



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

División de Ciencias e Ingeniería

**Determinación de coeficientes de difusión de
humedad de productos agrícolas.**

TESIS RECEPCIONAL

Para obtener el Grado de

Ingeniero en Sistemas de Energía

PRESENTA

ANTONIO FERNANDEZ CASTILLO

DIRECTOR DE TESIS

DR. JOSE HERNANDEZ RODRIGUEZ

Chetumal, Quintana Roo, Julio 2010



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: Dr. Fernando E. Flores Murrieta

Asesor: M.C. Jaime Cuevas Domínguez

Chetumal, Quintana Roo, Abril del 2010

Yo he pedido a Dios fuerza para triunfar;
Y el me ha dado flaqueza para que
Aprenda a obedecer con humildad.

Había pedido salud para realizar grandes empresas;
Me ha dado siempre enfermedad
Para que haga cosas mejores.

Deseo riquezas para llegar a ser dichoso;
Me ha dado pobreza para alcanzar sabiduría.

Quise poder para ser apreciado por los hombres;
Me concedió debilidad a fin de que llegara a tener deseos de El.

Pedí un compañero para no vivir solo;
Me dio un corazón para que pudiera
Gozar de todas cosas.

No tengo nada de lo que he pedido; pero he
Recibido todo lo que había esperado.

Porque sin darme cuenta, mis plegarias in formuladas
Han sido escuchadas.

Yo soy, entre todos los hombres, el más rico.

AGRADECIMIENTOS.

Sagrada Familia de Nazareth: enséñanos el recogimiento, la interioridad; danos la disposición de escuchar las buenas inspiraciones y las palabras de los verdaderos maestros; enséñanos la necesidad del trabajo, de la preparación, del estudio, de la vida interior personal, de la oración, que sólo Dios ve en lo secreto; Enséñanos lo que es la Familia, su comunión de amor, su belleza simple y austera, su carácter sagrado e inviolable. Amén

(Paulo VI)

Ofrezco mis más sinceros agradecimientos de corazón a la hermosa familia que Dios me dio ya que me apoyó a lo largo de mi camino de mi vida, y particularmente en mi carrera a superarme día a día, y ser un buen ser humano, es por ello que les agradezco a:

A mi padre: Antonio Fernández Torres por su sabiduría y fuerza, que demuestra todo lo que soy, por que una vez me lo dijiste “mas hace el que quiere y no el que puede”. Descanse en paz Papa.

A mi madre: Alba del Rosario de Fátima Castillo y Arceo por su amor, cariño y apoyo económico el cual me dio la oportunidad de continuar mis estudios.

A mis hermanos: Alba del Rosario Fernández Castillo, Eva Fernández Percastre, Raúl Fernández Percastre, Gualberto Fernández Percastre por su estimulación y su confianza.

A mi prometida futura esposa: Livia Johana de Jesús Cancino Herrera por su amor y motivación demostrándome que el amor se demuestra a base de confianza, respeto y de luchar día con día para ser mejores como persona.

A mis compañeros de estudio: Julio Carrillo, Josue López, Pablo López, Carlos Peña, Omar Martínez, Rolando Cáceres, Abril García, Freddy Arjona, etc. Por sus compañías que hicieron que mi trayectoria de estudio por la universidad fuera más confortable a base de alegría y trabajo en equipo.

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento en especial al Dr. José Hernández Rodríguez, por dirigir esta tesis, por su enseñanza y apoyo, por que lo que le expreso mi admiración y respeto.

A los miembros del jurado revisor: M.C. Fernando Flores Murrieta y al M.C. Jaime Cuevas Domínguez, por sus comentarios que fueron de gran utilidad.

Profesores de la carrera de Ingeniería en Sistemas de Energías y al Ing. Set Castillo, por su apoyo a lo largo de mis estudios con sus valiosos conocimientos.

¡DE CORAZON GRACIAS!

Este trabajo fue financiado en la Convocatoria 2010 “Apoyo a la titulación”, de la División de Ciencias e Ingeniería bajo el proyecto (UQROO/DCI/PI/02/08) (Estudio del Secado de Productos Agrícolas con Energía Solar).

RESUMEN.

El secado se define como un método de conservación de alimentos, que consiste en extraer el agua de un producto, con el fin de evitar la proliferación de microorganismos y el proceso de putrefacción, así como mejorar sus características y/o propiedades.

Dentro de los principales problemas afectan la producción de productos agrícolas se tiene a las plagas y sequías, pero además hay que considerar que también existe otro factor importante en la pérdida de producción, y esta es la mala calidad de la conservación del producto, es por eso que es necesario contar con métodos y técnicas eficientes de conservación, entre las que destacan el secado.

En este trabajo, se realizó un estudio sobre el proceso de secado de rebanadas de 5 mm de espesor de jitomate (*Solanum lycopersicum*) a baja temperatura (en el rango de los 45 a 60 °C), a dos velocidades diferentes de medio secante (de 1.8 y 2.6 m/s), comparando el efecto del uso de un pretratamiento en base a jugo de limón como alternativa para lograr una mejor apariencia final del producto.

Con los valores experimentales obtenidos, se realizó el estudio de la cinética de secado del jitomate, para lo cual se han construido sus gráficas de comportamiento más representativas que son las de contenido de humedad, relación de humedad y logaritmo natural de la relación de humedad con respecto al tiempo.

De entre los principales resultados obtenidos de este trabajo, cabe señalar que se han calculado los valores del coeficiente de difusividad de humedad de las rebanadas de jitomate para diferentes temperaturas, así mismo se han analizado los efectos de la temperatura, velocidad del medio secante y el pretratamiento en la velocidad de secado. De la misma forma se han determinado las mejores condiciones para la conservación del jitomate.

Finalmente, se considera que la metodología empleada en el presente trabajo es factible de extrapolar a otros productos de origen agrícola.

INDICE GENERAL.

	<i>Página</i>
INDICE DE TABLAS.	7
INDICE DE FIGURAS.	8
NOMENCLATURA.	10
INTRODUCCION.	11
OBJETIVOS.	12
CAPITULO I.- ANTECEDENTES.	14
1.1- Definiciones Fundamentales.	14
1.2- Secado de sólidos.	15
1.3- Importancia del secado para productos agrícolas.	15
1.4- Clasificación de los secadores de productos agrícolas.	16
1.5- Secado tradicional.	18
1.6- Secado solar.	19
1.7- Secado tipo túnel.	20
1.8- Jitomate.	22
1.9- Importancia del jitomate como producto para el país.	23
CAPITULO II.- GENERALIDADES DEL SECADO.	25
2.1- Difusión.	25
2.2- Factores que modifican la velocidad de difusión.	25
2.3- Segunda ley Fick.	27
2.4- Formulación de la ecuación de Fick.	27
2.5- Conceptos fundamentales del secado.	31
CAPITULO III.- MATERIALES Y METODOS.	36
3.1- Materia de trabajo.	36
3.2- Metodología de las pruebas de secado.	42
CAPITULO IV.- EXPERIMENTACION Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.	48
4.1- Variables de estudio para la experimentación.	48
4.2- Obtención de curvas de secado.	49
4.3- Tabla de resultados.	54
4.4- Análisis de resultados.	61
CAPITULO V.- CONCLUSIONES.	78
GLOSARIO.	79
BIBLIOGRAFÍA.	81
ANEXOS.	82
A1.- Bitácora de pruebas de secado para el caso, tomate rojo sin tratamiento.	82
A2.- Bitácora de pruebas de secado para el caso, tomate rojo con tratamiento.	86
B.- Pruebas preliminares con otros productos.	92

INDICE DE TABLAS.

<i>número</i>		<i>página</i>
Tabla 3-1.-	Ejemplo de una hoja de resultados de la bitácora.	46
Tabla 4-1.-	Contenidos de humedad con respecto al tiempo de secado.	50
Tabla 4-2.-	Relación de humedad con respecto al tiempo de secado.	51
Tabla 4-3.-	LN de la relación de humedad con respecto al tiempo de secado.	52
Tabla 4-4.-	Contenidos de humedad con respecto al tiempo del jitomate sin tratamiento.	55
Tabla 4-5.-	Relación de humedad con respecto al tiempo del tomate rojo sin tratamiento.	56
Tabla 4-6.-	LN (relación de humedad) con respecto al tiempo del tomate rojo sin tratamiento.	57
Tabla 4-7.-	Contenidos de humedad con respecto al tiempo del tomate rojo bajo tratamiento de jugo de limón.	58
Tabla 4-8.-	Relación de humedad con respecto al tiempo del tomate rojo bajo tratamiento.	59
Tabla 4-9.-	LN (relación de humedad) con respecto al tiempo del tomate rojo bajo tratamiento.	60
Tabla 4-10.-	Resultados de los coeficientes de difusión.	76
Tabla A1-1.-	Mediciones para el día 16/06/09.	82
Tabla A1-2.-	Mediciones para el día 17/06/09.	83
Tabla A1-3.-	Mediciones para el día 21/04/09.	83
Tabla A1-4.-	Mediciones para el día 22/06/09.	84
Tabla A1-5.-	Mediciones para el día 24/06/09.	84
Tabla A1-6.-	Mediciones para el día 23/06/09.	85
Tabla A1-7.-	Mediciones para el día 10/06/09.	85
Tabla A1-8.-	Mediciones para el día 20/05/09.	86
Tabla A2-1.-	Mediciones para el día 08/09/09.	86
Tabla A2-2.-	Mediciones para el día 09/09/09.	87
Tabla A2-3.-	Mediciones para el día 10/09/09.	87
Tabla A2-4.-	Mediciones para el día 11/09/09.	88
Tabla A2-5.-	Mediciones para el día 12/09/09.	88
Tabla A2-6.-	Mediciones para el día 13/09/09.	89
Tabla A2-7.-	Mediciones para el día 14/09/09.	89
Tabla A2-8.-	Mediciones para el día 15/09/09.	90
Tabla A2-9.-	Estudio para la obtención de la masa seca, durante el día 01/07/09.	90

INDICE DE FIGURAS.

<i>número</i>		<i>Página</i>
Figura 1-1.-	Diferentes medios para transferir el calor.	14
Figura 1-2.-	Secado de uvas de alimentos anticáncer y jamones ibéricos.	15
Figura 1-3.-	Componentes en el secado directo de jamaica.	16
Figura 1-4.-	Componentes del secador tipo bandeja.	17
Figura 1-5.-	Ejemplo de un secador discontinuo o por lote.	17
Figura 1-6.-	Secador continuo por deshumidificación para frutas semiconfitadas.	18
Figura 1-7.-	Secador tradicional de flujo libre.	19
Figura 1-8.-	Secador tradicional de flujo forzado.	19
Figura 1-9.-	Secador tipo túnel.	21
Figura 1-10.-	Configuración contracorriente del secador tipo túnel.	21
Figura 1-11.-	Diagrama de los tipos de configuraciones en el secador de túnel.	22
Figura 1-12.-	En rojo se señalan los estados que utilizan la palabra “tomate” y en verdes aquellos que usan “jitomate”.	22
Figura 1-13.-	Tomate rojo crudo.	23
Figura 1-14.-	Consecuencias por el calentamiento global.	24
Figura 2-1.-	Difusión a través de una placa plana.	29
Figura 2-2.-	Variables que participan en el secado de la muestra de jitomate.	32
Figura 2-3.-	Diferentes tipos de humedades para un producto.	33
Figura 2-4.-	Periodos de secado.	34
Figura 2-5.-	Periodo de velocidad de secado constante.	35
Figura 3-1.-	Balanza granataria.	36
Figura 3-2.-	Variac.	37
Figura 3-3.-	Vernier.	37
Figura 3-4.-	Termómetro digital.	38
Figura 3-5.-	Termopares tipo (k).	38
Figura 3-6.-	Termo-higrómetro ubicado en el exterior del túnel de secado.	38
Figura 3-7.-	Termo-higrómetro ubicado en el interior del túnel de secado.	39
Figura 3-8.-	Jitomate a Scar en el interior del túnel de secado.	39
Figura 3-9.-	Componentes del secado tipo túnel.	40
Figura 3-10.-	Horno eléctrico analógico.	41
Figura 3-11.-	Bascula digital.	41
Figura 3-12.-	Pretratamiento del jitomate.	43
Figura 3-13.-	Corte del jitomate en medallones de 5mm de espesor.	43
Figura 3-14.-	Masa inicial constante de 31.6 gr.	44
Figura 3-15.-	Distribución de las muestras de jitomate.	44
Figura 3-16.-	Instrumentación de los equipos.	45
Figura 3-17.-	Empaquetamiento de las muestras de jitomate ya secadas.	47
Figura 4-1.-	Análisis de l valor de dispersión de los datos R^2 .	53
Figura 4-2.-	Comportamiento de los contenidos de humedad de las diferentes pruebas, sin tratamiento.	61
Figura 4-3.-	Comportamiento de los contenidos de humedad con un solo ventilador, sin tratamiento.	62
Figura 4-4.-	Comportamiento de los contenidos de humedad con dos ventiladores, sin	63

Coeficiente de Difusión de Humedad

	tratamiento.	
Figura 4-5.-	Comportamiento del contenido de humedad a 45 °C, con 1 y 2 ventiladores, sin tratamiento.	64
Figura 4-6.-	Comportamiento del contenido de humedad a 50 °C, con 1 y 2 ventiladores, sin tratamiento.	65
Figura 4-7.-	Comportamiento del contenido de humedad a 55 °C, con 1 y 2 ventiladores, sin tratamiento.	66
Figura 4-8.-	Comportamiento del contenido de humedad a 60 °C, con 1 y 2 ventiladores, sin tratamiento.	66
Figura 4-9.-	Comportamiento de los contenidos de humedad de las diferentes pruebas, bajo tratamiento.	67
Figura 4-10.-	Comportamiento de los contenidos de humedad con un solo ventilador, bajo tratamiento.	68
Figura 4-11.-	Comportamiento de los contenidos de humedad con dos ventiladores, bajo tratamiento.	69
Figura 4-12.-	Comportamiento del contenido de humedad a 45 °C, con 1 y 2 ventiladores, bajo tratamiento.	70
Figura 4-13.-	Comportamiento del contenido de humedad a 50 °C, con 1 y 2 ventiladores, bajo tratamiento.	70
Figura 4-14.-	Comportamiento del contenido de humedad a 55 °C, con 1 y 2 ventiladores, bajo tratamiento.	71
Figura 4-15.-	Comportamiento del contenido de humedad a 60 °C, con 1 y 2 ventiladores, bajo tratamiento.	72
Figura 4-16.-	Comportamiento del contenido de humedad si cuenta con tratamiento de jugo de limón.	73
Figura 4-17.-	Comportamiento de la velocidad de pérdida de humedad, del jitomate sin tratamiento.	74
Figura 4-18.-	Comportamiento de la velocidad de pérdida de humedad, del jitomate bajo tratamiento.	75
Figura 4-19.-	Comportamiento de los coeficientes de difusión de humedad.	76
Figura A2-1.-	Comportamiento y obtención de la masa seca de la muestra, día 01/07/09.	91
Figura B-1.-	Secado de manzana.	92
Figura B-2.-	Secado de guayaba.	92
Figura B-3.-	Secado de pera.	92
Figura B-4.-	Secado de tomate verde.	92
Figura B-5.-	Secado de durazno.	92
Figura B-6.-	Secado de papaya.	92
Figura B-7.-	Secado de uva.	92
Figura B-8.-	Secado de mango.	92

NOMENCLATURA.

D	Coeficiente de difusión.
c	Concentración.
j	Flujo de la sustancia.
K	Conductividad térmica.
Cm	Capacidad calorífica.
Q	Cantidad de calor generada internamente.
ℓ	Espesor.
M_t	Masa difusante.
M_∞	Humedad en equilibrio.
t	Tiempo.
Kg.	Kilogramos.
m.s	Metros por segundo.
lb.	Libras.
gr.	Gramos.
° C	Grados centígrados.
cm.	Centímetros.
m.	Metros.
mm.	Milímetros.
min.	Minutos.
hrs.	Horas.
Ti	Tiempo inicial.
Te	Temperatura exterior.
Wi	Masa inicial.
%RH_i	Porcentaje de humedad relativa interior.
%RH_e	Porcentaje de humedad relativa exterior.
C.H.	Contenido de humedad.
MR	Relación de humedad.
R²	Dispersión de los datos.
Diff.	Difusividad efectiva.

INTRODUCCION.

El secado de productos agrícolas se puede definir de distintas maneras, según el enfoque que se desee adoptar. En los estudios más teóricos se pone el énfasis en los mecanismos de transferencia de energía y de materia. Así, el secado se puede definir como un proceso en que hay intercambio simultáneo de calor y masa, entre el aire del ambiente de secado y los productos agrícolas. En cambio, en los casos generales, se define el secado como la operación unitaria responsable de la reducción del contenido de humedad de cierto producto, hasta un nivel que se considera seguro para el almacenamiento de éste.

Se entiende que es seguro un nivel de humedad por debajo del cual se reduce la actividad respiratoria de los granos y se dificulta el ataque de insectos y hongos, dicho nivel varía con los distintos tipos de productos agrícolas.

