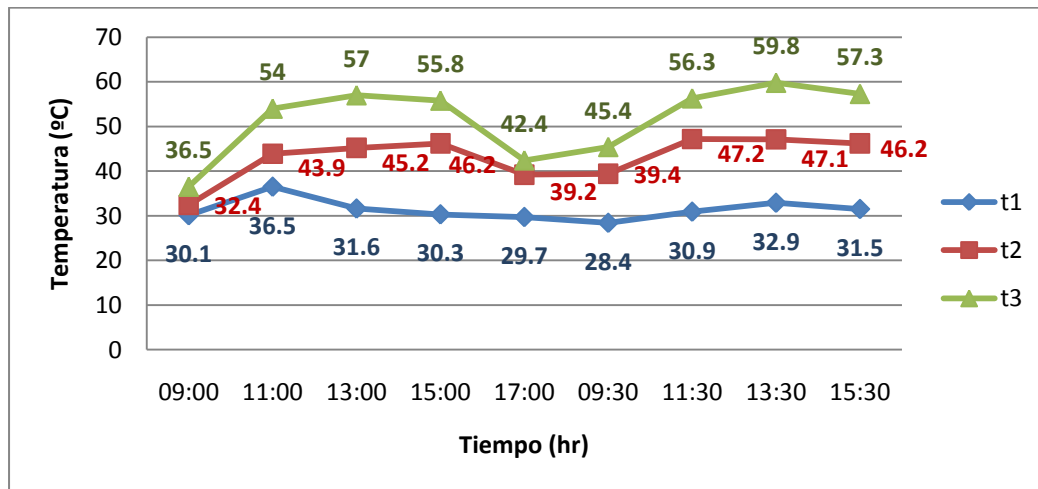


Figura 3-7. Perfil de temperaturas en pruebas del 25 de junio del 2009. En donde t1: temperatura ambiente, t2: temperatura salida colector y t3: temperatura bandeja de secado.

### Condiciones climatológicas en las pruebas de secado solar.

En las diferentes pruebas de secado se registraron mediciones de temperatura ambiente, temperatura en el interior de la cabina de secado, humedad relativa ambiente, irradiancia, en una bitácora de la cual se almacenaron los datos en una hoja de cálculo en Excel para el análisis, para observar el comportamiento del secador solar indirecto utilizado.

También se utilizó el software The Weather Tool<sup>28</sup>, que es herramienta que sirve para tener un registro y reporte estadístico de las condiciones climatológicas de un lugar determinado, además de la trayectoria solar. Del total de las cinco pruebas que se realizaron solo se presenta la prueba que permitió tener un producto con las características deseadas a continuación se presentan las condiciones que se presentó los días 24 y 25 de junio.

### Clima.

Los valores de temperatura, humedad relativa e irradiancia solar se presentan en la figura 3.8. Estos valores fueron los recabados en un lapso de tiempo de 9:00 am a 17:00 pm, durante el tiempo de secado.

<sup>28</sup> Weatool v. 1.10 Climatic Visualisation and Desing Analysis. De Square One [www.squ1.com](http://www.squ1.com)

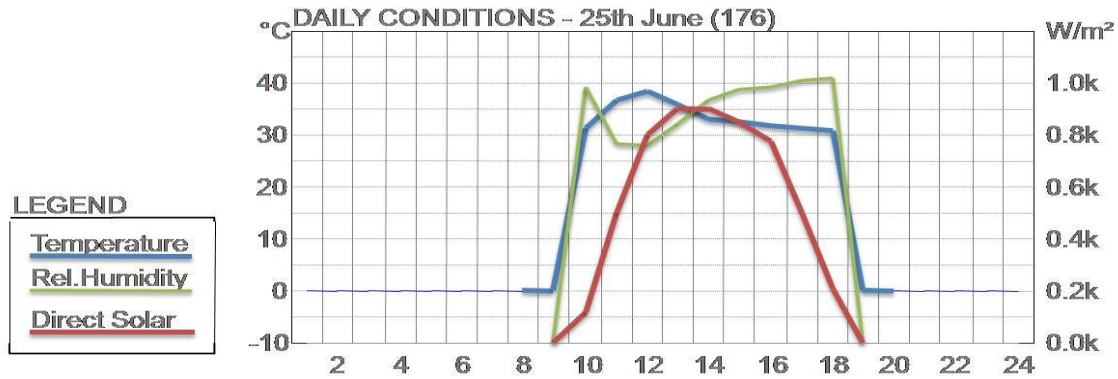


Figura 3-8. Diagrama de condiciones climatológicas.

**Trayectoria solar.**

En la figura 3.9 se muestra el diagrama estereográfico correspondiente a una latitud de 18.3° y una longitud de -88.08, donde se observa la trayectoria solar del periodo durante el cual se llevo a cabo la prueba de 9:00 am a 17:00 pm del 25 de junio del 2009 representado por la línea roja, los puntos negros representan los puntos de ubicación del sol.

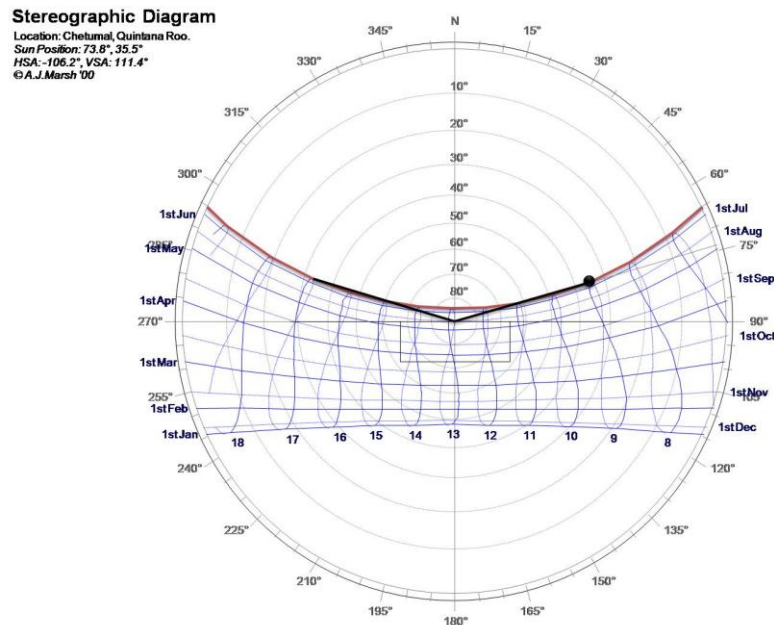


Figura 3-9. Diagrama Estereográfico para latitud de 18.3°

Para observar desde otra perspectiva la trayectoria solar se presenta en la figura 3.10 el diagrama ortográfico en donde al igual que el diagrama anterior este representa la ubicación, horas y trayectoria solar el mismo día de prueba.

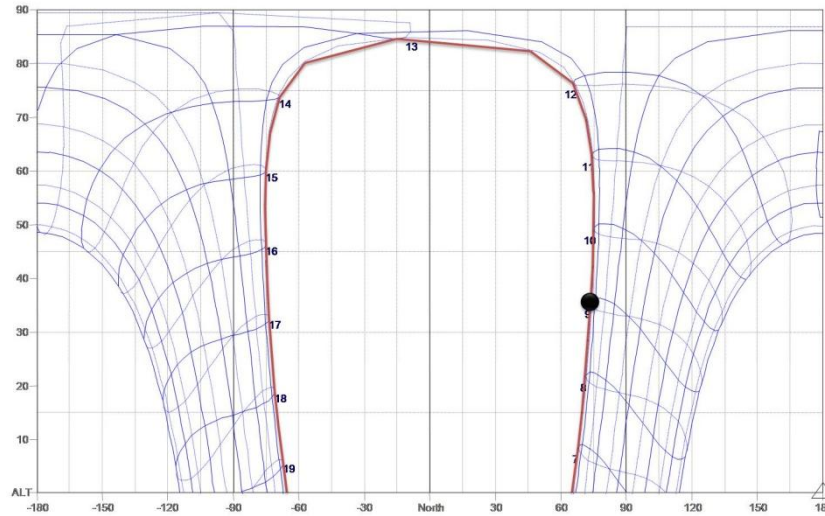


Figura 3-10. Diagrama Ortográfico solar para latitud 18.3°

De las pruebas realizadas se presenta la figura 3.11 en donde se observa las temperaturas ambiental (t1) y dentro de la cabina de secado (t2) y la irradiancia en los dos días que duro la prueba de secado solar. En este perfil se puede observar que los valores de irradiancia baja es debido a nubes coincidentes en la toma de la medición, sin embargo, descartando estos valores pequeños de irradiancia se puede observar que en el periodo de 11:00 am a 15:00 pm se registra un promedio de 821 W/m<sup>2</sup> de irradiancia.

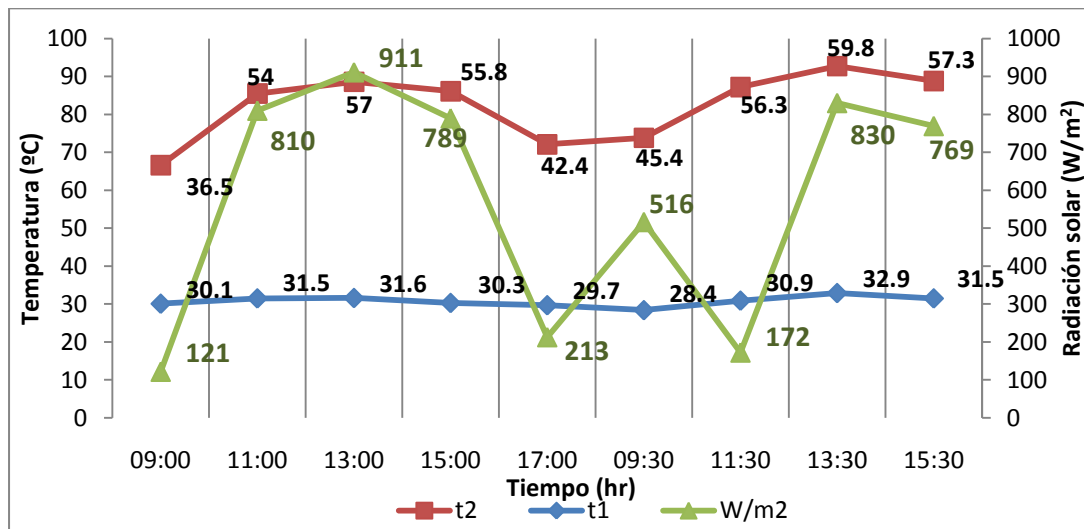


Figura 3-11. Curvas de temperatura e Irradiancia solar con respecto al tiempo.

## CAPÍTULO 4 . ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Mediante los experimentos de secado en laboratorio y en campo se realizaron diferentes observaciones con las cuales nos permitieron recabar información para obtener el menor tiempo de secado en el producto de las pruebas. En este capítulo se muestran los análisis de temperatura y peso en el proceso de secado.

### 4.1 PESO SECO.

Como se menciona en el capítulo anterior en la adecuación de la hoja de cálculo, el peso objetivo de las pruebas realizadas se obtuvo del secado total de una muestra la cual se observa su condición final en la figura 4.1 en donde se observa su peso seco de 6.34 gramos.



Figura 4-1. Fotografía de la muestra de chile habanero indicando el peso seco final.