Se han secado productos agrícolas desde los albores de la civilización. Al comienzo no había preocupación por el almacenamiento, y la disminución de la humedad se producía en el campo mismo. Era un "secado" que se realizaba en las condiciones naturales del ambiente, dictadas principalmente por la energía solar incidente y el movimiento del aire, es decir' por el viento. Más adelante se intentó controlar algunas de las condiciones del secado, y éste pasó a realizarse en hornos especiales o en recintos con suministro de calor. En el periodo entre la Primera y Segunda Guerras Mundiales se construyeron diversas unidades experimentales de secado. En aquella época sólo funcionaban algunas unidades comerciales, las que se destinaban, fundamentalmente, a la deshidratación de frutas, verduras, heno y al secado de semillas de maíz.

Después de la Segunda Guerra Mundial se hicieron comunes las grandes unidades de secado de granos comerciales, y en las haciendas se empezó a secar grandes cantidades de ellos.

Este aumento en la demanda de secado fue consecuencia del desarrollo de los métodos mecánicos de cosecha. En América Latina, una parte importante de la producción de productos agrícolas se seca todavía en forma primitiva, es decir, se seca en el campo durante largos periodos. El uso de esta técnica acarrea elevadas pérdidas de producción, puesto que los granos quedan expuestos, durante lapsos prolongados, a condiciones adversas y a la acción de depredadores.

Hay consenso, entre los técnicos del sector de alimentos de que el secado de productos agrícolas a bajas temperaturas presenta buenas perspectivas de aplicación en el país, principalmente ante la necesidad de ampliar la capacidad de almacenamiento de las haciendas, para lo cual esta tecnología reviste especial interés económico.

El secado a bajas temperaturas viene atrayendo, además, al sector productor de semillas, puesto que con tal sistema se puede mantener la calidad del producto cosechado mejor que con el uso de secadores que funcionan a temperaturas elevadas.

Como ya antes se mencionó el secado de productos agrícolas en el mundo es de suma importancia, existiendo varias empresas comerciales que se dedican a la elaboración y exportación de productos agrícolas deshidratados. Sin embargo, en México, un país productor y consumidor de esos productos, se tiene poco desarrollo en esta área, y en general se desconocen los parámetros de secado de muchos productos agrícolas. En el estado de Quintana Roo, existe un casi nulo desarrollo de investigaciones asociadas a este tema, aun cuando existe una gran necesidad por deshidratar diversos productos. Existiendo la posibilidad de generarse información valiosa como los valores de los coeficientes de difusión de humedad de los productos agrícolas, los cuales son parámetros de gran utilidad para comprender los procesos de secado y lograr productos de buena calidad.

En la actualidad la Universidad de Quintana Roo, esta empezando a desarrollar investigación en el área de secado, y una de las principales carencias es la falta de datos de experimentales de por ejemplo: los coeficientes de difusión de humedad, los cuales son parámetros necesarios para optimizar los procesos de secado. Actualmente se cuenta con equipo para realizar pruebas de secado convectivo, en las cuales se pueden determinar los coeficientes de difusión de humedad, peso real seco, y porcentaje de contenido de humedad. Asimismo, realizar análisis de comportamiento de los parámetros de secado y su interdependencia. Este trabajo, se espera pueda servir a los profesionales que se dedican a esta área de la ingeniería aportando información que es difícil de encontrar en la literatura.

EL OBJETIVO PRINCIPAL DE ESTE TRABAJO ES:

- Determinar experimentalmente los valores de los coeficientes de difusión de humedad de productos agrícolas.

PARA LO CUAL SE BUSCARÁ CUMPLIR CON LOS SIGUIENTES OBJETIVOS PARTICULARES.

- Obtener las curvas de deshidratación del jitomate.
- Determinar los coeficientes de difusión de humedad de algunos productos agrícolas a las temperaturas de 45,50, 55 y 60°C
- Elaboración de tablas de información, con los coeficientes de difusión de humedad determinados para algunos productos agrícolas.

Así para cumplir con los objetivos señalados, el siguiente trabajo de tesis, se ha dividido de la siguiente forma:

Capítulo I.- Antecedentes:

En este capítulo se presenta la definición fundamental de la deshidratación, la importancia de deshidratar productos agrícolas, tipos de secadores y su clasificación y por último el jitomate como producto y su importancia para el país.

Capítulo II.- Generalidades del secado:

En este capítulo se presenta el concepto de la difusión y los factores que modifican su velocidad, además se presenta la segunda ley de Fick y su formulación, por último los conceptos fundamentales del proceso de secado.

Capítulo III.- Materiales y métodos:

En este capítulo se presenta el material de trabajo y se hizo una mención clara de la metodología de las pruebas de secado para el proceso de la deshidratación de una muestra de jitomate con el apoyo del secador tipo túnel.

Capítulo IV.- Experimentación y análisis de resultados:

En este capítulo se presenta una idea clara de las variables de estudio para la experimentación, además que se implementa una metodología para la obtención de las curvas de secado para diferentes productos agrícolas, en este caso el estudio de la deshidratación del jitomate, y la obtención de las tablas de resultados y análisis de los mismos.

Capítulo VI.- Conclusiones:

En este capítulo se presentan las conclusiones resultadas de este trabajo de investigación.

CAPITULO I.- ANTECEDENTES.

En este capítulo se presentan en primer termino los conceptos fundamentales de la transferencia de calor y masa relacionados con el proceso de secado, posteriormente se hace una clasificación de los tipos de secadores empleados hoy en día en la industria atendiendo a sus principales características de operación, y se finaliza presentando algunos datos relevantes del jitomate para destacar su importancia a nivel comercial.

1.1- DEFINICIONES FUNDAMENTALES.

- **TRANSFERENCIA DE CALOR.**

Transferencia de calor, es el proceso por el cual se intercambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos, o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que están a distinta temperatura. El calor se transfiere mediante convección, radiación o conducción, como se aprecia en la figura 1-1. Aunque estos tres procesos pueden estar presentes simultáneamente.

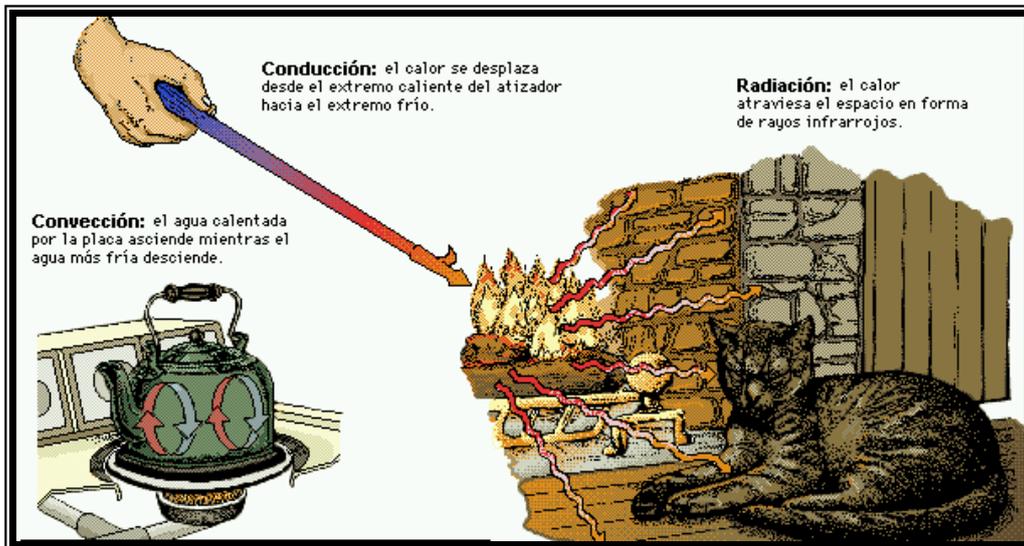


Figura 1-1.- Diferentes medios para transferir el calor.

- **CALOR.**

El calor es la transferencia de energía térmica desde un sistema a otro de menor temperatura. La energía térmica se puede generar por diferentes maneras, ejemplo: reacciones químicas; reacciones nucleares; dispersión electro magnética; disipación mecánica.

- **TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCION.**

Es una de las tres formas de transferencia de calor y se caracteriza porque se produce por intermedio de un fluido ya sea (aire, agua) que transporta el calor entre dos zonas con diferentes temperaturas. La transferencia por convección se produce únicamente por medio de materiales (fluidos), los cuales al calentarse, aumentan de volumen y, por

lo tanto, disminuyen su densidad y ascienden desplazando el fluido que se encuentra a menor temperatura, lo que se conoce comúnmente como convección, que es el transporte de calor por medio de las corrientes ascendente y descendente del fluido.

- **EQUILIBRIO TERMICO.**

Equilibrio térmico es un parámetro termodinámico que se caracteriza por tener la misma temperatura en dos cuerpos, que son dos sistemas en contacto térmico. En otras palabras, Al poner en contacto dos cuerpos a distinta temperatura, el de mayor temperatura cede parte de su energía al de menor temperatura hasta que sus temperaturas se igualan. Se alcanza así lo que se llama "equilibrio térmico".

1.2- SECADO DE SÓLIDOS.

El secado de sólidos consiste en un proceso de extracción y eliminación de pequeñas cantidades de agua u otro líquido de un material sólido, con el fin de reducir el contenido de humedad residual hasta un valor aceptable bajo, debido a la transferencia de calor y masa simultánea como característica de la termodinámica de los materiales. La transferencia de calor, evapora la humedad libre contenida en la superficie del sólido, mientras que la humedad contenida en el centro del sólido asciende hasta la superficie debido al mecanismo llamado flujo capilar, para luego ser evaporada. El secado es habitualmente la etapa final de una serie de operaciones y con frecuencia, el producto que se extrae de un secador es para empaquetado.

1.3- IMPORTANCIA DEL SECADO PARA PRODUCTOS AGRÍCOLAS.

El proceso de secado de productos agrícolas es de gran importancia, ya que es un método de conservación de alimentos, que consiste en extraer el agua de estos productos, como se observa en la figura 1-2, con el fin de evitar la proliferación de microorganismos y el proceso de putrefacción. Las bacterias y microorganismos del interior de los alimentos o productos son procedentes del aire y necesitan agua en el alimento para crecer. El secado les impide efectivamente sobrevivir en los productos. También crea una capa exterior dura, ayudando a evitar que los microorganismos penetren en los alimentos.



Figura 1-2.- Secado de uvas de alimentos anticáncer y jamones ibéricos.

1.4- CLASIFICACIÓN DE LOS SECADORES DE PRODUCTOS AGRÍCOLAS.

Los secadores pueden clasificarse de diversas formas, atendiendo a alguna característica principal de los mismos, de entre las diversas clasificaciones existentes, las más aceptadas son:

1. Método de operación, o sea, por lotes o continuo.
2. Método de obtención del calor necesario para la evaporación de la humedad. (Directos e Indirectos).
3. Naturaleza de la sustancia que se va a secar:

- Secadores directos.
- Secadores indirectos.
- Secadores diversos.
- Secadores discontinuos o por lote.
- Secadores continuos.
- Secadores para sólidos granulares o rígidos y pastas semisólidas.
- Secadores que pueden aceptar alimentaciones líquidas o suspensiones.

• SECADORES DIRECTOS.

La transferencia de calor para la deshidratación se logra por contacto directo entre los sólidos húmedos y un fluido caliente (Figura 1-3). El líquido vaporizado se arrastra con el medio de desecación; es decir, con el fluido caliente. Los secadores directos se llaman también secadores por convección.

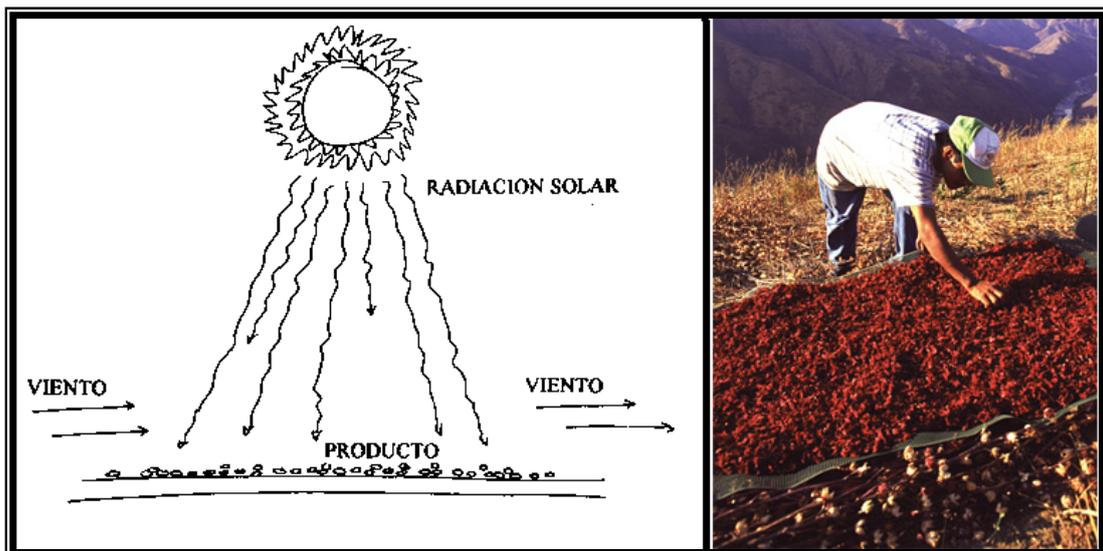


Figura 1-3.- Componentes en el secado directo de jamaica.

- SECADORES INDIRECTOS.

El calor de desecación se transfiere al sólido húmedo a través de una pared de retención. El líquido vaporizado se separa independientemente del medio de calentamiento. La velocidad de desecación depende del contacto que se establezca entre el material mojado y las superficies calientes. Los secadores indirectos (figura 1-4), se llaman también secadores por conducción o de contacto.

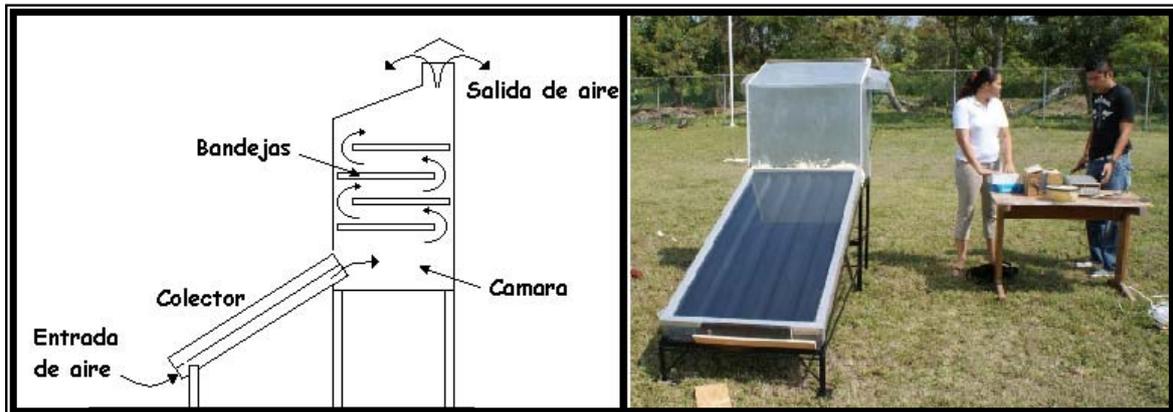


Figura 1-4.- Componentes del secador tipo bandeja.

- SECADOR DISCONTINUOS O POR LOTE.

El equipo por lotes, o semilotes, se opera intermitente o cíclicamente en condiciones de estado no estacionario: el secador se carga con la sustancia, que permanece en el equipo hasta que se seca; entonces, el secador se descarga y se vuelve a cargar con un nuevo lote. El secado por lotes (figura 1-5), es una operación relativamente cara; en consecuencia se limita a operaciones a pequeña escala, a plantas piloto y a trabajos de investigación, y para secar materiales valiosos cuyo costo total será poco alterado por el costo agregado en la operación de secado.



Figura 1-5.- Ejemplo de un secador discontinuo o por lote.

- **SECADORES CONTINUOS.**

En las operaciones continuas (figura 1-6), tanto la sustancia que se va a secar, como el medio secante pasan continuamente a través del equipo. Generalmente, no se utilizan métodos normales por etapas; en todas las operaciones ocurre el contacto continuo entre el medio secante y la sustancia que se seca.



Figura 1-6.- Secador continuo por deshumidificación para frutas semiconfitadas.

- **SECADORES DIRECTOS-CONTINUOS.**

La operación es continua sin interrupciones, en tanto se suministre la alimentación húmeda. Es evidente que cualquier secador continuo puede funcionar en forma intermitente o por lotes, si así se desea.

- **SECADORES DIRECTOS-POR LOTES.**

Se diseñan para operar con un tamaño específico de lote de alimentación húmeda, para ciclos de tiempo dado. En los secadores por lote las condiciones de contenido de humedad y temperatura varían continuamente en cualquier punto del equipo.

- **SECADORES INDIRECTOS-CONTINUOS.**

La desecación se efectúa haciendo pasar el material de manera continua por el secador, y poniéndolo en contacto con las superficies calientes.

- **SECADORES INDIRECTOS-POR LOTES.**

En general los secadores indirectos por lotes se adaptan muy bien a operaciones al vacío. Se subdividen en tipos agitados y no agitados.

1.5- SECADO TRADICIONAL.

Existen dos tipos de técnicas para el secado tradicional:

1. Flujo libre.
2. Flujo forzado.

Para el primer tipo de técnica flujo libre (figura 1-7), no se necesitan ventiladores para mover el aire seco. El aire se calienta dentro del secador variando su densidad, por esta

razón asciende hasta los productos. Esta técnica es muy sencilla, permite el uso de materiales locales por ejemplo: (madera para la estructura del equipo). Las ventajas de esta técnica es que tiene bajo costo en materiales y la técnica por si misma es entendible y manejable para el usuario, pero a pesar de ello esta técnica cuenta con la desventaja, de que el equipo produce volúmenes de secado pequeños. Por ello su uso es apto solamente para familias o pequeños agricultores.