### 4.2 PRUEBAS CON CHILE HABANERO ENTERO.

Se realizaron pruebas de secado con chile habanero entero tanto en laboratorio como en campo, éstas últimas consistieron en someter muestras a secar directamente al aire libre y otras en un secador solar directo. Aún cuando en dichas pruebas el clima fue favorable, el único avance observable en tres días en las muestra fué la aparición de mohosidad como se observa en la figura 4.2.



Posteriormente al someter nuevas muestras al escaldado se observaron avances de pérdida de peso en las muestras, sin embargo estas pérdidas de peso con el transcurso de 3 días la pérdida de humedad no fué significativa, y nuevamente solo favorecían el crecimiento de mohosidad.

Entonces se procedió a realizar pruebas con el producto sometido a diferentes temperaturas dentro del secador tipo túnel, buscando determinar la temperatura mínima a partir de la cual se podría llevar a cabo el secado. En la figura 4.3 se observa la muestra seca obtenida en el proceso.



Figura 4-2. Fotografía de la muestra de mohosidad en pruebas de secado al aire libre y secado en secador solar directo.



Figura 4-3. Fotografía de la muestra de chile habanero seco sometida en secador tipo túnel.

Al no observar avances con estas pruebas se procedió a evaluar las muestras cortadas en rebanadas y además sometidas al proceso de escaldado.

### 4.3 PRUEBAS CON CHILE HABANERO CORTADO EN REBANADAS.

En las pruebas realizadas en laboratorio se observaron avances referentes a la pérdida de peso de las muestras sometidas en el secador tipo túnel con respecto al tiempo de secado, estos avances se lograron a partir del corte en rebanadas de 0.5 mm.

En el secador tipo túnel se introdujo sobre una bandeja de malla 29.9 gr y 36 gr de rebanadas de chile habanero el cual sometido a una temperatura constante de 50°C y 55°C, por un periodo de 12 hrs y 6 hrs respectivamente con una humedad relativa ambiente promedio de 70 %.

Se realizaron pruebas en el secador solar con una muestra de 200 gr en donde se alcanzó una temperatura máxima de 59.8°C y una temperatura mínima de 42.4°C, registrando una humedad relativa ambiente promedio del 74 %.

Para la elaboración de las Gráficas del proceso de secado del chile habanero, se utilizo una hoja de cálculo en Microsoft Excel (tabla 4.1).

En dicha tabla se vaciaron los datos obtenidos de las pruebas tanto en el túnel de secado a 50°C y 55°C como del secado solar a 55°C.

Los datos que se obtuvieron de las pruebas son: Temperatura ambiente, temperatura en la cabina de secado, humedad relativa, peso del producto e irradiancia solar. A partir de estos datos se determino primero el peso seco, corregido (mediante un ajuste) para 200 gr ya que se contaba con un peso seco de referencia para una muestra de 6.34 gr.

Una vez obtenido el peso seco, se determina el contenido de humedad de las muestras a lo largo de las pruebas de acuerdo con la ecuación 2.

Posteriormente, se calculo la relación de humedad (Y) y el logaritmo de dicha ecuación para linealizar el periodo de velocidad de secado constante.

Finalmente se obtiene la pendiente de la gráfica del logaritmo de la relación de humedad, y con este valor se puede determinar la  $D_{\text{eff}}$  del chile habanero, con el uso de la ecuación 1.

Tabla 4-1. Datos obtenidos en las pruebas realizadas en el secado de chile habanero a diferentes temperaturas y técnicas.

Tiempo (min)	50°C MOD				55°C MOD				55°C EXP					
	Peso	X	Y	Ln(Y)	Peso	X	Y	Ln(Y)	Peso	X	Y	Ln(Y)		
0	0.02968	10.38	1.00	0.00	0.03595	10.38	1.00	0.00	0.2	10.379	1.00	0.00		
60	0.02105	7.07	0.68	0.39	0.01515	3.80	0.36	1.01						
120	0.017	5.52	0.53	0.63	0.00795	1.52	0.14	1.93	0.123	5.998	0.58	0.55		
180	0.01456	4.58	0.44	0.82	0.0042	0.33	0.03	3.50						
240	0.0125	3.79	0.36	1.01	0.0035	0.11	0.01	4.75	0.072	3.097	0.30	1.21		
300	0.01068	3.09	0.30	1.22	0.00319	0.01	0.00							
360	0.00934	2.58	0.25	1.40	0.0032	0.01	0.00		0.035	0.991	0.09	2.37		
420	0.00845	2.24	0.21	1.54	0.0032	0.01	0.00							
480	0.00771	1.96	0.19	1.68	0.0032	0.01	0.00		0.0264	0.502	0.05	3.07		
540	0.00598	1.29	0.12	2.11	0.0032	0.01	0.00							
600	0.0053	1.03	0.10	2.34	0.0032	0.01	0.00		0.0263	0.496	0.05	3.08		
660	0.00509	0.95	0.09	2.42	0.0032	0.01	0.00							
720	0.00479	0.84	0.08	2.55	0.0032	0.01	0.00		0.02	0.138	0.01	4.47		
780	0.0046	0.76	0.07	2.65	0.0032	0.01	0.00							
840	0.0045	0.73	0.07	2.70	0.0032	0.01	0.00		0.0196	0.115	0.01	4.68		
900	0.0045	0.73	0.07	2.70	0.0032	0.01	0.00							
960	0.0045	0.73	0.07	2.70	0.0032	0.01	0.00		0.0195	0.109	0.01	4.75		
				<b>Pendiente</b> 0.00528823 <b>Deff</b> 5.3581E-08					<b>Pendiente</b> 0.01611292 <b>Deff</b> 1.6326E-07					<b>Pendiente</b> 0.005058175 <b>Deff</b> 5.125E-08

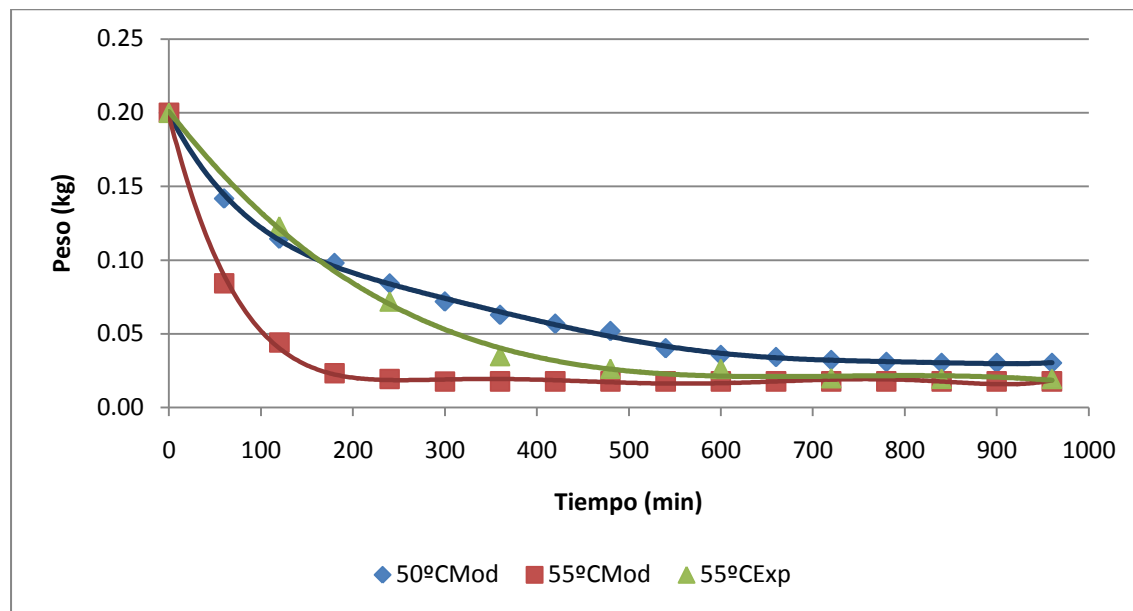


Figura 4-4. Gráfica que muestra la curva de secado.

#### 4.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Con los datos registrados concluidas las pruebas de secado se determinaron diferentes factores descritos en el capítulo 2 a continuación se presentan y se describe el comportamiento descrito gráficamente.

##### Contenido de humedad.

En la figura 4.5 se observa el comportamiento de las muestras sometidas a las pruebas de secado logrado en un tiempo de 15 horas, en donde el perfil de las curvas muestran una forma aproximadamente lineal descendente en la pérdida de agua en las muestras sometidas a 50°C. La mejor muestra que se observa y se representa en la curva de secado ideal es a 55°C (representada de color rojo). Las muestras sometidas a 55°C presentan la disminución de humedad hasta llegar a la humedad ligada de las muestras, sin embargo la curva de la muestra de 50°C parece nunca alcanzar una deshidratación total. Si se presentara la gráfica en forma de escala a mayor tiempo de secado debería observarse una curva de secado suavizada, pero no quiere decir que la pérdida de humedad de la muestra de 50°C se incremente, más bien se puede decir que la deshidratación a la temperatura de 50°C alcanza un equilibrio de humedad con el ambiente con respecto al largo tiempo de secado.

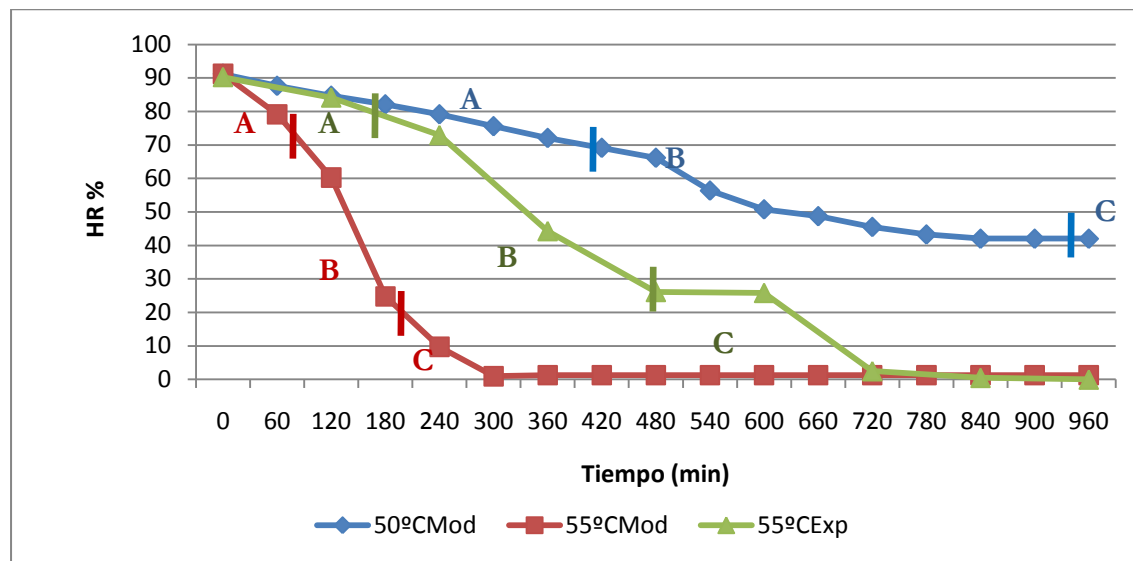


Figura 4-5. Gráfica que muestra la pérdida del contenido de humedad.