Figura 1-7.- Secador tradicional de flujo libre.



Figura 1-8.- Secador tradicional de flujo forzado.

Para el caso de la técnica de flujo forzado (figura 1-8), se eliminan las desventajas de la técnica de flujo libre, ya que uno o varios ventiladores mueven el aire del secado hacia los productos. Se pueden trabajar con volúmenes elevados de productos, por que la presión que desarrollan los ventiladores permite que una buena cantidad de aire pueda atravesar capas gruesas de productos. De esta manera se puede tener un equipo que es apto para la industria. Con flujo libre esto no es posible. El secador tradicional que funciona con flujo forzado necesita corriente eléctrica para el uso de los extractores de aire. De esta manera, si no se desea utilizar paneles fotovoltaicos para accionar los ventiladores, el uso de los extractores esta limitado a lugares donde existan conexión a la red publica.

1.6- SECADO SOLAR.

Cuando se habla de secado solar se refiere al uso de la radiación solar como fuente de energía para el proceso de secado. Ahora bien el secado solar puede ser de dos formas: uno es secado solar indirecto en donde la radiación solar es captada por un colector, por donde circula cierta cantidad de aire, esta corriente o flujo de aire se calienta e ingresa a la cámara de secado donde se encuentra el producto a secar. El aire caliente en su paso por la cámara de secado logra así remover el contenido de humedad del producto.

La otra forma de secado solar, es el secado directo, en este caso la radiación solar incide directamente por el producto a ser secado, aprovechando así la energía calorífica necesaria para la evaporación de la humedad contenida en la superficie del producto.

En el secado solar existen diversos elementos que determinan las condiciones del secado, y que son:

- Características del producto: en este elemento se debe tomar en consideración el contenido inicial y final de humedad que se desea obtener. También en este punto debe considerarse el estado físico del producto su forma, el tamaño de su superficie y volumen.
- Otro elemento a considerar son las características del secador, si se utiliza una fuente de energía adicional.
- Por último se debe considerar las características meteorológicas como son la humedad relativa, la temperatura, la radiación solar, velocidad del viento, y precipitación.

El uso de un secador solar tiene ventajas con respecto del secado solar tradicional:

- Las temperaturas son más elevadas y en consecuencia, los contenidos de humedad son menores. Esto trae como resultado un proceso de secado más rápido y un contenido de humedad final menor.
- Las temperaturas elevadas que se generan, actúan como una barrera contra la presencia de insectos y el desarrollo de moho.
- El producto que se encuentra dentro del secador solar está protegido del polvo y de los insectos.
- Requiere de menor cantidad de terreno para igual cantidad de producto a secar.
- Permite un grado considerable de protección contra la lluvia, lo que hace innecesaria la mano de obra adicional para la recolección del producto.
- Resulta comparativamente más barato de construir y no necesita mano de obra especializada.

1.7- SECADOR TIPO TUNEL.

Este tipo de secador está formado por un túnel, por el cual circulan bandejas o vagones, en los que se coloca la muestra y el vagón hace un recorrido por un pequeño túnel con flujo constante de aire caliente y seco, este equipo se recomienda para procesos de secado continuos. Los vagones se mueven progresivamente a través del túnel por efecto de una cadena móvil. En uno de los extremos se carga el vagón con el material a secar y por el otro extremo se retira el vagón con la muestra seca. El calor se suministra por convección directa o haciendo uso de energía radiante. Actualmente existen algunos modelos que reemplazan a los vagones por una banda transportadora sin fin que hace el mismo recorrido del material a través del túnel de secado (figura 1-9).

En este tipo de secadores la humedad y temperatura cambian continuamente, como consecuencia el periodo de velocidad constante del secado de los materiales no aparece como constante porque decrece a medida que la temperatura disminuye, por tal razón las curvas de velocidad de secado no se aplican a los procesos de secado continuos. Este tipo de secadores es usado particularmente en la industria alimenticia.



Figura 1-9.- Secador tipo túnel.

A diferencia de los secadores de bandejas, en este caso, el área superficial no es tan importante, debido a que la velocidad del aire y el tiempo de estadía del material o producto a secar dentro del secador, pueden variar en un rango muy amplio, por ende, estos secadores son muy utilizados para materiales grandes (figura 1-10).

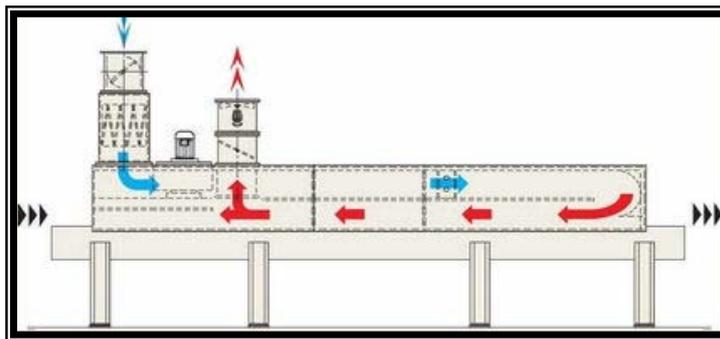


Figura 1-10.- Configuración contra corriente del secador tipo túnel.

Por otra parte los secadores tipo túnel pueden clasificarse de acuerdo a su configuración (figura 1-11), como:

- Paralelo.
- Contra corriente.

La primera configuración es la más suave para el producto mientras que, en la segunda configuración, el contacto del aire mas caliente con el producto seco, propicia el endurecimiento de su superficie. El secador tipo túnel puede alcanzar hasta 24m, de longitud y consiste en una cabina en la que hay un mecanismo de rieles que mueven carros con producto a secar a lo largo de ella. El proceso es entonces semi-continuo, además de ser utilizados comúnmente para la deshidratación de alimentos.

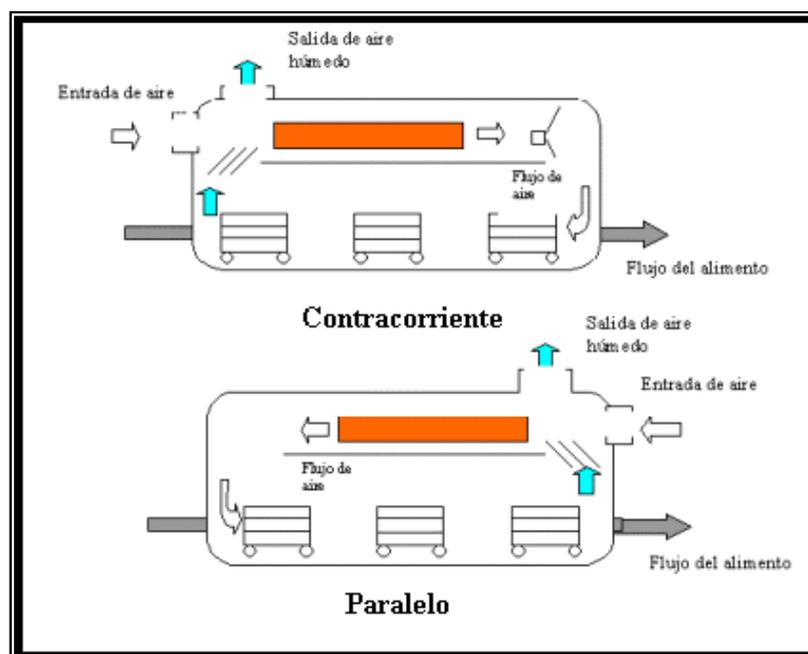


Figura 1-11.- Diagrama de los tipos de configuraciones en el secador de túnel.

1.8- JITOMATE. (*Solanum lycopersicum*).

La tomatera (*Solanum lycopersicum* L.) es una planta de la familia de las solanáceas (Solanaceae) originaria de América y cultivada en todo el mundo por su fruto comestible, llamado *tomate* (o *jitomate* en el sur y centro de México) como se observa en la figura 1-12. Dicho fruto es una baya muy coloreada, típicamente de tonos que van del amarillento al rojo, debido a la presencia de los pigmentos licopeno y caroteno. Posee un sabor ligeramente ácido y mide de 1 a 2 cm de diámetro en las especies silvestres, aunque suele ser mucho más grande en las variedades cultivadas.



Figura 1-12.- En rojo se señalan los estados que utilizan la palabra "tomate" y en verdes aquellos que usan "jitomate".

El jitomate es un alimento muy apreciado en diversas partes del mundo, debido a su escasa cantidad de calorías (100 g de jitomate aportan solamente 18 kcal), además de constituir una fuente importante de ciertos minerales tales como el potasio y el magnesio, así como de vitaminas entre las que destacan: B1, B2, B5 y C.

La mayor parte de su peso es agua y el segundo constituyente en importancia son los hidratos de carbono. Los azúcares simples que contiene le confieren un ligero sabor dulce y algunos ácidos orgánicos le otorgan un cierto sabor ácido que le caracteriza. El jitomate, presenta también carotenoides como el licopeno (pigmento que le da su color rojo característico como se aprecia en la figura 1-13).



Figura 1-13.- Tomate rojo, crudo.

En México la superficie dedicada al cultivo de jitomate es de 75 mil hectáreas que en el año de 2005 represento un total de 2.5 millones de toneladas cultivadas, con un valor de cerca de 8 mil millones de pesos.

El jitomate al igual que otros productos de origen vegetal presenta una actividad metabólica que continúa aún después de su cosecha, lo cual no permite que se pueda almacenar durante largos periodos de tiempo en estado fresco.

Así una de las formas mas efectivas de aumentar su tiempo de almacenamiento es reduciendo su contenido de humedad, mediante su deshidratación o secado, hasta un nivel en que se detenga el crecimiento de los microorganismos,

El interés por la producción de jitomate deshidratado ha crecido en los últimos años, por ser la base de la elaboración de diversos condimentos.

Cabe señalar, que aun cuando el secado es la opción más antigua utilizada para la preservación de alimentos, continúa siendo una operación compleja debido a que el proceso conlleva importantes cambios que ocurren en el producto.

1.9- IMPORTANCIA DEL JITOMATE COMO PRODUCTO PARA EL PAÍS.

El jitomate (*lycopersicon esculentum* mill.) es uno de los productos que ha creado grandes expectativas en el marco del TLC (Tratado de Libre Comercio). Esta es la firma entre México, Canadá y estados unidos de Norteamérica, confirmando la decisión de impulsar la apertura comercial como eje de su política económica, como objetivo principal es mejorar la productividad interna y de esta manera incrementar el volumen actual de las exportaciones.

El jitomate por su participación en la balanza agropecuaria mexicana es fundamental en la generación de divisas. En México, el jitomate y sus derivados son, por volumen y valor,

la principal hortaliza de exportación y el sostén básico de la estructura productiva y comercial de este subsector.

Los principales estados productores de jitomate en México son Sinaloa, Baja California, San Luis Potosí, Jalisco, Nayarit y Morelos en conjunto aportan más del 80% de la producción nacional del país de México, pero desafortunadamente un reporte presentado el 7 de junio del 2009, por el Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria (CEDRSSA), confirmó que plagas y sequías afectaron al 70% de los cultivos hortícolas de algunos estados provocando pérdidas por más de 400 millones de pesos a cerca de 20 mil productores. Esto significa que de una cosecha esperada de 50 mil toneladas siendo que apenas se alcanzaron 50, para esas mismas fechas el presidente de la República del país de México, indicó que el cambio climático costará 60 mil millones de dólares al país por pérdida en cultivos.(figura 1-14).

Aunado a las plagas y sequías, otro factor importante en la pérdida de la producción de jitomate es la contaminación o putrefacción del jitomate, ya que la poca producción que se cuenta no es conservada en óptimas condiciones.

Es por ello que es de gran importancia el almacenar nuestros productos de manera eficaz y controlada, por ejemplo deshidratando nuestros productos tendríamos menos pérdidas por contaminación o por putrefacción ya que lograríamos conservar nuestro producto con las condiciones específicas. Por la cual en este trabajo se realizó un estudio de las condiciones a las que debe deshidratarse el jitomate, tomando en cuenta que esta experimentación puede ser realizada también para diferentes productos agrícolas.



Figura 1-14.- Consecuencias por el calentamiento global.

CAPITULO II.- GENERALIDADES DEL SECADO.

En el capítulo que a continuación se presenta, el concepto de difusión como objeto de estudio de este trabajo y sus variables, posteriormente se hace el estudio de la formulación de la ecuación de la segunda ley de Fick, y se finaliza con los conceptos fundamentales que intervienen en la experimentación del secado.

2.1- DIFUSION.

Es el movimiento de los átomos, iones o moléculas, dentro de un material. Estos se mueven de manera predecible, tratando de eliminar diferencias de concentración y producir una composición homogénea y uniforme.

Observar la evolución de una gota de tinta en un vaso de agua, o de un cristal de alguna sustancia coloreada en el solvente adecuado, es un buen ejemplo de la difusión. Los olores que percibe el ser humano diariamente, son también experiencias de fenómenos de difusión en gases y líquidos, estados en los que por su misma situación de movilidad, los átomos se difunden con rapidez. Sin embargo este fenómeno es una tendencia general en la naturaleza, y aunque más lento, es igualmente observable en sólidos, tendiendo a homogeneizar las “imperfecciones”.

Los dos mecanismos importantes mediante los cuales ocurren estos procesos de difusión son la difusión por vacancia y la difusión intersticial:

- **DIFUSIÓN POR VACANCIA.**

Tanto en la autodifusión como en la difusión de átomos sustitucionales, un átomo puede abandonar su sitio en la red para llenar una vacancia cercana. Pero en el mismo momento se crea una vacancia en el sitio antes ocupado por él. Al progresar la difusión se observa un flujo de átomos y de vacancias en sentidos opuestos, conocido como difusión por vacancia.

- **DIFUSIÓN INTERSTICIAL.**

Si en la estructura cristalina está presente un átomo o ión pequeño en un sitio intersticial, éste pasará de un sitio intersticial a otro sin necesidad que existan vacancias. Este mecanismo será mucho más rápido que el anterior, ya que el número de sitios intersticiales es muchísimo mayor que el de vacancias.

2.2- FACTORES QUE MODIFICAN LA VELOCIDAD DE DIFUSIÓN.

La primera ley de Fick establece que el flujo J (el número de átomos, iones o moléculas que pasan en unidad de tiempo a través de un plano de superficie unitaria) es proporcional al gradiente de concentración $\Delta C / \Delta x$ (en átomos/cm³cm).

El gradiente de concentración puede crearse por ejemplo al poner en contacto dos materiales de distinta composición, y muestra la forma en que la composición varía con la

distancia a la zona de contacto. En general el flujo inicial es alto en la zona de contacto, y luego se reduce conforme disminuye el gradiente. Si el gradiente de concentración es constante (es decir si las composiciones a cada lado del plano no cambian) el flujo solo dependerá de la temperatura pero a menudo se observa que las concentraciones varían al irse redistribuyendo los átomos por lo que también el flujo cambia.

Cuando se incrementa la temperatura de un material, se incrementa el coeficiente de difusión D , y el flujo de átomos. Por ésta razón, el tratamiento térmico de metales y el procesamiento de cerámicos se efectúa a altas temperaturas. Así los átomos se mueven rápidamente para completar reacciones o alcanzar las condiciones de equilibrio.

Los factores que disminuyan la energía de activación incrementarán la difusión porque se requerirá menos energía térmica para vencer la barrera energética. La difusión intersticial, con una energía de activación baja, ocurre mucho más rápido que la difusión por vacancias.

La energía de activación Q será, en general, menor para átomos difundiéndose a través de estructuras cristalinas abiertas que compactas. Además, como Q depende de la fuerza del enlace atómico, será mayor para la difusión de átomos en materiales con alto punto de fusión.

Materiales con enlaces covalentes, como el carbono y el silicio, tienen Q extraordinariamente altas, acorde a la alta resistencia de sus enlaces atómicos.

En los materiales con enlaces iónicos, como los cerámicos, un ión que difunda sólo podrá ocupar un sitio que tenga su misma carga y a fin de llegar a dicho sitio, deberá abrirse paso entre los iones adyacentes, pasar por una región de carga opuesta y moverse una distancia relativamente larga. Por lo tanto, las Q son mayores y las velocidades de difusión son menores para materiales iónicos que para metales.

Debido a su menor tamaño, los cationes tienen coeficientes de difusión más altos que los aniones (por ejemplo en el NaCl, la Q para la difusión de los iones Cl^- es aproximadamente el doble que la correspondiente a la difusión de los iones Na^+).

En los polímeros puede existir difusión de átomos ó de pequeñas moléculas por entre las largas cadenas poliméricas (las bolsitas plásticas dejan pasar gases líquidos al estado de vapor, por ejemplo). De hecho, el polímero a emplearse deberá ser seleccionado según su función eligiendo los que permitan ó no la difusión: ésta será más rápida cuanto más pequeño sea el elemento en difusión y cuantos más huecos haya entre las cadenas del polímero. A través de los polímeros amorfos, de menor densidad, la difusión es mucho más rápida que a través de los polímeros cristalinos, con un orden de largo alcance.