En la curva que representa el secado solar (curva verde) no presenta la forma ideal del periodo de velocidad constante de secado, esto se debe a que las muestras que se depositaron dentro de la cabina de secado no se sometieron a la temperatura de 55°C directa sino que el secador empezó con una temperatura ambiente de 32.4°C lo que se desvía el tiempo natural de secado a tender ser mayor.

En esta gráfica también se distinguen las tres etapas de secado divididas por líneas y representadas por letras: en la primera etapa (A) en el periodo de inducción se observa que la muestra tratada en el secador tipo túnel a 55°C el tiempo es muy corto comparado con las otras dos muestras, lo que demuestra que esta etapa depende de diferentes factores en el cual el más representativo es el no contar con la temperatura adecuada al inicio de las pruebas. Posteriormente se observa la segunda etapa (B) para humedades del producto que empieza desde un HR del 70% hasta un 25% aproximadamente parece ser este el contenido de humedad superficial de las muestras, en el secado solar se incremento el tiempo de secado debido al almacenamiento de las muestras ya que justamente en este periodo se vio interrumpido el proceso por la disminución de temperatura del primer día de secado y la disminución de temperatura a la mañana del segundo día de secado, al verse interrumpido este periodo las muestras concentraron un aroma a humedad.

Finalmente se observa la tercera etapa de secado (C), se observa que en esta etapa la transferencia de calor desde el interior del producto se reduce provocando el aumento del tiempo de secado, sin embargo, en la

muestras sometidas en el secador solar disminuye esto puede estar relacionado con el incrementado de la temperatura por la hora en el segundo día de prueba, habiendo acelerado el proceso.

### Contenido de humedad base seca.

En el perfil de humedad base seca que se muestra en la figura 4.6 con respecto al tiempo, puede apreciarse la similitud de la figura 4.4 el contenido de humedad es mayor del 100% el cual puede ser la humedad no ligada ya que la muestra en rebanadas al someterse al proceso de escaldado, el agua hervida en la mayoría de los casos se filtra al interior de la muestra permitiendo que al preparar el equipo de las pruebas las muestras se bañen en el jugo excesivo, que al entrar al intercambio de calor durante el proceso de secado esta jugosidad se evapora de inmediato, permitiendo tener el peso real o humedad en equilibrio.

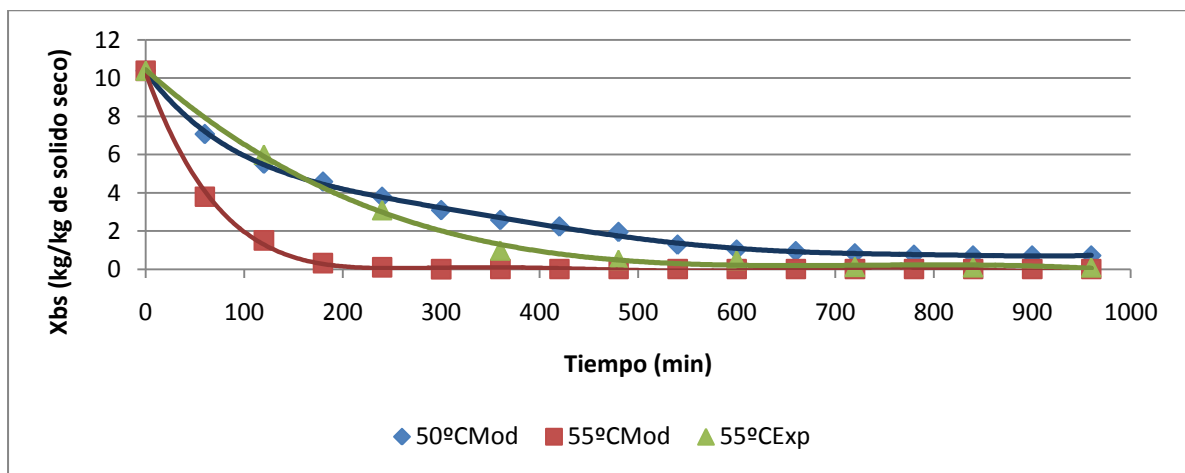


Figura 4-6. Gráfica que muestra la variación del contenido de humedad en base seca en función del tiempo.

### Relación de humedad.

La figura 4.7 muestra la variación con el tiempo de la variable Y (adimensional) que está asociada al contenido de humedad de las muestras de chile habanero.

Como se observa en las Gráficas anteriores al igual que esta se observa en primera instancia el efecto de la temperatura sobre el proceso. En términos generales y como era de esperar el incremento de la temperatura del aire de secado aumenta la velocidad de secado reduciendo así el contenido de humedad en el producto. Por lo tanto en función de los resultados obtenidos se deduce que la cinética de secado en el chile habanero es dependiente de la temperatura del aire de secado si bien es cierto que estas diferencias disminuyen a medida que avanza el proceso.

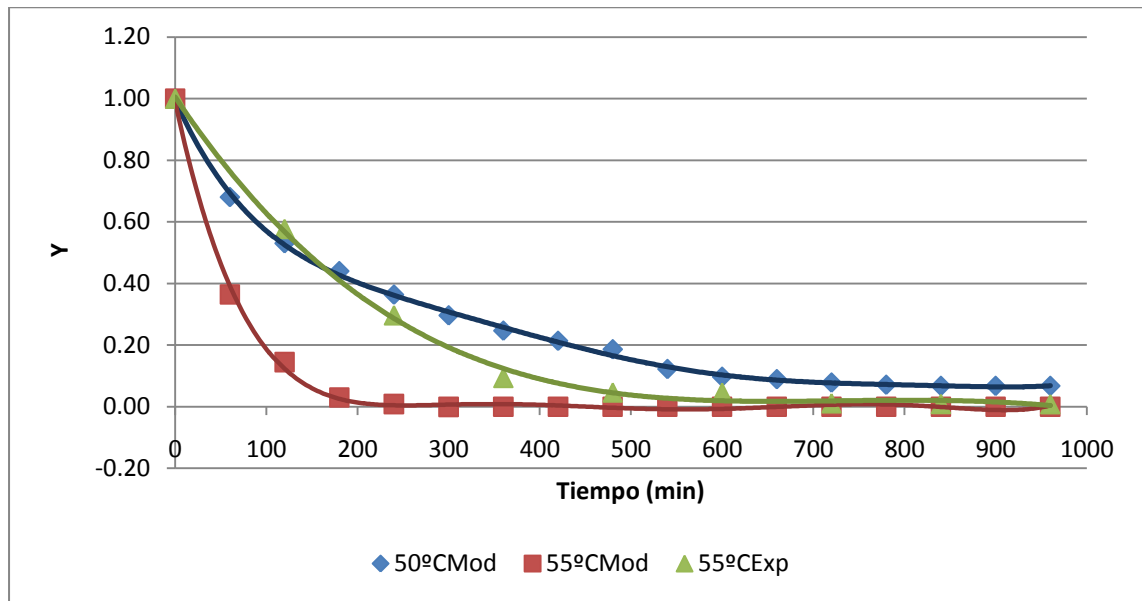


Figura 4-7. Gráfica que muestra la relación de contenido de humedad con respecto al tiempo.

### Correlación logarítmica.

La figura 4.8 muestra la gráfica de correlación logarítmica en donde sólo se tomó en cuenta las 4 primeras horas de secado ya que es el periodo en donde se da lugar la etapa constante, en donde se observa la relación de pérdida de humedad muy distante en la prueba hecha en túnel a 55°C (línea color rojo) a las otras dos pruebas. En esta gráfica se presentan los valores de los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) en los cuales se observan similitudes entre las diferentes pruebas, que se interpretan como un buen ajuste del modelo.

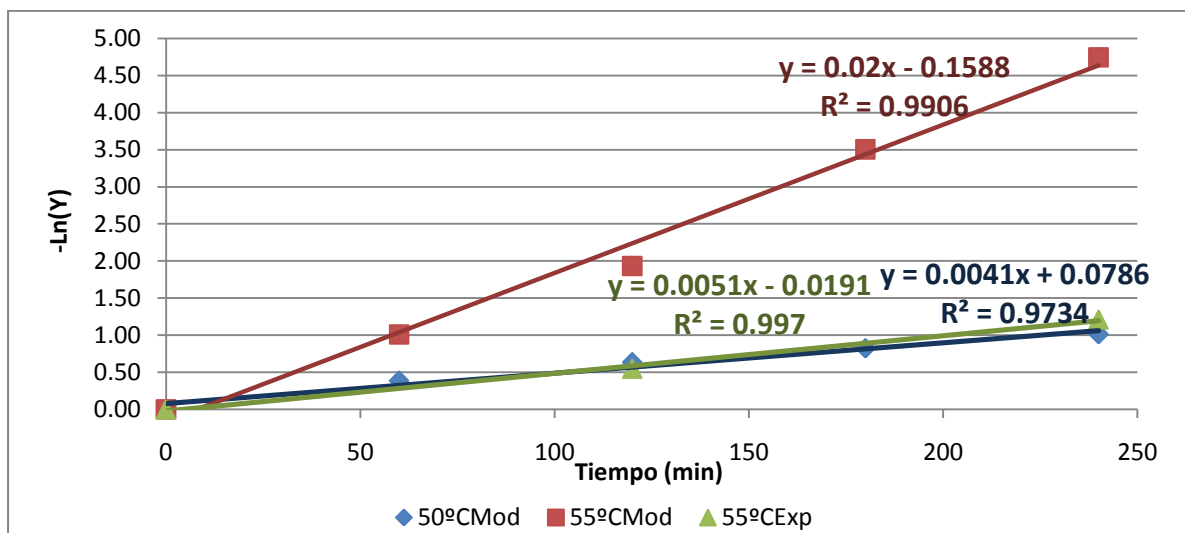


Figura 4-8. Gráfica que muestra la correlación logarítmica a 50° C y 55° C

### Actividad de agua.

En la figura 4.9 se presenta la curva de actividad de agua la cual como se hizo mención en el capítulo 2, muestra la influencia de la actividad de agua en las principales reacciones de deterioro en el producto. Si se compara y relaciona la curva obtenida con la figura 2.8 se observa la similitud en apariencia con la curva de efecto de oxidación. Lo que demuestra que la oxidación de las muestras está ligada a la pérdida de humedad base seca del producto de entre el 40 y 10 % y una actividad de agua de 0.4 a 0.8.