Todo lo anterior se refirió en general a la difusión volumétrica, es decir a través del sólido, con energía de activación Q grande y relativamente lenta. Sin embargo los átomos también pueden difundir a lo largo de bordes, interfases y superficies del material, donde la compactación atómica y la organización del cristal no son buenas. De hecho, los átomos

difunden fácilmente por difusión en los bordes de grano y aún más fácilmente y con menos restricciones por difusión en superficies.

Finalmente, la última variable es el tiempo. Si para producir una estructura uniforme debe difundir un gran número de átomos, pueden requerirse extensos períodos, incluso a temperaturas altas.

Se observa que evitando la difusión (por ejemplo con enfriamientos rápidos desde altas temperaturas) pueden obtenerse estructuras fuera del equilibrio con propiedades especiales bastante notables que pueden ser deseables (tal el caso de los aceros) que son la base de tratamientos térmicos sofisticados.

2.3- SEGUNDA LEY DE FICK.

La ley de Fick es una ley cuantitativa en forma de ecuación diferencial que describe diversos casos de difusión de materia o energía en un medio en el que inicialmente no existe equilibrio químico o térmico. Recibe su nombre de Adolf Fick, que las derivó en 1855.

En situaciones en las que existen gradientes de concentración de una sustancia, o de temperatura, se produce un flujo de partículas o de calor que tiende a homogeneizar la disolución y uniformizar la concentración o la temperatura. El flujo homogeneizador es una consecuencia estadística del movimiento azaroso de las partículas que da lugar al segundo principio de la termodinámica, conocido también como movimiento térmico casual de las partículas. Así los procesos físicos de difusión pueden ser vistos como procesos físicos o termodinámicos irreversibles.

2.4- FORMULACION DE LA ECUACION DE FICK.

Cuando existen diferencias de concentración de cualquier especie (concentración de sustancia o temperatura), el paso aleatorio de las moléculas se llevará a cabo desde las regiones con mayor concentración hacia las regiones de menor concentración. El flujo de sustancia irá en el sentido opuesto del gradiente de concentración y, si éste es débil, podrá aproximarse por el primer término de la serie de Taylor, resultando la ley de Fick:

$$j = -D\nabla c \quad (2.1)$$

Siendo D el coeficiente de difusión de la especie de concentración c . En el caso particular del calor, la ley de Fick se conoce como ley de Fourier y se escribe como.

$$q = -k\nabla T \quad (2.2)$$

Siendo k la conductividad térmica.

Tomando la ley de conservación integral para la especie c , y aplicándole a esta última el teorema de Stokes se tiene:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_v c \, dV = - \int_{\partial v} j \cdot dS \Rightarrow \frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot j = 0 \quad (2.3)$$

Combinando el resultado anterior (2.3) con la ley de Fick (2.1) resulta la ecuación de difusión o segunda ley de Fick:

$$\frac{\partial c}{\partial t} - D \nabla^2 c = \frac{\partial c}{\partial t} - D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (2.4)$$

Si existe producción o destrucción de la especie (por una reacción química), a esta ecuación debe añadirse un término de fuente en el segundo miembro.

Para el caso particular de la temperatura, si se aplica que la energía interna es proporcional a la temperatura, el resultado es la ecuación del calor.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_v C_m (T - T_0) \, dV = - \int_{\partial v} q \cdot dS + \int_v \dot{Q} \, dV \Rightarrow \frac{\partial (C_m T)}{\partial t} + \nabla \cdot q = \dot{Q} \quad (2.5)$$

$$C_m \frac{\partial T}{\partial t} - K \nabla^2 T = \dot{Q} \quad (2.6)$$

Con C_m la capacidad calorífica y \dot{Q} la cantidad de calor generada internamente, si el medio es simplemente un conductor sin generación interna de calor $\dot{Q} = 0$

DEDUCCION DE LAS ECUACIONES DE DIFUSION.

Si se considera la difusión a través de una placa plana, como la mostrada en la figura 2-1, cuyo espesor (ℓ) y coeficiente de difusión (D), y cuyas superficies $x = 0$ y $x = \ell$ se mantiene a una concentración constante. C_1, C_2 respectivamente.

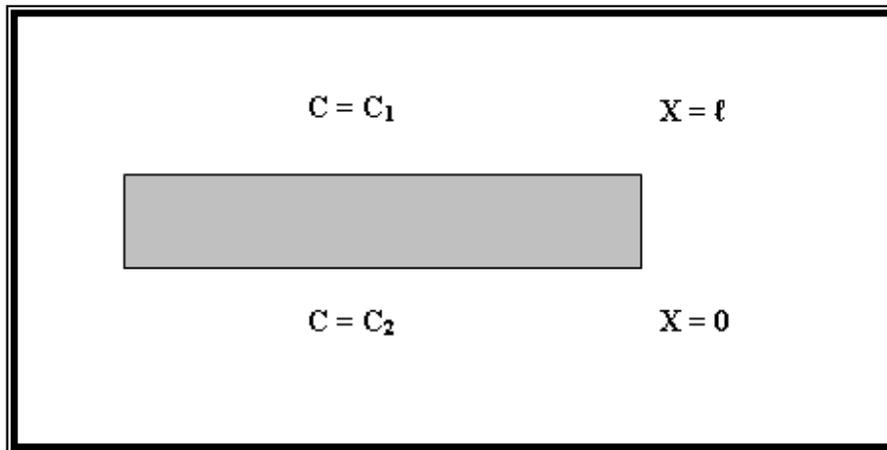


Figura 2-1.- Difusión a través de una placa plana.

Se plantea la ecuación general de difusión en una dimensión de la forma:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (2.7)$$

Si D es constante, la ecuación de difusión se transforma en:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (2.8)$$

La solución de esta ecuación, es obtenida ya sea por una transformación de Laplace o por separación de variables, con las siguientes condiciones de frontera:

$$\begin{aligned} c &= c_1 & ; x = l & \quad t \geq 0 \\ c &= c_2 & ; x = 0 & \quad t \geq 0 \\ c &= f(x) & ; x \leq l & \quad t = 0 \end{aligned}$$

Dando por resultado: (2.9)

$$c = c_1 + (c_2 - c_1) \frac{x}{l} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{c_2 \cos n\pi - c_1}{n} \operatorname{sen} \frac{n\pi x}{l} \exp \left[-D n^2 \pi^2 \frac{t}{l^2} \right] + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \operatorname{sen} \frac{n\pi x}{l} \exp \left[-D n^2 \pi^2 \frac{t}{l^2} \right] \int_0^l f(x') \operatorname{sen} \frac{n\pi x'}{l} dx'$$

Dicha solución generalmente es para concentraciones superficiales constantes y con una distribución inicial en función de x. Sin embargo, en la mayoría de los casos prácticos puede suponerse que las condiciones inicial y de frontera son fijas (esto es f(x) es cero o constante).

Debido a que las distribuciones de concentración en estado estacionario o régimen transitorio normalmente son difíciles de evaluar, es importante contar con expresiones analíticas en función del coeficiente de difusión y las condiciones de frontera:

Saidani-Scott [1] propone el siguiente modelo:

$$M_t = \frac{8\ell c_0}{\pi^2} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)^2} \exp\left[-\frac{D(2m+1)^2 \pi^2 t}{\ell^2}\right] \quad (2.10)$$

Donde: M_t representa la masa difusante (en el caso de secado corresponde a la humedad a retirar).

O bien, se puede representar también como:

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \frac{8}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)^2} \exp\left[-\frac{D(2m+1)^2 \pi^2 t}{\ell^2}\right] \quad (2.11)$$

Donde: M_∞ representa la humedad de equilibrio después de un tiempo (t) teóricamente infinito.

Así mismo, señala que sin sobrepasar un margen de error del 0.001%, se puede reducir la ecuación anterior a la siguiente:

$$\frac{M_t}{M_\infty} = \frac{4}{\pi^{1/2}} \left[\frac{Dt}{\ell^2} \right]^{1/2} \quad (2.12)$$

Otros investigadores como Rafice et al. [2], han encontrado diferentes soluciones para el caso del secado de granos, y se proponen utilizar la siguiente expresión:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left[-\frac{Dn^2 \pi^2 t}{r^2}\right] \quad (2.13)$$

Que puede ser reducida a:

$$\ln MR = \ln \left[\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \right] = \ln \left[\frac{6}{\pi^2} \right] - \frac{D\pi^2 t}{r^2} \quad (2.14)$$

Finalmente, Kamil S. [3] ha propuesto utilizar, la siguiente expresión para el caso de rebanadas de jitomate:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[\frac{-(2n+1)^2 n^2 Defft}{4L^2} \right] \quad (2.15)$$

La cual se puede simplificar al primer término de la serie de la forma:

$$\ln \frac{M}{M_0} = \ln \frac{8}{\pi} - \left[\frac{\pi^2 Defft}{4L^2} \right] \quad (2.16)$$

2.5-. CONCEPTOS FUNDAMENTALES DEL SECADO.

Una vez que se obtuvieron los valores y se registraron en la bitácora, se realizó también la prueba para obtener el valor de la masa seca de la muestra de jitomate, además que se estudiaron los conceptos fundamentales que se presentan en el proceso de la prueba de secado y experimentación de la misma, para la obtención de la difusividad específica de las pruebas de secado a diferentes temperaturas. Por lo que para el estudio de estos conceptos, se dividieron en dos partes como son:

- Conceptos que participan en la prueba de secado, (figura 2-2).
- Conceptos que participan en la experimentación de la prueba de secado.

Por otra parte se estudiaron estos conceptos, que ahora se desglosan.

CONCEPTOS QUE PARTICIPAN EN LA PRUEBA DE SECADO.

- **Medio poroso.**
Material sólido constituido por huecos o poros con contenidos de humedad.
- **Transferencia de calor.**
Proceso por el que se intercambia energía en forma de calor, entre distintos cuerpos.
- **Transferencia de calor por convección.**
Es una de las tres formas de transferencia de calor y se caracteriza porque se produce por intermedio de un fluido (aire, agua) que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas. La convección se produce únicamente por medio de materiales fluidos. Éstos, al calentarse, aumentan de volumen y, por lo tanto, su densidad disminuye y ascienden desplazando el fluido que se encuentra en la parte superior y que está a menor temperatura.
- **Transferencia de masa.**
Se le llama así al proceso por el cual un primer cuerpo cede materia a un segundo cuerpo.

- **Evaporación.**
Es un proceso por el cual una sustancia en estado líquido pasa al estado gaseoso, tras haber adquirido energía.

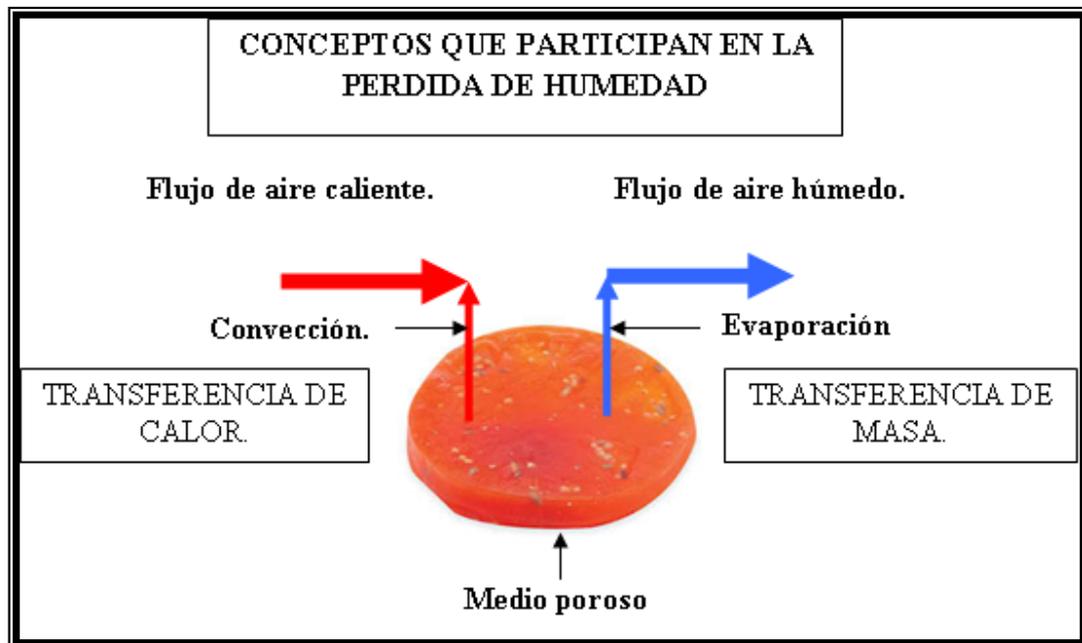


Figura 2-2.- Variables que participan en el secado de la muestra de jitomate.

CONCEPTOS FUNDAMENTALES EN LA EXPERIMENTACION.

- **Masa seca.**
Evaporación de toda la humedad de un material hasta llegar al peso seco.
- **Humedad asociada a un producto.**
La humedad asociada aun producto puede estar presente como se observa en la figura 2-3.

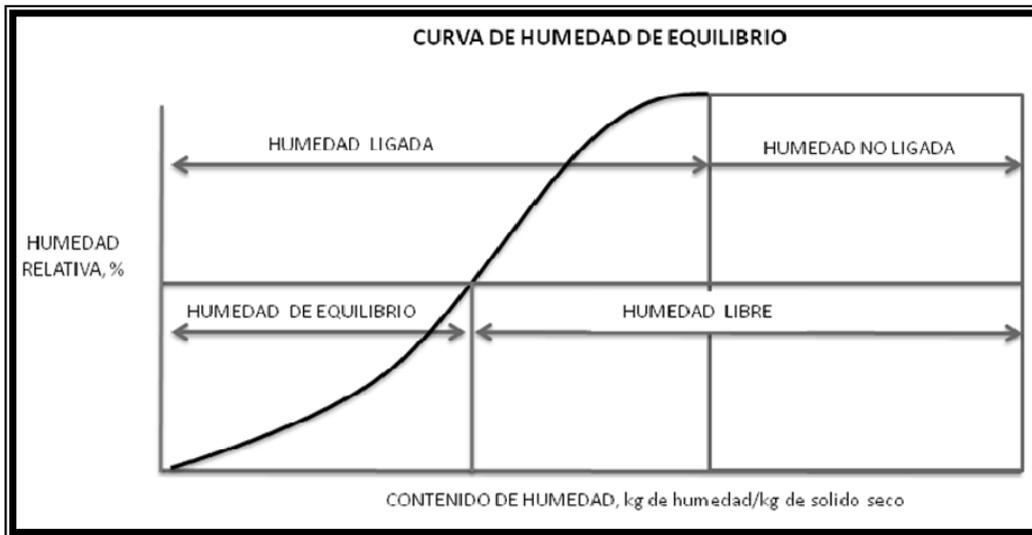


Figura 2-3.- Diferentes tipos de humedades para un producto.

- **Humedad ligada.**
Humedad que se encuentra fuertemente unida o asociada al material la cual se retiene en capilares diminutos, esta humedad ligada por lo general puede eliminarse solo exponiendo el material a altas temperaturas, por otra parte esta humedad ligada no se elimina con un proceso de secado convencional.
- **Humedad no ligada.**
Humedad que se encuentra en espacios vacíos dentro del medio poroso y la cual no esta unida o asociada al material a secar.
- **Humedad libre.**
Humedad que se encuentra se parada del materia es decir es una humedad, que no esta asociada con el medio poroso.
- **Humedad en equilibrio.**
Es la humedad del material cuya presión de vapor se equilibra a la presión de vapor del aire, es decir que la humedad del material esta en equilibrio con la humedad del aire ambiente.
- **Periodos de secado.**
El proceso de secado está normalmente dividido en tres fases: una fase inicial de precalentamiento o atemperación, seguido de otra de velocidad de secado constante y una o más fases de velocidad de secado decreciente. Figura 2-4, se muestra la curva de secado obtenida cuando se representa el contenido de humedad contra el tiempo de secado.

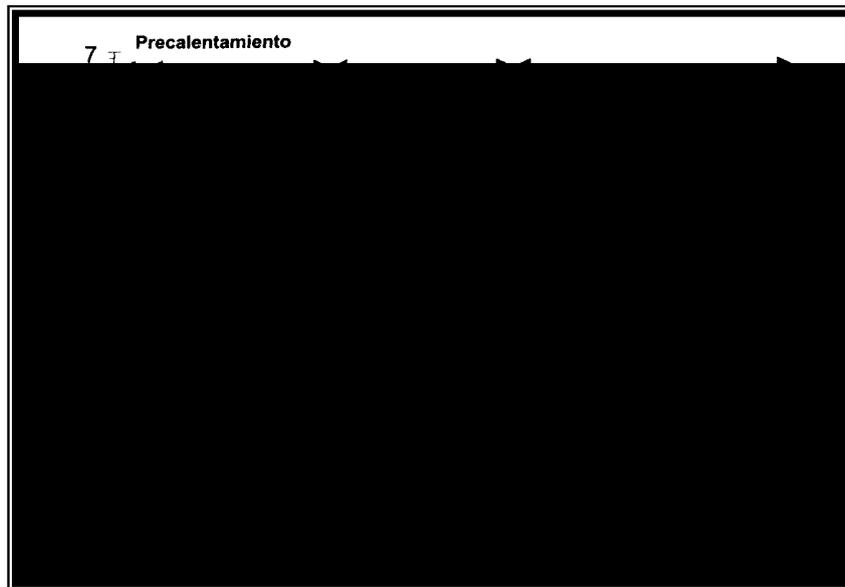


Figura 2-4.- Periodos del secado.