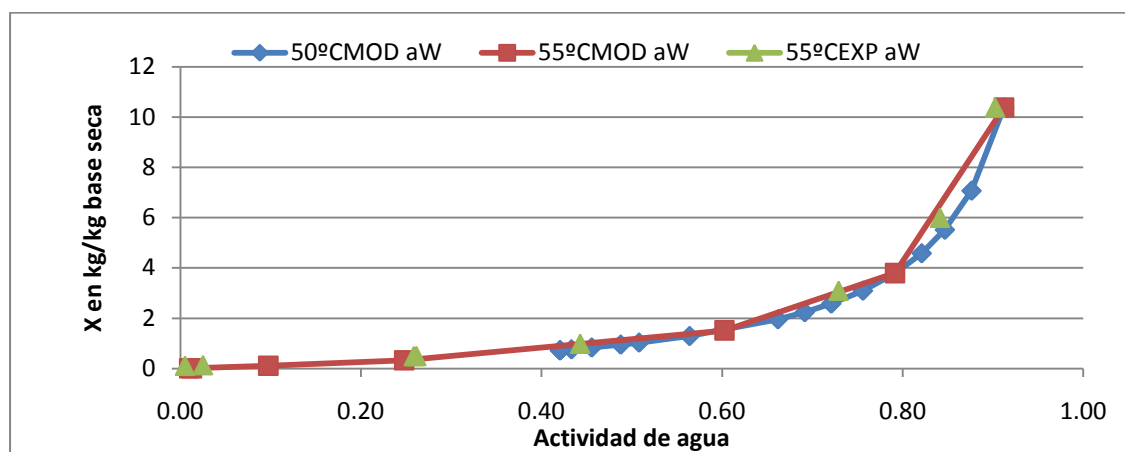


Figura 4-9. Gráfica que muestra las curvas de actividad de agua  $a_w$



## CAPITULO 5. CONCLUSIONES.

Se ha demostrado que el uso de las energías renovables genera productos de calidad similar a los productos que utilizan energía eléctrica y gas LP.

Se ha logrado obtener un producto seco que se ha mantenido sin deteriorarse desde el 24 de septiembre del 2008, mantienen la textura y color hasta esta fecha, no presentan enmohecimiento y conservan su aroma.

Mediante pruebas gustativas se comprobó que el chile habanero deshidratado no pierde picor, sino que parece concentrarse más, este se libera dependiendo del método de rehidratación.

Existen gran variedad de artículos de secado que se encuentran a la mano mediante internet, sin embargo la variedad de productos deshidratados todavía es poca, por lo que es necesario hacer más pruebas de secado para determinar el coeficiente de difusión de calor y masa en diferentes productos con el fin de demostrar el uso eficiente de la energías renovables. Gracias a los artículos adquiridos se reduce el tiempo en investigación aunque para realizar un análisis profundo es necesario contemplar además de los procesos termodinámicos, los procesos químicos que afectan internamente al producto. Sin embargo este estudio es complejo ya que todos los productos agropecuarios (frutas y vegetales) son diferentes en forma, textura, sabor, pH y nutrientes característico de cada producto.

Mediante el proceso de escaldado en el producto se logró obtener un color brillante y una textura firme al final del proceso de secado, pero si el tiempo sumergido en el agua caliente se incrementa el color del producto se opaca desde antes de someter al producto en el proceso de secado, esto aumenta el oscurecimiento debido a la oxidación natural del producto.

Se ha comprobado que la temperatura influye mucho en el proceso de secado, en las pruebas se observo que a temperaturas menores de 55°C el tiempo además de alargarse el producto tiende a equilibrarse en humedad con el ambiente lo cual con el tiempo no se pudo disminuir el contenido de humedad del producto. Con las pruebas realizadas de secado en el túnel de secado se pudo observar el tiempo de secado constante del producto a analizar es de 6 horas, gracias a las pruebas realizadas en laboratorio se determino el mejor método (escaldado a temperaturas altas por tiempos cortos), para el secado de productos en campo, es decir, en un secador solar.

Cabe resaltar que existe una enorme diferencia en el proceso y tiempo, ya que el secado solar depende mucho de las condiciones climatológicas y el entorno del lugar en donde se realice el secado.

Durante las pruebas se observó que el producto adquiere un aroma a humedad pese a que este alcanza su peso seco, esto es debido al almacenamiento del producto para la continuidad del secado al siguiente día, este se mantiene una actividad de agua 0.8, habría de adecuar el secador solar con aislantes térmicos que permitan disminuir la disipación de calor por radiación al ambiente para que el producto permanezca dentro de la cabina de secado con esto continuar el proceso de secado y así reducir la actividad de agua por debajo de un valor de 0.4.

En el transcurso de las 11:00 hrs a 15:00 hrs se capta mayor irradiancia solar con lo que se gana calor suficiente para que la temperatura se incremente dentro de la cabina de secado.

Mediante las pruebas de secado se observaron detalles a tomar en cuenta para el correcto uso del secador solar de tipo indirecto con respecto a la toma de mediciones, ya que al abrir por periodos de tiempos la puerta de la cabina de secado para tomar la medida del peso de la muestra existe una pérdida de calor y esto afecta el proceso de deshidratación.

Finalmente se recomienda que cada dos horas se intercambien de posición las bandejas de secado y así obtener una pérdida de humedad proporcional en el producto. Al igual que un horno convencional, se recomienda precalentar la cabina de secado a una temperatura mayor de 50°C antes de introducir el producto a deshidratar, así se reducirá el tiempo de secado en la etapa de velocidad de secado constante y también se reducirá la actividad de agua en el producto por lo que al almacenar el producto para la continuidad del proceso de secado en siguientes días las muestras no presenten crecimiento de microorganismos y aroma a humedad. Cuando la cabina de secado se sature de humedad hay que purgar la humedad, esto aproximadamente cada hora o cuando se sienta en el ambiente el aroma del producto húmedo.

## GLOSARIO.

**Absorción.** Dicho de una sustancia sólida: Ejercer atracción sobre un fluido con el que está en contacto, de modo que las moléculas de este penetren en aquella.

**Adsorción.** Atraer y retener en la superficie de un cuerpo moléculas o iones de otro cuerpo.

**Difusión.** En esencia se refiere a la propiedad de transporte de materia a escala molecular de cada componente del sistema de un lugar a otro del mismo. Tiene su origen conceptual en la teoría cinética de los gases.

**Escaldado.** Este proceso provoca en los vegetales que se conserve la firmeza del producto debido a la activación de la enzima pectinesterasa (PE) lo cual ocasiona una serie de cambios bioquímicos cuyo resultado es la formación de estructuras moleculares insolubles que permiten obtener un producto firme.<sup>29</sup>

**Energías renovables.** También llamada energía alternativa o blanda, este término engloba una serie de fuentes energéticas que en teoría no se agotarían con el paso del tiempo.