- **Periodo de atemperación o precalentamiento.**
 Transcurre mientras el producto y el agua contenida en él se calientan ligeramente, hasta alcanzar la temperatura de bulbo húmedo característica de ambiente secante. El producto a secar al principio está frío, su presión de vapor es igualmente baja, por lo tanto la velocidad de transferencia de masa es muy lenta. Por el contrario, el gradiente de temperatura entre el aire caliente y la superficie fría del producto es elevado, en consecuencia la transferencia de calor es alta. La cantidad de calor transferida a la superficie del producto es netamente superior a la cantidad de calor arrastrada por la poca agua evaporada, existe un desequilibrio. El excedente de calor se utiliza entonces en calentar la superficie del producto, lo cual produce una disminución del gradiente de temperatura, que cesará cuando se alcance el equilibrio estacionario. Este periodo es muy corto en comparación con el tiempo total de secado.
- **Periodo de velocidad de secado constante.**
 Se produce durante una importante reducción de agua. El agua de imbibición se elimina con un flujo másico constante. La evaporación se efectúa en la superficie del producto, a temperatura constante, siendo ésta la de bulbo húmedo del aire. Durante este periodo, el flujo de calor intercambiado entre el aire y el producto se utiliza enteramente para la evaporación del agua. Este periodo continúa mientras que la superficie del producto esté alimentada por agua libre líquida desde el interior, fundamentalmente por capilaridad. En la mayoría de los casos esta etapa de velocidad de secado constante finalizará cuando el contenido medio de humedad del producto alcance el valor de la humedad crítica. Por lo tanto, en la curva de secado este periodo se deberá ajustar a una recta (la humedad crítica coincide con el punto en que la recta ajustada se separa de la curva de secado) (figura 2-5).

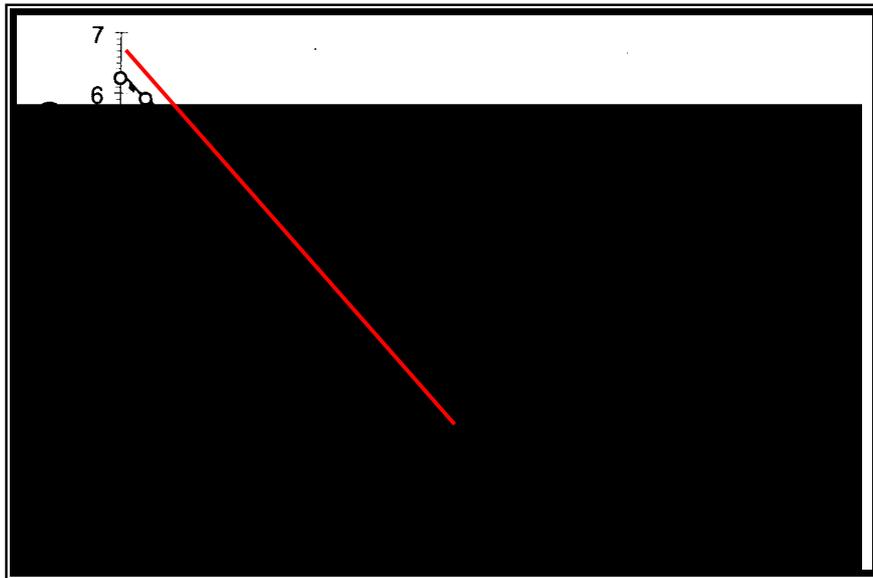


Figura 2-5.- Periodo de velocidad de secado constante.

- Periodo de velocidad decreciente.
Comienza cuando la superficie del producto en contacto con el aire de secado alcanza el umbral de higroscopicidad (para los materiales higroscópicos). Desde el punto de vista macroscópico, esto corresponde a alcanzar la humedad crítica. La zona de evaporación "frente de secado" que se encontraba en la superficie, se desplaza hacia el interior del producto. La brusca reducción de la superficie efectiva de transferencia, debida a una alimentación insuficiente de agua libre, es la causa de la disminución de la velocidad de secado. La migración del agua es cada vez más difícil y como consecuencia la transferencia de masa se convierte en el factor limitante. Los depósitos de solutos obstruyen los poros, el agua ligada migra bajo forma de vapor y la distancia a recorrer por el frente de vapor es cada vez mayor, todos estos factores frenan rápidamente la transferencia interna de agua

CAPITULO III.- MATERIALES Y METODOS.

En este capítulo se presenta, el material de trabajo, que fue herramienta importante para conocer el comportamiento de las variables en el proceso de secado de jitomate, para finalizar se proporciona la metodología realizada para las pruebas de secado de jitomate hechas con el secador tipo túnel.

3.1- MATERIAL DE TRABAJO.

El material utilizado para el análisis de las variables que intervienen en el secado del jitomate fue:

- **BALANZA GRANATARIA.**

Balanza Triple Beam de Ohaus (figura 3-1), serie 800 capacidades hasta de 2610 g o 5 lb., consta de tres barras con muescas y niveles con una lectura en gramos, muelle de ajuste a cero compensador y plataforma de acero inoxidable.

La función de este equipo fue en la determinación de la masa del producto durante el proceso de secado, (figura 3-1).



Figura 3-1.- Balanza granataria.

- **VARIAC O REGULADOR DE VOLTAJE.**

Marca: SSTACO, modelo 3pn1010b, voltaje de operación 120v 50/60hz, también llamado estabilizador de voltaje o acondicionador de voltaje (figura 3-2), es un equipo eléctrico que acepta una tensión de voltaje variable a la entrada, dentro de un parámetro predeterminado y mantiene a la salida una tensión constante (regulada).

Su función de este equipo, es la de regular la temperatura dentro del túnel de secado, ya que está conectado a las resistencias que se encuentran dentro del mismo.



Figura 3-2.- Variac.

- **PIE DE REY.**

El calibre, también denominado cartabón de corredera, pie de rey, pie de metro, pie a coliza o Vernier (figura 3-3), es un instrumento para medir dimensiones de objetos relativamente pequeños, desde centímetros hasta fracciones de milímetros ($1/10$ de milímetro, $1/20$ de milímetro, $1/50$ de milímetro). En la escala de las pulgadas tiene divisiones equivalentes a $1/16$ de pulgada, y, en su nonio, de $1/128$ de pulgadas. Instrumento de medición, marca: TRUPER, este instrumento es sumamente delicado y debe maniobrarse con habilidad, cuidado y delicadeza, con precaución de no doblarlo (en especial, la colisa de profundidad).

La función de este instrumento, fue para medir el grosor del producto a secar en este caso el jitomate y en algunas pruebas las variaciones de espesor debidas a la perdida de masa.



Figura 3-3.- Vernier.

- **TERMOMETRO DIGITAL Y TERMOPARES TIPO (K).**

Termómetro digital de dos canales, marca: LUTRON, modelo: tm-914c, trabajo de operación: -40 a 1200 °C.

La función del termómetro digital, fue la de determinar el valor de la temperatura en el interior del túnel de secado y la temperatura exterior del medio ambiente como se observa en la figura 3-4, para ello el termómetro digital cuenta con dos canales, en los cuales se conectan los termopares (figura 3-5) y los extremos de los termopares fueron colocados dentro y fuera del túnel de secado.



Figura 3-4.- Termómetro digital.

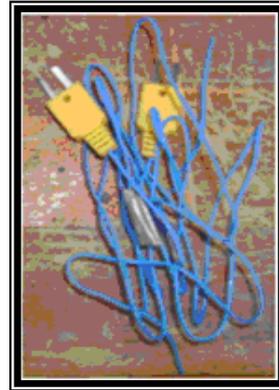


Figura 3-5.- Termopares tipo (k).

- TERMOHIGROMETROS.

Se utilizaron 2 termohigrómetros los cuales su función fue para determinar la humedad relativa de diferentes lugares o espacios.

El primero termo-higrómetro como muestra en la figura 3-6, fue empleado para determinar la humedad relativa del medio ambiente o exterior del túnel de secado este termo-higrómetro es de características, marca: TES, modelo: tes 1360 con un rango de operación de temperatura de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ y un rango de humedad relativa de 10% a 95% de RH.



Figura 3-6.- Termo-higrómetro ubicado en el exterior del túnel de secado.

El segundo termo higrómetro (figura 3-7), fue empleado para determinar el porcentaje de humedad relativa dentro del túnel de secado, ya que dentro del túnel estaba la muestra de jitomate puesta a secar, este termo-higrómetro es de características, marca: TES, modelo: 1365 termómetro de humedad relativa y temperatura, con un rango de operación de humedad relativa del 10% a 95% RH y un rango de temperatura de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Figura 3-7.- Termo-higrómetro ubicado en el interior del túnel de secado.

- SECADOR TIPO TUNEL.

El túnel de secado tipo convectivo es un equipo, cuya función de trabajo de laboratorio, fue el deshidratar el producto colocado en su interior como se observa en la figura 3-8.

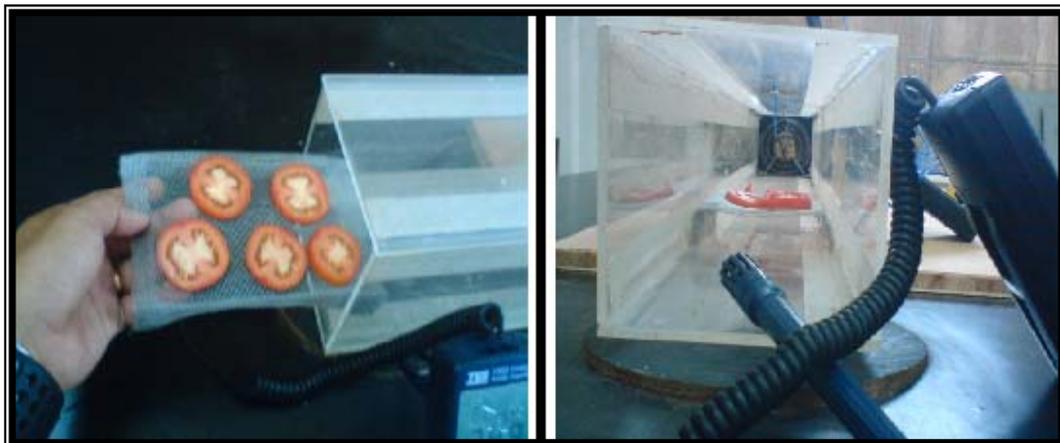


Figura 3-8.- Jitomate a secar en el interior del túnel de secado.

El secador tipo túnel (figura 3-9), cuenta con las siguientes características:

- Largo del túnel = 1.45m
- Altura = 13cm
- Ancho = 13cm
- Separación del ventilador a la resistencia = 7cm
- Controlador de ventiladores.
- Resistencia 1.
- Resistencia 2.
- Ventilador 1.
- Ventilador 2.



Figura 3-9.- Componentes del secador tipo túnel.

Por otra parte el material utilizado para determinar el valor numérico de la masa seca del jitomate fueron equipos que se encuentran en el laboratorio de química como:

- HORNO ELECTRICO.

El horno eléctrico cuenta con las siguientes características, marca: FISHER SCIENTIFIC, es un horno eléctrico analógico que opera a una temperatura máxima de 200 °C

Este equipo fue empleado para deshidratar el producto a una temperatura de 120 °C, durante 2 hrs. A fin de obtener la masa seca, como se observa en la figura 3-10.



Figura 3-10.- Horno eléctrico analógico.

- BASCULA DIGITAL.

La bascula digital cuenta con las siguientes características, marca: PRECISA, modelo: XB620C, y cuenta con un rango de operación de 0.01 g a 620 g.

La función de este equipo fue la de determinar la masa seca del jitomate como se observa en la figura 3-11, en donde para asegurarse de haber obtenido la masa seca, se efectuaron lecturas en intervalos de tiempo de 30min. Hasta que la masa final siempre fue el mismo en cuatro tomas de lecturas.



Figura 3-11.- Bascula digital.

3.2- METODOLOGIA DE LAS PRUEBAS DE SECADO.

La metodología de las pruebas de secado con el Secador tipo túnel convectivo, se dividió en cuatro etapas como se describe a continuación.

- Preparación del producto a secar (jitomate).
- Instrumentación de los equipos.
- Análisis de los parámetros en las pruebas de secado.
- Almacenamiento del jitomate.

Por otro lado cada etapa realizada durante la metodología de las pruebas de secado, cuenta con una serie de pasos para lograr su propósito satisfactoriamente, y se desglosa de la siguiente manera.

PROCESO PREPARACIÓN DEL PRODUCTO A SECAR (JITOMATE).

- **Recolección del Jitomate.**
El producto a secar se adquirió en el mercado local de la ciudad de Chetumal Q. Roo, este producto es comúnmente conocido por la región como jitomate, es importante comentar que para otros estados este producto se puede conocer como tomate.
- **Selección del jitomate.**
Para la selección de los jitomates a secar, se tomo en cuenta que el producto debía reunir las siguientes condiciones: físicamente en buenas condiciones, y similar grado de maduración.
- **Esterilización del jitomate.**
En un recipiente con agua, se agrego una pequeña concentración de cloro, provocando con esta actividad retirar algún parasito o insecto capaz de deteriorar el producto, ya que sino fuera así, el jitomate estaría mas propenso a estar en la etapa de descomposición y el tiempo de conserva se reduce.
- **Escaldado del jitomate.**
En un recipiente con agua se agregaron unas gotas de jugo de limón (figura 3-12), con el objeto de ayudar a mantener las propiedades físicas originales del producto, tales como su color, además de evitar la oxidación del jitomate, por otro lado el pretratamiento de escaldado también sirve en algunos casos para retirar la membrana exterior de algunos productos y favorecer la migración de humedad, dilatando los poros del producto.



Figura 3-12.- Pretratamiento del jitomate.

- **Corte en medallones de jitomate.**
Se cortó en medallones el jitomate con un espesor de 5mm (figura 3-13). Esto debido a que entre más grande sea el espesor del producto más es el tiempo del proceso de secado, por lo general algunos estudios anteriores recomiendan que el espesor este en un rango de 0.3cm. - 0.7cm. [Notas de la clase de secado solar].



Figura 3-13.- Corte del jitomate en medallones de 5mm de espesor.

- **Masa inicial de la muestra de jitomate.**
Después de cortar los medallones de jitomate, se procedió a pesar las muestras (figura 3-14), ya que se mantuvo un control de la masa inicial, es decir que para que se compararan las masas finales de las muestras se tenía que contar con la misma masa inicial en todas las pruebas y el cual fue de 31.6 gr.

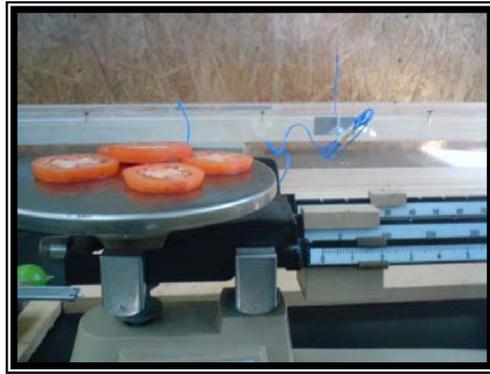


Figura 3-14.- Peso inicial constante de 31.6 gr.

- **Distribución de la muestra dentro del túnel de secado.**
Después de pesar la muestra inicial, se distribuyeron las muestras de medallones de jitomate en la bandeja, (figura 3-15) que se encontraba dentro del túnel de secado, de tal manera que hubiera un buen flujo de aire caliente y todas las muestras pudieran perder humedad, al mismo ritmo.



Figura 3-15.- Distribución de las muestras de jitomate.

PROCESO DE INSTRUMENTACIÓN DE LOS EQUIPOS DE MEDICIÓN.

- **Verificación de los instrumentos de medición.**
Antes de realizar cada prueba se verificó que los instrumentos de medición estuvieran en buen estado, además de calibrados, como por ejemplo la balanza, la báscula o los termopares, con esto se busca que los resultados obtenidos en las lecturas sean de lo más precisas posibles.
- **Instrumentos de medición en lugares estratégicos.**
Se colocaron los instrumentos de medición en los lugares específicos (figura 3-16), en donde se requería el análisis del comportamiento de la prueba, como por ejemplo se situó un termopar dentro del túnel de secado ya que se analizó la temperatura interior, el otro termopar se encontraba fuera del túnel y este daba la lectura de la temperatura exterior o medio ambiente, y lo mismo fue hecho con los termo higrometros, para el análisis de las humedades relativas, con esto se obtuvo un análisis completo de la prueba de secado.

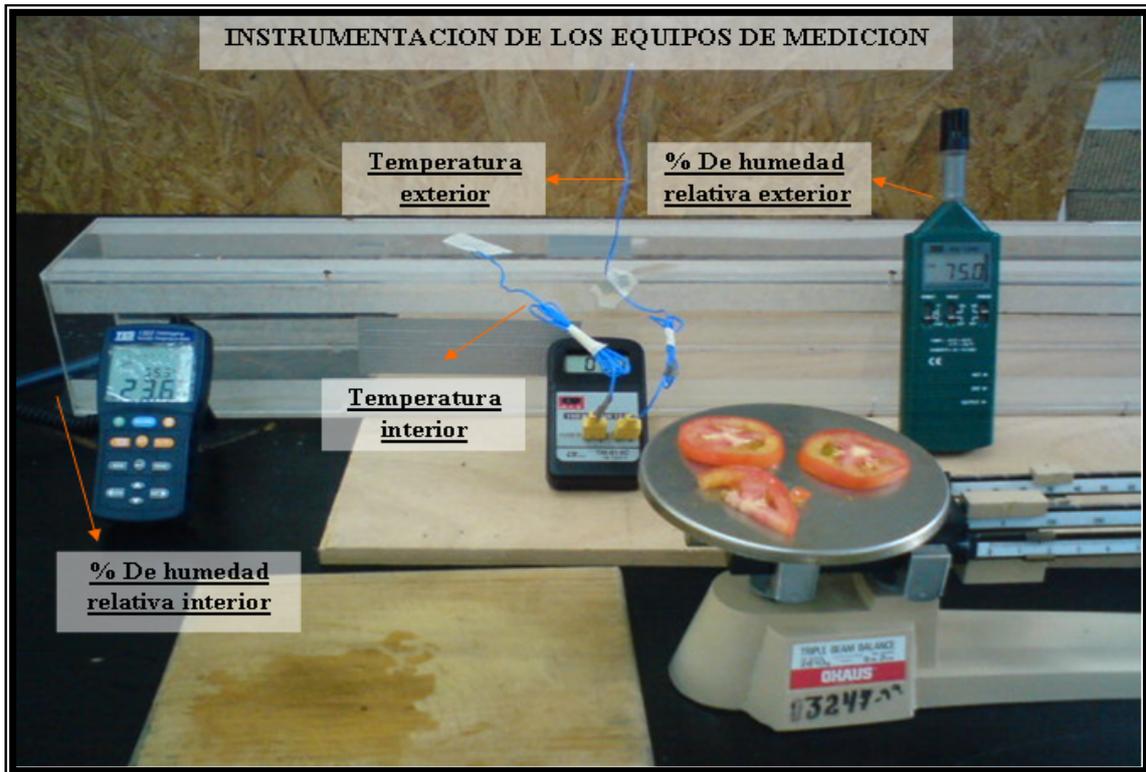


Figura 3-16.- Instrumentación de los equipos.

COMPORTAMIENTO DE LOS DIFERENTES PARAMETROS DEL PROCESO DE SECADO.

- **Bitácora de las pruebas realizadas en el túnel de secado.**
Antes de realizar cualquier lectura de los instrumentos de medición, se elaboro una bitácora para registrar las variables o parámetros más importantes del proceso, y que son: masa inicial, masa final, temperatura interior, temperatura exterior, porcentaje de humedad relativa interior, porcentaje de humedad relativa exterior, tiempo y número de ventiladores. Por otra parte además se mantuvo registrada la temperatura de operación, la fecha en que se realizo la prueba y si es una prueba realizada con pretratamiento de escaldado o no, como se observa en la tabla 3-1.

Tabla 3-1.- Ejemplo de una hoja de resultados de la bitácora.

TOMATE ROJO SIN TRATAMIENTO						
TEMPERATURA 45 °C			1 VENTILADOR, 16/06/09			
Tiempo (min.)	Wi (gr.)	Ti (°C)	Te (°C)	%RHi	%Rhe	
09:40	31.6	45	29	39.2	79.2	
10:00	28.1	45	29	39	79.5	
10:20	25.4	45	29	39.7	79.8	
10:40	22.3	45	29	38.4	78.9	
11:00	20.1	45	29	37.2	78.5	
11:20	17.8	45	29	37.4	78.9	
11:40	16.2	45	29	36.9	78.9	
12:00	14.1	45	29	37.2	77.3	
12:20	12.4	45	30	36.4	76.3	
12:40	10.7	45	30	35.4	73.4	
13:00	9	45	30	34.9	72	
13:20	8	45	31	37.2	68.4	
13:40	6.9	45	31	36.7	67.7	
14:00	5.9	45	31	37.7	69.9	
14:20	5	45	31	41.4	78.3	
14:40	4.4	45	31	38.8	79.5	
15:00	3.7	45	31	37.3	76.8	
15:20	3.3	45	31	38.5	79.5	
15:40	3	45	31	38.2	78.9	
16:00	2.5	45	30	39.1	80.5	
16:20	2.3	45	30	37.7	79.8	
16:40	2.1	45	30	37.7	80.3	
17:00	2.1	45	30	39.6	81.5	
17:20	2.1	45	30	39.2	81.8	
17:40	2.1	45	30	38.4	82	

- **Lectura de los parámetros en las pruebas de secado de jitomate.**

Como se observa en la tabla 3-1, las lecturas de los parámetros estudiados para la prueba, fueron tomadas de los equipos de medición, en intervalos de cada 20min. Esto fue con el propósito de tener una cantidad de datos suficientes para un análisis lo mas completo posible del proceso.

PROCESO DE ALMACENAMIENTO DEL JITOMATE.

- **Empaquetamiento.**

Después de haber concluido cada prueba de secado de jitomate, se procedió a empaquetar las muestras secas del producto en bolsas de papel celofán, ya que es un material resistente a la ruptura o desgarre, además de ser un material estable a los cambios de temperatura, de muy buena impermeabilidad ya que no permite el paso de la humedad y no es toxico o dañino para el consumidor. Después de haber empaquetado las muestras se etiquetaron con la fecha de la prueba, la temperatura

de trabajo, la masa inicial y final de la muestra de jitomate, como se observa en la figura 3-17.

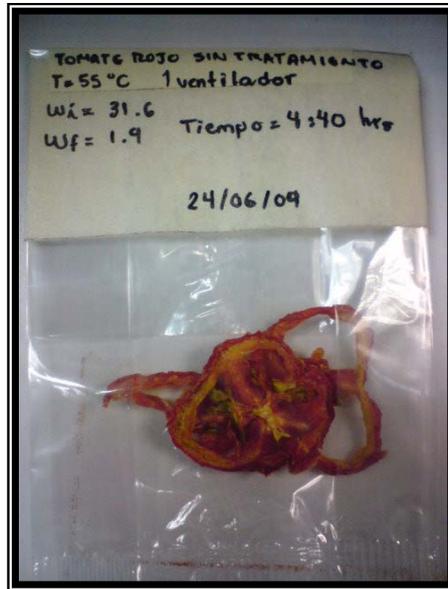


Figura 3-17.- Empaquetamiento de las muestras de jitomate ya secadas.

- **Almacenamiento.**

Las muestras de jitomate se mantuvieron en un almacenamiento adecuado, ya que al deshidratar las muestras es decir reducirles el contenido de humedad, su reacción es muy variable, ya que la muestra es muy capaz de ganar humedad si las condiciones de almacenamiento son las inadecuadas y con esto puede permitir el desarrollo de bacterias y los hongos que favorecen el enmohecimiento y putrefacción del producto. Además la luz también provoca un cambio de coloración del producto.

CAPITULO IV.- EXPERIMENTACION Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En este capítulo se presenta, primeramente el estudio de las variables para la experimentación que participa en el proceso de secado, además que se implementa una metodología para la obtención de las curvas de secado que puede ser utilizada para el estudio de diferentes productos agrícolas, en este caso el jitomate y para finalizar se presenta la obtención de las tablas de resultados y análisis de los mismos.

4.1-. VARIABLES DE ESTUDIO PARA LA EXPERIMENTACION.

En el estudio del secado de jitomate, los parámetros de secado, tomados durante las pruebas, fueron:

- Masa.
- Temperatura interior del túnel de secado.
- Temperatura exterior del túnel o temperatura ambiente.
- Porcentaje de humedad relativa interior del túnel de secado.
- Porcentaje de humedad relativa del exterior.
- Velocidad del aire para secado.

Es importante mencionar que para cada uno de los parámetros que se analizaron, se procedió a tomar lecturas en intervalos de 20 minutos. Además como objeto de estudio comparativo, se tomo una hora específica de inicio de todas las pruebas que fue, a las 9:40 am. Con el propósito de tener una idea mas clara de las lecturas obtenidas para todos los casos.

El criterio para dar por terminada una prueba fue que se alcanzaran cuatro lecturas consecutivas sin variación de la masa, esto es cuando el jitomate alcanza su contenido de humedad en equilibrio.

Es importante aclarar, que algunos datos que se presentan en las hojas de la bitácora obtenida, son características específicas comparativas, que forman parte del estudio de la prueba de secado, como son:

- Tomate rojo con tratamiento o sin tratamiento.
- Temperatura de operación en la prueba de secado.
- Numero de ventiladores con que se trabajo en la prueba de secado.
- Fecha de la prueba de secado en el túnel.

Cabe mencionar que se realizaron pruebas utilizando uno o dos ventiladores, con el objeto de poder comparar el efecto de la velocidad del aire en el secado. Para esto, se obtuvo el valor de dichas velocidades con un anemómetro instrumento de medición que sirve para obtener la velocidad de viento en unidades de (m/s), y dichas velocidades fueron: 1.8 m/s para un solo ventilador y 2.6 m/s para el caso de la prueba con dos ventiladores.

Estas características son de gran importancia, ya que cuando al analizar los resultados obtenidos, para cada una de las pruebas, esto permite conocer la influencia de cada parámetro.

En el anexo A, se presentan los valores obtenidos de los diferentes parámetros en cada prueba realizada.

4.2-.OBTENCIÓN DE CURVAS DE SECADO.

En esta parte se explica el procedimiento de la experimentación para hallar los valores de difusividad efectiva, tomando como ejemplo: la prueba hecha a una muestra de jitomate sin tratamiento, de 31.6 gr. Con una temperatura de trabajo 45 °C y usando un solo ventilador. Este procedimiento fue empleado para cada una de las pruebas registradas en la bitácora, logrando así obtener los valores de difusividad efectiva.

Los pasos para realizar el desarrollo de la experimentación fueron:

- Obtención del valor de la masa seca de la muestra de jitomate, con una temperatura de secado de 120 °C durante un tiempo de 2 hrs. Con esto se obtuvo que el valor es de:

$$\text{Masa Seca del Tomate} = 0.09$$

- Calculo del contenido de humedad en base húmeda, y no en base seca, ya que en base humedad es para productos que contienen mucha humedad. [Notas de la clase de secado solar].

Formula empleada:

$$\text{Contenido de Humedad, "en base húmeda" (C.H.)} = \frac{[(\text{Masa de la muestra}-\text{Masa Seca})/\text{Masa Inicial de la Muestra}]*100}{(4.1)}$$

Tabla 4-1.- Contenidos de humedad con respecto al tiempo de secado.

Tiempo (min.)	Ventilador 1 a 45 °C	
	Masa (muestra)	C.H.
09:40	31.6	99.71518987
10:00	28.1	88.63924051
10:20	25.4	80.09493671
10:40	22.3	70.28481013
11:00	20.1	63.32278481
11:20	17.8	56.0443038
11:40	16.2	50.98101266
12:00	14.1	44.33544304
12:20	12.4	38.9556962
12:40	10.7	33.57594937
13:00	9	28.19620253
13:20	8	25.03164557
13:40	6.9	21.55063291
14:00	5.9	18.38607595
14:20	5	15.53797468
14:40	4.4	13.63924051
15:00	3.7	11.42405063
15:20	3.3	10.15822785
15:40	3	9.208860759
16:00	2.5	7.626582278
16:20	2.3	6.993670886
16:40	2.1	6.360759494
17:00	2.1	6.360759494
17:20	2.1	6.360759494
17:40	2.1	6.360759494

- Calculo de la relación de humedad, la cual solo se calcula para el periodo de velocidad de secado constante, aplicando la relación:

(4.2)

$$\text{Relación de Humedad (MR)} = \frac{(CHm - Che)}{(Chi - Che)}$$

Donde:

CHm = Contenido de humedad en el tiempo T

Chi = Contenido de humedad inicial

Che = Contenido de humedad en equilibrio

Tabla 4-2.- Relación de humedad con respecto al tiempo de secado.

Tiempo (min.)	Ventilador 1 a 45 °C	
	C.H.	MR
09:40	99.7151899	1
10:00	88.6392405	0.881355932
10:20	80.0949367	0.789830508
10:40	70.2848101	0.684745763
11:00	63.3227848	0.610169492
11:20	56.0443038	0.53220339
11:40	50.9810127	0.477966102
12:00	44.335443	0.406779661
12:20	38.9556962	0.349152542
12:40	33.5759494	0.291525424
13:00	28.1962025	0.233898305
13:20	25.0316456	0.2
13:40	21.5506329	0.162711864
14:00	18.3860759	0.128813559
14:20	15.5379747	0.098305085
14:40	13.6392405	0.077966102
15:00	11.4240506	0.054237288
15:20	10.1582278	0.040677966
15:40	9.20886076	0.030508475
16:00	7.62658228	0.013559322
16:20	6.99367089	0.006779661
16:40	6.36075949	0
17:00	6.36075949	0
17:20	6.36075949	0
17:40	6.36075949	0

Coeficiente de Difusión de Humedad

- Calculo del logaritmo natural de la relación de humedad.

Tabla 4-3.- LN de la relación de humedad con respecto al tiempo de secado.

Tiempo (min.)	Ventilador 1 a 45 °C	
	MR	LN(MR)
09:40	1	0
10:00	0.88135593	-0.12629373
10:20	0.78983051	-0.2359369
10:40	0.68474576	-0.37870766
11:00	0.61016949	-0.49401851
11:20	0.53220339	-0.63072955
11:40	0.4779661	-0.73821547
12:00	0.40677966	-0.89948361
12:20	0.34915254	-1.05224637
12:40	0.29152542	-1.23262806
13:00	0.23389831	-1.45286885
13:20	0.2	-1.60943791
13:40	0.16271186	
14:00	0.12881356	
14:20	0.09830508	
14:40	0.0779661	
15:00	0.05423729	
15:20	0.04067797	
15:40	0.03050847	
16:00	0.01355932	
16:20	0.00677966	
16:40	0	
17:00	0	
17:20	0	
17:40	0	

- Cálculo del valor de R^2 (figura 4-1), para valores que se encuentran dentro del periodo de velocidad de secado constante. El valor de R^2 sale de la pendiente de la recta formada por los valores del logaritmo natural de la relación de humedad. Por otra parte el tener un valor de R^2 menor de 0.9, nos indica que el grado de dispersión de los valores es muy alto.

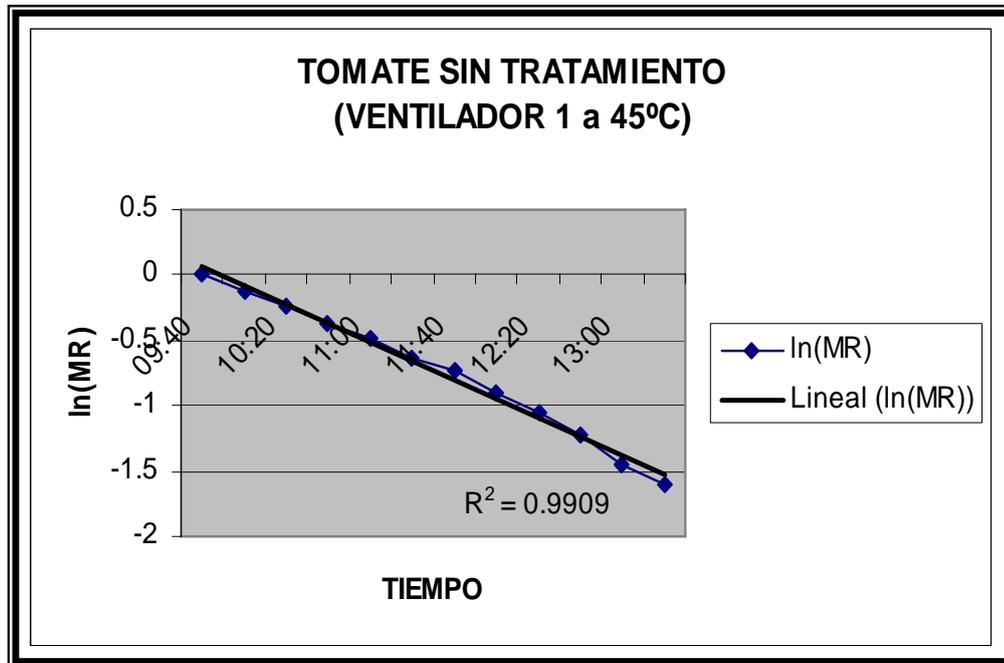


Figura 4-1.- Análisis del valor de dispersión de lo datos R^2 .

- Cálculo de la difusividad efectiva, para saber que tan rápida es la pérdida de humedad del proceso de secado.

Formula de la Difusividad Efectiva: (4.3)

$$\text{Diff} = (\text{Pendiente} \cdot L^2) / (\pi^2 \cdot \pi)$$

Donde:

$$L = (m) \quad 0.005$$

R2	0.9909
Pendiente	-0.095280653
Dif. Efectiva	-9.65395E-07

4.3-. TABLAS DE RESULTADOS.

A continuación se presentan las tablas de resultados obtenidos (tabla 4-4 a 4-9), los cuales fueron obtenidos experimentalmente, para determinar los valores de los coeficientes de difusividad efectiva para cada una de las pruebas realizadas al jitomate.

Por lo que se obtuvo como resultados diferentes tablas, que registran los resultados de las siguientes variables:

- Contenido de humedad.
- Relación de humedad.
- Logaritmo natural de la relación de humedad.
- Valor de R^2 .
- Valor de la pendiente de la recta.
- Valor de difusividad efectiva.