**Humedad.** Medida del contenido de agua en la atmósfera.

**Procesado y Conservación de alimentos.** Mecanismos empleados para proteger a los alimentos contra los microbios y otros agentes responsables de su deterioro para permitir su futuro consumo. Los alimentos en conserva deben mantener un aspecto, sabor y textura apetitosos así como su valor nutritivo original.

**Secado y deshidratación.** Aunque ambos términos se aplican a la eliminación del agua de los alimentos, en la tecnología de los alimentos el término secado se refiere a la desecación natural, como la que se obtiene exponiendo el producto a la acción del sol y el de deshidratación designa el secado por medios artificiales, como la exposición del producto a una corriente de aire caliente<sup>30</sup>.

La deshidratación implica el control sobre las condiciones climáticas dentro de una cámara o el control de un micromedio circundante. El secado solar está a merced de los elementos del entorno.

Los alimentos secados en una deshidratadora pueden tener mejor calidad que sus duplicados secados al sol. Se necesita menos terreno para la actividad deshidratadora.

**Solar.** Relativo al Sol.

---

<sup>29</sup> Aguilar C. N., Reyes M. de la L. Aspectos bioquímicos de la relación entre el escaldado TB-TL y la textura de vegetales procesados. Journal of the Mexican Chemical Society 1999. México, México.

<sup>30</sup> M.i. Hernández E. Uso de la energía solar en la deshidratación de frutas y vegetales. Benemérita universidad autónoma de Puebla. Facultad de ingeniería química.

**Sorción.** Es un término general utilizado para describir la asociación de compuestos químicos en forma disuelta o gaseosa con el suelo.

**Sublimación.** Pasar directamente del estado sólido al de vapor.

**Temperatura.** Propiedad de los sistemas que determina si están en equilibrio térmico.

**Variac.** Dispositivo electrónico diseñado para realizar variaciones de voltaje bruscas y fuertes con el fin de realizar pruebas a otros dispositivos.

## BIBLIOGRAFÍA

- A., R. J. *Principios de secado*. Universidad Autónoma de Baja California Sur.
- Agropecuaria, C. C. *Deshidratación de frutas*. Espinal, Tolima, Colombia.: Centro de Investigación NATAIMA.
- Aguilar, C. N. (1999). Aspectos de la relación entre el escaldado TB-TL y la textura de vegetales procesados. *Journal of the Mexican Chemical Society*.
- Arsdel, W. B. (1963). *Food Dehydration*. Avi. Westport, Connecticut.
- Casp, A. A. *Proceso de conservación de alimentos. Segunda edición*. España.
- Chacon, S. A. (2006). Manual de procesamiento de frutas tropicales a escala artesanal, en el salvador. Santa Tecla, La Libertad, El Salvador.
- Crank, J. (1975). *The mathematics of diffusion*. Oxford.: Pergamon Press.
- Franzen, K. A. (1988). *Nonenzymatic browning of skim milk during dehydration*. Purdue University.
- G. Nonhebel, M. A. (1979). *Teoría simplificada del secado de sólidos. El secado de sólidos en la industria química*. Reverté S. A.
- Green, M. y. (2001). *Solar Technology for Food Preservation*. GTZ-GATE.
- Guzman-Maldonado, S., Torres-Pacheco, I., & Gonzalez-Chavira, M. (2002). Genetic Variability and Processing Effect on Nutroceutical Factors of Jalapeño Pepper. *16th International Pepper Conference*. Tampico, Tamaulipas.: Pozo-Camonodico, O.
- Heldman, D. R. (1992.). *Food engineering handbook*. New York.
- Hernández, E. (s.f.). Uso de la energía solar en la deshidratación de frutas y vegetales. *Benemérita universidad autónoma de puebla*.  
[http://editorial.cda.ulpgc.es/ambiente/2\\_clima/2\\_oleamiento/index.html](http://editorial.cda.ulpgc.es/ambiente/2_clima/2_oleamiento/index.html). (s.f.).
- [http://www.conaproch.org/ch\\_chiles\\_diccionario\\_chilehabanero.htm](http://www.conaproch.org/ch_chiles_diccionario_chilehabanero.htm). (s.f.).
- [http://www.unavarra.es/genmic/cursos/microbiologia/general/notas\\_de\\_microbiologia\\_de\\_los\\_al.htm](http://www.unavarra.es/genmic/cursos/microbiologia/general/notas_de_microbiologia_de_los_al.htm). (s.f.).
- Ibañes, M. y. *Tecnología Solar*.
- Keey, R. (1999). *Theoretical foundations of drying technology in advances in drying. Vol. 1*. Aron S. Mujadar.
- Marcilla, A. (1999). Introducción a las operaciones de separación. *Publicaciones de la Universidad de Alicante*.
- Martin, M. (2006). Manual Calor. *Manuales de diseño ICARO*.
- Maupoey, P. F. *Introducción al secado de alimentos por aire caliente*.
- One, S. (s.f.). *Weatool V. 1.10 Climatic Visualisation and Desing Analysis*. Obtenido de [www.aqu1.com](http://www.aqu1.com)
- Rosas, M. y. *Energía Solar Térmica*.
- Torres, E. (2002). Notas del curso: Secado Solar. *XXVI SEMana Nacional de Energía Solar*.
- Treybal, R. E. (1981). *Mass - Transfer Operations. Thirt Edition*. Singapore.
- Vega, A. (s.f.). Modelado de la cinética de secado del pimiento rojo. *Universidad de ingeniería en alimentos*.  
[www.inifap.gob.mx/quienes.../nota\\_chile\\_habanero-final.pdf](http://www.inifap.gob.mx/quienes.../nota_chile_habanero-final.pdf). (s.f.).