TABLA 4-4.- CONTENIDOS DE HUMEDAD CON RESPECTO AL TIEMPO DEL TOMATE ROJO SIN TRATAMIENTO

	Ventilador 1 a 45 °C	Ventilador 1y2 a 45 °C	Ventilador 1 a 50 °C	Ventilador 1y2 a 50 °C	Ventilador 1 a 55 °C	Ventilador 1y2 a 55 °C	Ventilador 1 a 60 °C	Ventilador 1y2 a 60 °C
Tiempo	C.H.	C.H.	C.H.	C.H.	C.H.	C.H.	C.H.	C.H.
09:40	99.71519	99.71519	99.7151899	99.71519	99.71519	99.71519	99.7151899	99.7152
10:00	88.639241	84.525316	81.0443038	71.867089	82.626582	77.563291	78.1962025	93.3861
10:20	80.094937	72.816456	66.1708861	65.221519	68.06962	60.791139	67.7531646	74.3987
10:40	70.28481	61.740506	54.778481	46.550633	55.411392	44.968354	50.9810127	61.7405
11:00	63.322785	51.613924	43.0696203	36.107595	44.018987	33.259494	42.7531646	46.8671
11:20	56.044304	42.120253	33.8924051	24.398734	36.424051	23.449367	32.3101266	38.0063
11:40	50.981013	36.107595	26.2974684	18.06962	28.196203	15.537975	25.3481013	24.7152
12:00	44.335443	28.829114	18.7025316	13.955696	19.651899	9.2088608	18.3860759	21.2342
12:20	38.955696	23.765823	13.9556962	10.474684	14.905063	7.6265823	13.3227848	15.538
12:40	33.575949	20.917722	10.4746835	9.2088608	10.791139	6.3607595	9.84177215	9.52532
13:00	28.196203	14.272152	8.89240506	8.2594937	8.5759494	6.0443038	6.99367089	8.25949
13:20	25.031646	11.107595	7.94303797	6.9936709	7.6265823	6.0443038	6.0443038	6.36076
13:40	21.550633	8.8924051	6.67721519	6.9936709	6.6772152	6.0443038	5.7278481	5.72785
14:00	18.386076	7.6265823	6.36075949	6.9936709	5.7278481	6.0443038	5.09493671	5.72785
14:20	15.537975	6.3607595	6.36075949	6.9936709	5.7278481		5.09493671	5.72785
14:40	13.639241	5.7278481	6.36075949		5.7278481		5.09493671	5.72785
15:00	11.424051	5.7278481	6.36075949		5.7278481		5.09493671	
15:20	10.158228	5.7278481						
15:40	9.2088608	5.7278481						
16:00	7.6265823							
16:20	6.9936709							
16:40	6.3607595							
17:00	6.3607595							
17:20	6.3607595							
17:40	6.3607595							

TABLA 4-5.- RELACION DE HUMEDAD CON RESPECTO AL TIEMPO DEL TOMATE ROJO SIN TRATAMIENTO

	Ventilador 1 a 45 °C	Ventilador 1y2 a 45 °C	Ventilador 1 a 50 °C	Ventilador 1y2 a 50 °C	Ventilador 1 a 55 °C	Ventilador 1y2 a 55 °C	Ventilador 1 a 60 °C	Ventilador 1y2 a 60 °C
Tiempo	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR
09:40	1	1	1	1	1	1	1	1
10:00	0.8813559	0.8383838	0.8	0.6996587	0.8181818	0.7635135	0.77257525	0.9326599
10:20	0.7898305	0.7138047	0.64067797	0.6279863	0.6632997	0.5844595	0.66220736	0.7306397
10:40	0.6847458	0.5959596	0.51864407	0.4266212	0.5286195	0.4155405	0.48494983	0.5959596
11:00	0.6101695	0.4882155	0.39322034	0.3139932	0.4074074	0.2905405	0.39799331	0.4377104
11:20	0.5322034	0.3872054	0.29491525	0.1877133	0.3265993	0.1858108	0.28762542	0.3434343
11:40	0.4779661	0.3232323	0.21355932	0.1194539	0.2390572	0.1013514	0.21404682	0.2020202
12:00	0.4067797	0.2457912	0.13220339	0.0750853	0.1481481	0.0337838	0.14046823	0.1649832
12:20	0.3491525	0.1919192	0.08135593	0.0375427	0.0976431	0.0168919	0.08695652	0.1043771
12:40	0.2915254	0.1616162	0.0440678	0.0238908	0.0538721	0.0033784	0.05016722	0.040404
13:00	0.2338983	0.0909091	0.02711864	0.0136519	0.030303	0	0.02006689	0.026936
13:20	0.2	0.0572391	0.01694915	0	0.020202	0	0.01003344	0.006734
13:40	0.1627119	0.03367	0.00338983	0	0.010101	0	0.00668896	0
14:00	0.1288136	0.020202	0	0	0	0	0	0
14:20	0.0983051	0.006734	0	0	0		0	0
14:40	0.0779661	0	0		0		0	0
15:00	0.0542373	0	0		0		0	
15:20	0.040678	0						
15:40	0.0305085	0						
16:00	0.0135593							
16:20	0.0067797							
16:40	0							
17:00	0							
17:20	0							
17:40	0							

TABLA 4-6.- LN(RELACION DE HUMEDAD) CON RESPECTO AL TIEMPO DEL TOMATE ROJO SIN TRATAMIENTO								
	Ventilador 1 a 45 °C	Ventilador 1y2 a 45 °C	Ventilador 1 a 50 °C	Ventilador 1y2 a 50 °C	Ventilador 1 a 55 °C	Ventilador 1y2 a 55 °C	Ventilador 1 a 60 °C	Ventilador 1y2 a 60 °C
Tiempo	ln(MR)	ln(MR)	ln(MR)	ln(MR)	ln(MR)	ln(MR)	ln(MR)	ln(MR)
09:40	0	0	0	0	0	0	0	0
10:00	-0.1262937	-0.1762792	-0.22314355	-0.3571626	-0.2006707	-0.2698245	-0.2580259	-0.0697146
10:20	-0.2359369	-0.3371459	-0.44522834	-0.4652369	-0.4105284	-0.5370679	-0.4121765	-0.3138348
10:40	-0.3787077	-0.5175824	-0.65653743	-0.8518589	-0.6374863	-0.8781751	-0.7237098	-0.5175824
11:00	-0.4940185	-0.7169984	-0.93338517	-1.158384	-0.8979416	-1.2360122	-0.9213201	-0.8261977
11:20	-0.6307296	-0.9488	-1.22106724	-1.6728394	-1.1190212	-1.6830263	-1.2460963	-1.0687593
11:40	-0.7382155	-1.1293839	-1.54384063	-2.1248245	-1.4310523	-2.2891621	-1.5415605	-1.5993876
12:00	-0.8994836	-1.4032727	-2.02341371	-2.5891302	-1.9095425	-3.3877744	-1.962774	-1.8019118
12:20	-1.0522464	-1.6506809	-2.50892153	-3.2822773	-2.3264363		-2.442347	-2.2597449
12:40	-1.2326281	-1.8225311					-2.9923934	-3.2088255
13:00	-1.4528689							
13:20	-1.6094379							
13:40								
14:00								
14:20								
14:40								
15:00								
15:20								
15:40								
16:00								
16:20								
16:40								
17:00								
17:20								
17:40								
R2	0.9909	0.9954	0.9738	0.9732	0.9749	0.9356	0.9711	0.9406
Pendiente	-0.0952807	-0.0668544	-0.04459115	-0.0338404	-0.0479174	-0.0290255	-0.0421849	-0.0390934
Dif. Efectiva	-9.654E-07	-6.774E-07	-4.518E-07	-3.429E-07	-4.855E-07	-2.941E-07	-4.274E-07	-3.961E-07

TABLA 4-7.- CONTENIDOS DE HUMEDAD CON RESPECTO AL TIEMPO DEL TOMATE ROJO BAJO TRATAMIENTO DE JUGO DE LIMON

	Ventilador 1 a 45 °C	Ventilador 1y2 a 45 °C	Ventilador 1 a 50 °C	Ventilador 1y2 a 50 °C	Ventilador 1 a 55 °C	Ventilador 1y2 a 55 °C	Ventilador 1 a 60 °C	Ventilador 1y2 a 60 °C
Tiempo	C.H.	C.H.	C.H.	C.H.	C.H.	C.H.	C.H.	C.H.
09:40	99.7151899	99.7151899	99.7151899	99.7151899	99.7151899	99.7151899	99.7151899	99.7151899
10:00	83.5759494	77.2468354	79.4620253	65.221519	80.7278481	69.335443	71.8670886	80.0949367
10:20	75.664557	63.3227848	64.2721519	43.0696203	57.943038	49.0822785	57.6265823	62.056962
10:40	62.3734177	50.9810127	50.9810127	30.7278481	49.7151899	31.3607595	45.9177215	44.6518987
11:00	53.5126582	38.9556962	38.9556962	21.8670886	35.4746835	14.2721519	27.5632911	30.4113924
11:20	43.7025316	29.1455696	28.1962025	14.5886076	26.2974684	7.94303797	22.5	14.9050633
11:40	33.8924051	19.6518987	18.7025316	8.57594937	15.5379747	4.14556962	13.6392405	7.94303797
12:00	27.2468354	11.7405063	11.7405063	6.99367089	8.89240506	3.82911392	7.94303797	6.0443038
12:20	20.6012658	8.57594937	6.67721519	5.09493671	5.7278481	3.82911392	6.36075949	4.77848101
12:40	16.4873418	6.0443038	5.41139241	4.77848101	5.09493671	3.82911392	5.09493671	4.46202532
13:00	11.4240506	4.77848101	4.77848101	4.77848101	4.46202532	3.82911392	4.46202532	4.46202532
13:20	8.57594937	4.14556962	4.77848101	4.77848101	4.46202532		4.46202532	4.46202532
13:40	6.36075949	4.14556962	4.77848101	4.77848101	4.46202532		4.46202532	4.46202532
14:00	5.7278481	4.14556962	4.77848101		4.46202532		4.46202532	
14:20	5.09493671	4.14556962						
14:40	4.46202532							
15:00	4.46202532							
15:20	4.46202532							
15:40	4.46202532							

TABLA 4-8.- RELACION DE HUMEDAD CON RESPECTO AL TIEMPO DEL TOMATE ROJO BAJO TRATAMIENTO DE JUGO DE LIMON

	Ventilador 1 a 45 °C	Ventilador 1y2 a 45 °C	Ventilador 1 a 50 °C	Ventilador 1y2 a 50 °C	Ventilador 1 a 55 °C	Ventilador 1y2 a 55 °C	Ventilador 1 a 60 °C	Ventilador 1y2 a 60 °C
Tiempo	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR
09:40	1	1	1	1	1	1	1	1
10:00	0.83056478	0.76490066	0.78666667	0.63666667	0.80066445	0.68316832	0.7076412	0.79401993
10:20	0.74750831	0.6192053	0.62666667	0.40333333	0.56146179	0.47194719	0.55813953	0.60465116
10:40	0.60797342	0.49006623	0.48666667	0.27333333	0.47508306	0.28712871	0.43521595	0.42192691
11:00	0.51495017	0.36423841	0.36	0.18	0.3255814	0.10891089	0.24252492	0.27242525
11:20	0.41196013	0.2615894	0.24666667	0.10333333	0.22923588	0.04290429	0.18936877	0.10963455
11:40	0.3089701	0.16225166	0.14666667	0.04	0.11627907	0.00330033	0.09634551	0.03654485
12:00	0.23920266	0.0794702	0.07333333	0.02333333	0.04651163	0	0.03654485	0.0166113
12:20	0.16943522	0.04635762	0.02	0.00333333	0.01328904	0	0.01993355	0.00332226
12:40	0.12624585	0.01986755	0.00666667	0	0.00664452	0	0.00664452	0
13:00	0.0730897	0.00662252	0	0	0	0	0	0
13:20	0.04318937	0	0	0	0		0	0
13:40	0.01993355	0	0	0	0		0	0
14:00	0.01328904	0	0		0		0	
14:20	0.00664452	0						
14:40	0							
15:00	0							
15:20	0							
15:40	0							

TABLA 4-9.- LN(RELACION DE HUMEDAD) CON RESPECTO AL TIEMPO DEL TOMATE ROJO BAJO TRATAMIENTO DE JUGO DE LIMON								
	Ventilador 1 a 45 °C	Ventilador 1y2 a 45 °C	Ventilador 1 a 50 °C	Ventilador 1y2 a 50 °C	Ventilador 1 a 55 °C	Ventilador 1y2 a 55 °C	Ventilador 1 a 60 °C	Ventilador 1y2 a 60 °C
Tiempo	ln(MR)	ln(MR)	ln(MR)	ln(MR)	ln(MR)	ln(MR)	ln(MR)	ln(MR)
09:40	0	0	0	0	0	0	0	0
10:00	-0.18564935	-0.26800931	-0.23995067	-0.45150905	-0.22231333	-0.38101401	-0.3458181	-0.23064671
10:20	-0.29100986	-0.4793184	-0.46734051	-0.90799193	-0.57721155	-0.75088818	-0.58314629	-0.50310358
10:40	-0.49762411	-0.71321474	-0.72017585	-1.29706323	-0.74426563	-1.24782469	-0.83191294	-0.86292318
11:00	-0.66368515	-1.00994665	-1.02165125	-1.71479843	-1.12214279	-2.21722524	-1.41665082	-1.30039102
11:20	-0.8868287	-1.34097916	-1.39971738	-2.26979527	-1.47300376	-3.14878345	-1.664059	-2.2106027
11:40	-1.17451077	-1.81860672	-1.91959284	-3.21887582	-2.1517622		-2.33981443	
12:00	-1.43044415	-2.53237319	-2.61274002		-3.06805294		-3.30921499	
12:20	-1.77528463	-3.07136969						
12:40	-2.06952411							
13:00	-2.61606781							
13:20								
13:40								
14:00								
14:20								
14:40								
15:00								
15:20								
15:40								
R2	0.9665	0.9534	0.9553	0.9759	0.9326	0.9521	0.9459	0.931
Pendiente	-0.05380301	-0.03549125	-0.03741562	-0.02691595	-0.03182516	-0.02128019	-0.02985791	-0.0309515
Dif. Efectiva	-5.4514E-07	-3.596E-07	-3.791E-07	-2.7272E-07	-3.2246E-07	-2.1561E-07	-3.0252E-07	-3.136E-07

4.4.- ANÁLISIS DE RESULTADOS.

A continuación se presenta un análisis de las diferentes pruebas realizadas a la muestra de jitomate, además de observar las características de las curvas de secado y comparar su comportamiento.

La grafica de la figura 4-2, muestra como es el comportamiento de los contenidos de humedades para las diferentes pruebas de secado como son: con 1 ventilador, 2 ventiladores, además de contar con diferentes temperaturas de operación como 45, 50,55, y 60 °C.

PARA EL CASO DEL JITOMATE SIN TRATAMIENTO.

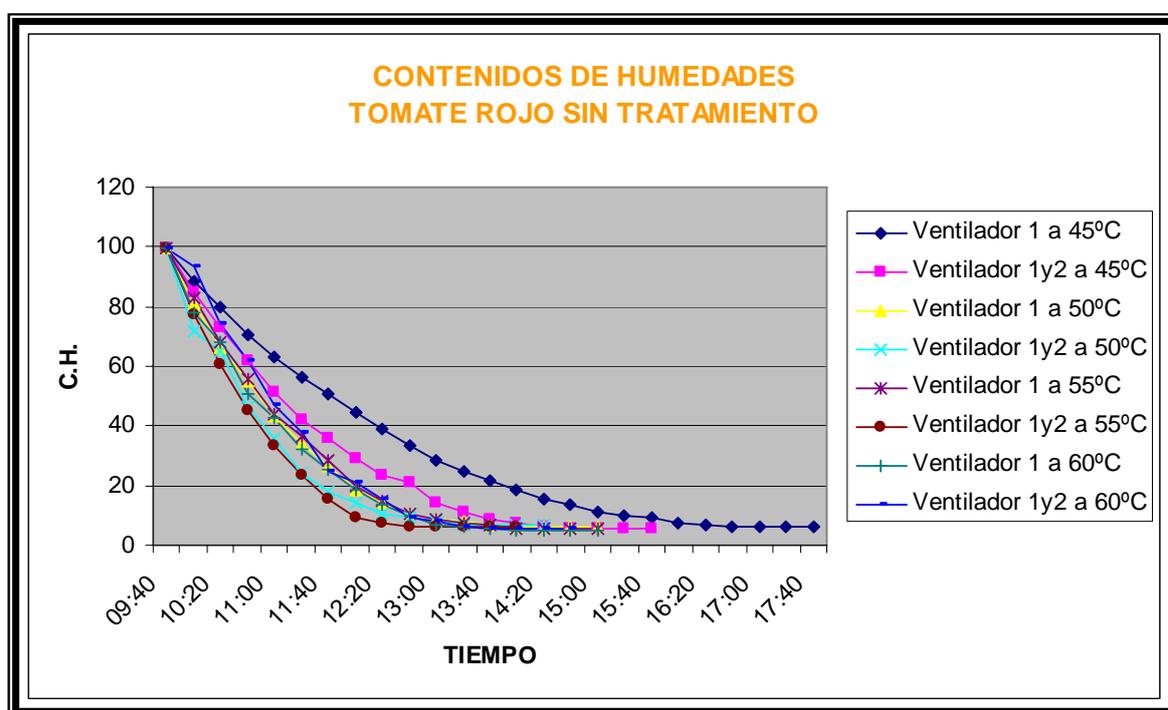


Figura 4-2.- Comportamiento de los contenidos de humedad de las diferentes pruebas, sin tratamiento.

- En esta grafica se observa que cuando se trabajo la prueba de secado con temperaturas altas de operación como la de 60 °C ya sea con un solo ventilador o con dos, se reduce el tiempo del proceso de secado.

Seguido de esto se hizo un análisis comparativo de las curvas de secado entre los diferentes factores de la prueba de secado, dando como resultados un análisis comparativo de parámetros tales como:

- Efecto de las diferentes temperaturas de operación con un solo ventilador.
- Efecto de las diferentes temperaturas de operación con dos ventiladores.
- Efecto del uso de diferentes velocidades de secado.
- Efecto del pretratamiento en el producto.

ANÁLISIS DE LAS DIFERENTES TEMPERATURAS DE OPERACIÓN CON UN SOLO VENTILADOR.

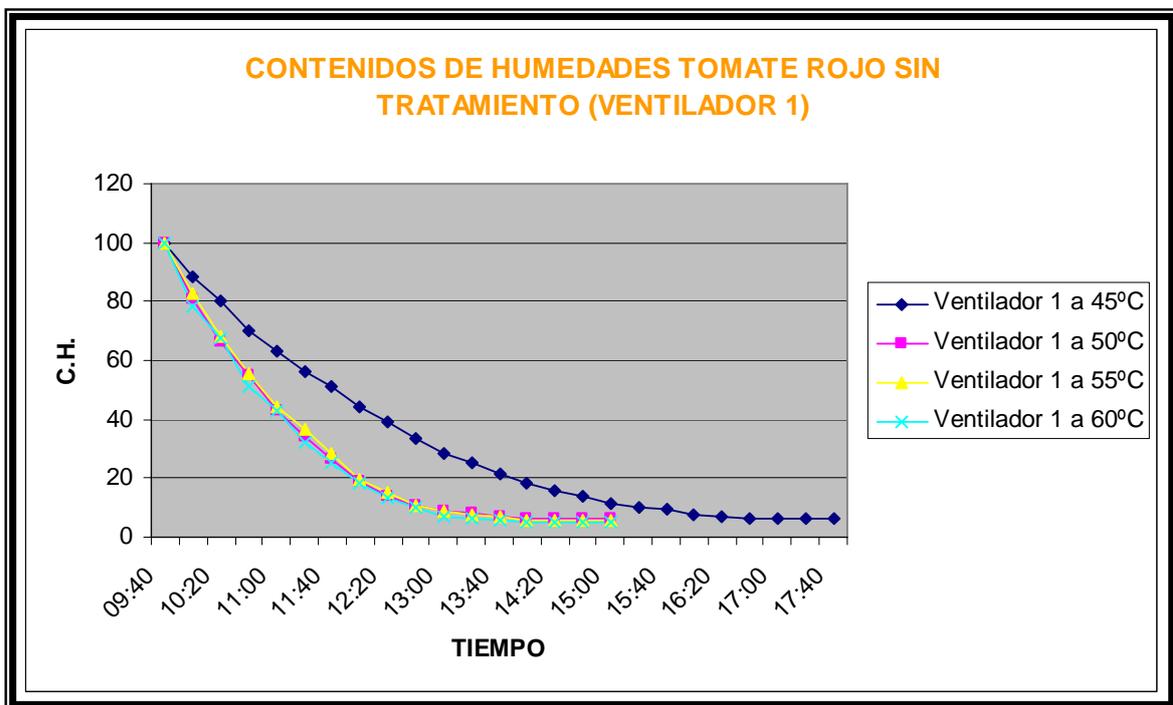


Figura 4-3.- Comportamiento de los contenidos de humedad con un solo ventilador, sin tratamiento.

- Como se puede apreciar en la figura 4-3, el uso de un solo ventilador y el manejar diferentes temperaturas, permite conocer que la temperatura es un factor importante para tener un proceso de secado a menor tiempo. La temperatura menos adecuada para trabajar un proceso de secado, es la de 45 °C ya que lleva mas tiempo, y las óptimas son la de 50, 55, y 60 °C, ya que su proceso de secado tiene el mismo valor en tiempo.

ANÁLISIS DE LAS DIFERENTES TEMPERATURAS DE OPERACIÓN CON DOS VENTILADORES.

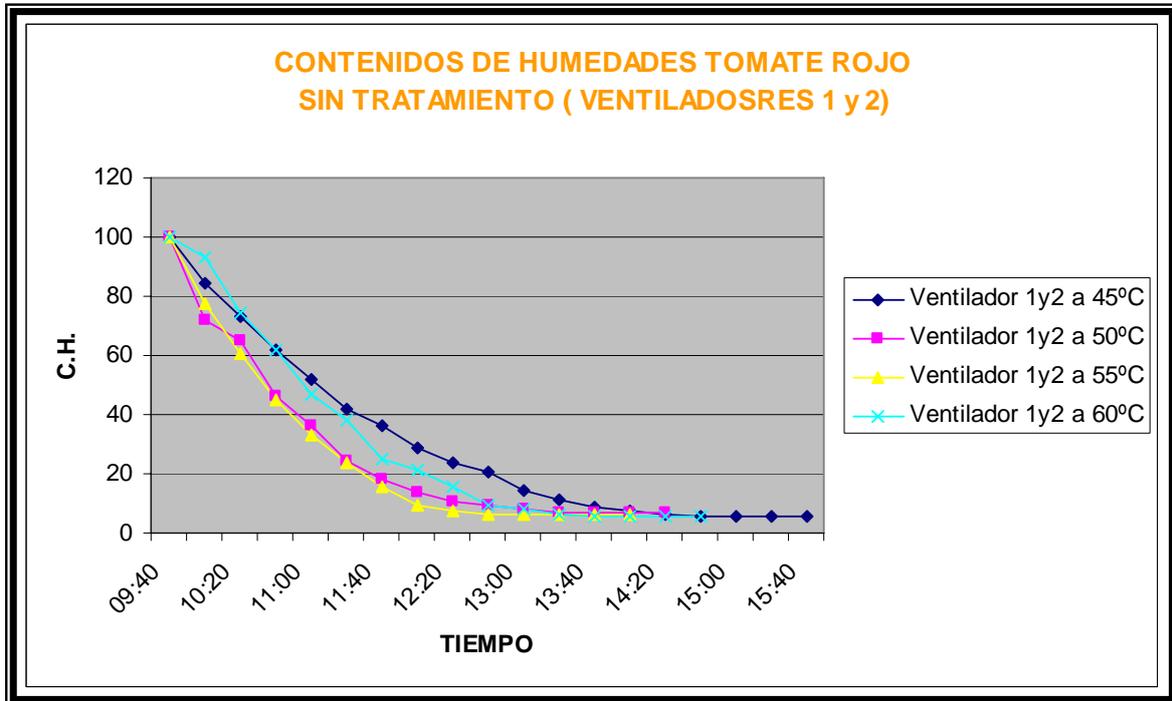


Figura 4-4.- Comportamiento de los contenidos de humedad con dos ventiladores, sin tratamiento.

- Se analizó la prueba desarrollada para el caso de diferentes temperaturas de operación pero con dos ventiladores, observándose que la temperatura menos adecuada para realizar un proceso de secado es de 45 °C, y la más óptima es de 55 °C ya que su proceso de secado tuvo una duración de 2 hrs.

ANÁLISIS DEL USO DE UN VENTILADOR O DOS VENTILADORES, OPERANDO A LA MISMA TEMPERATURA.

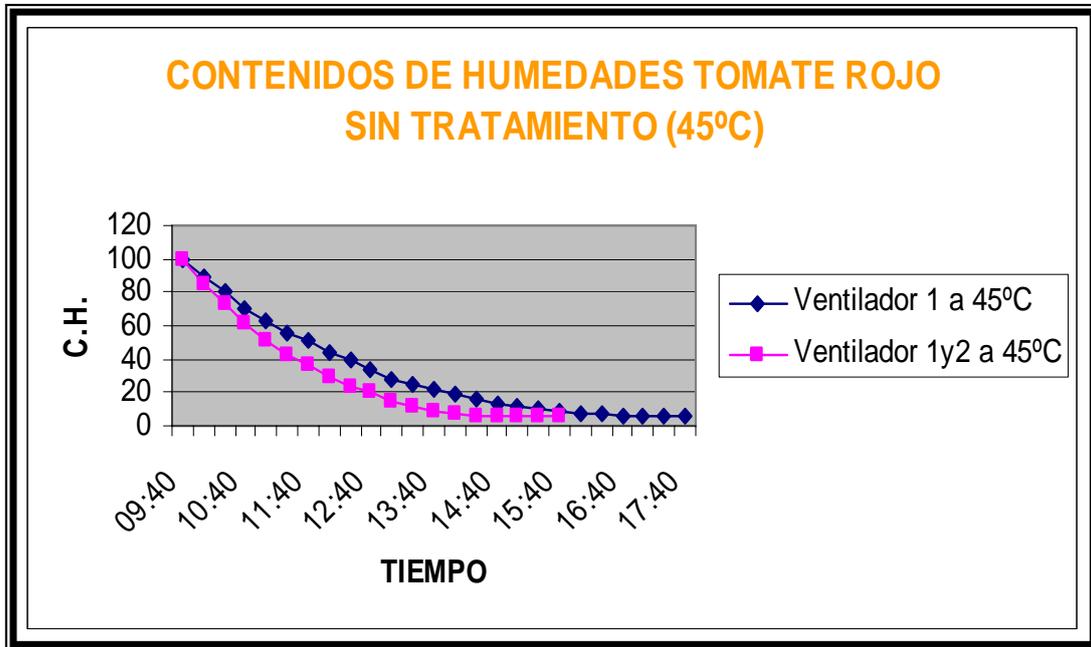


Figura 4-5.- Comportamiento del contenido de humedad a 45 °C, con 1 y 2 ventiladores, sin tratamiento.

- Se analizó en esta prueba presentada en la figura 4-5, que cuando se utilizó en el proceso de secado la menor temperatura de 45 °C, para los dos casos de 1 y 2 ventiladores, la más adecuada a manejar es el de 2 ventiladores, ya que se obtiene un menor tiempo de proceso de secado.

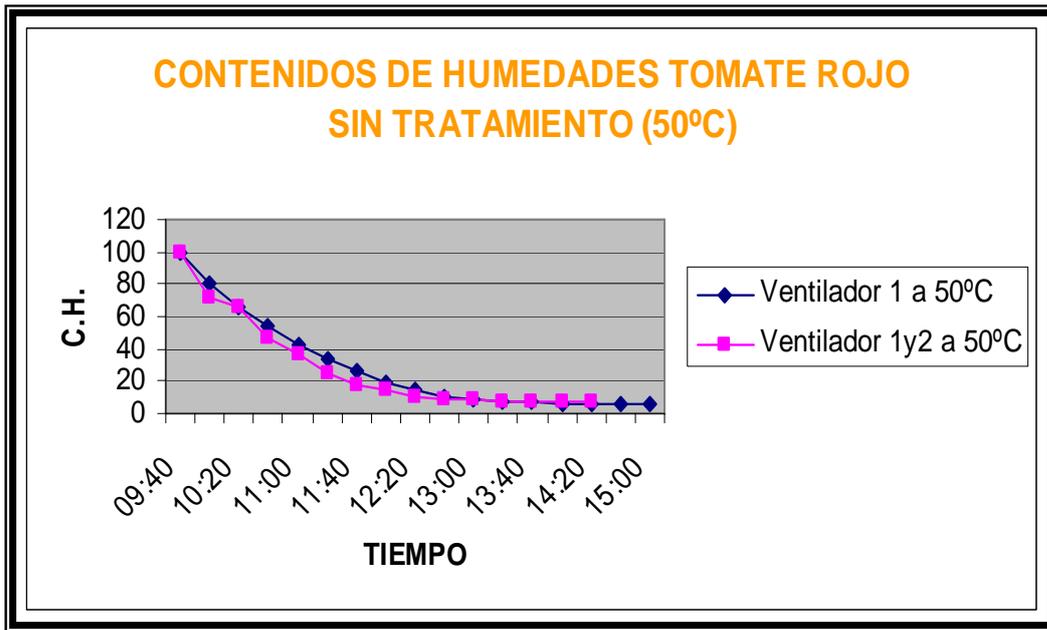


Figura 4-6.- Comportamiento del contenido de humedad a 50 °C, con 1 y 2 ventiladores, sin tratamiento.

- En esta prueba presentada en la figura 4-6, se compara con 1 y 2 ventiladores una temperatura de operación de 50 °C, y se observó que se obtiene un menor tiempo de proceso de secado en la prueba que se realizó con 2 ventiladores.

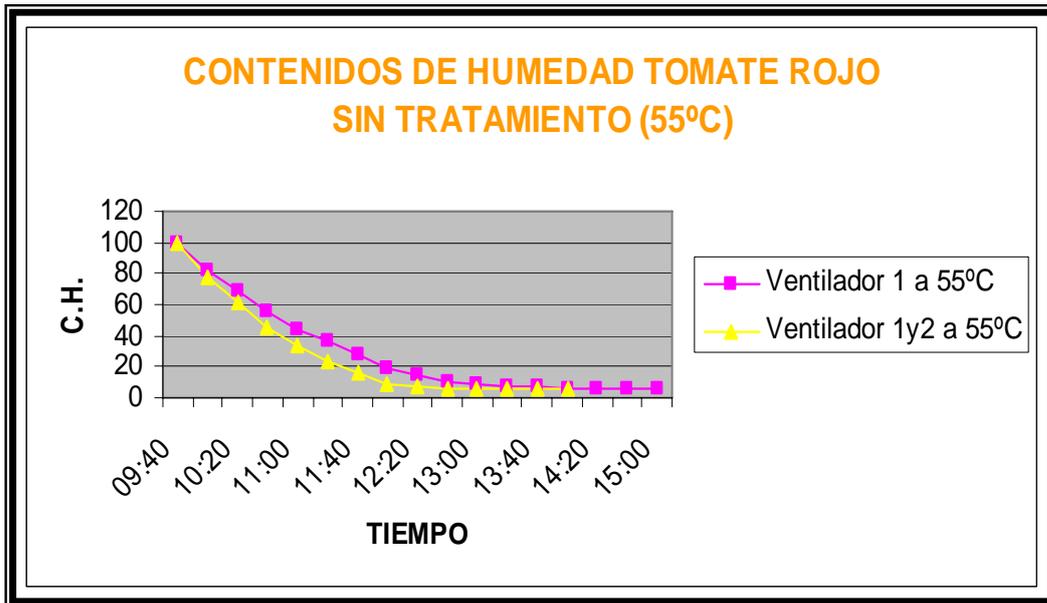


Figura 4-7.- Comportamiento del contenido de humedad a 55 °C, con 1 y 2 ventiladores, sin tratamiento.

- En la figura 4-7, se observó que al igual que en las otras figuras el manejar 2 ventiladores es la mejor manera de obtener un proceso de secado a menor tiempo.

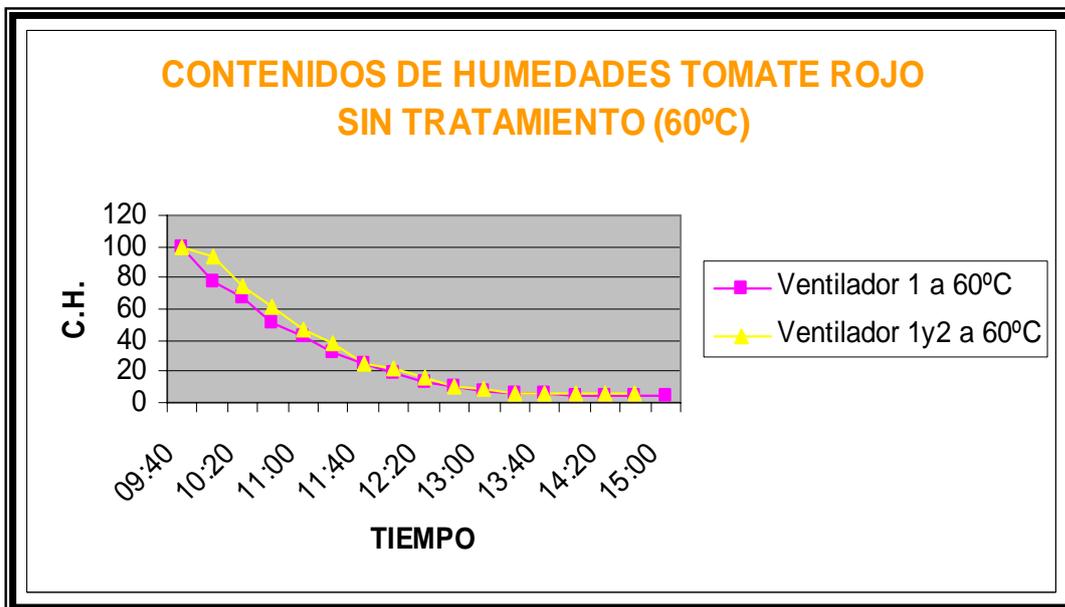


Figura 4-8.- Comportamiento del contenido de humedad a 60 °C, con 1 y 2 ventiladores, sin tratamiento.

- En la figura 4-8, se observó de la misma manera que cuando se utilizó 2 ventiladores el tiempo de proceso de secado se redujo.

PARA EL CASO DEL JITOMATE BAJO TRATAMIENTO DE JUGO DE LIMON.

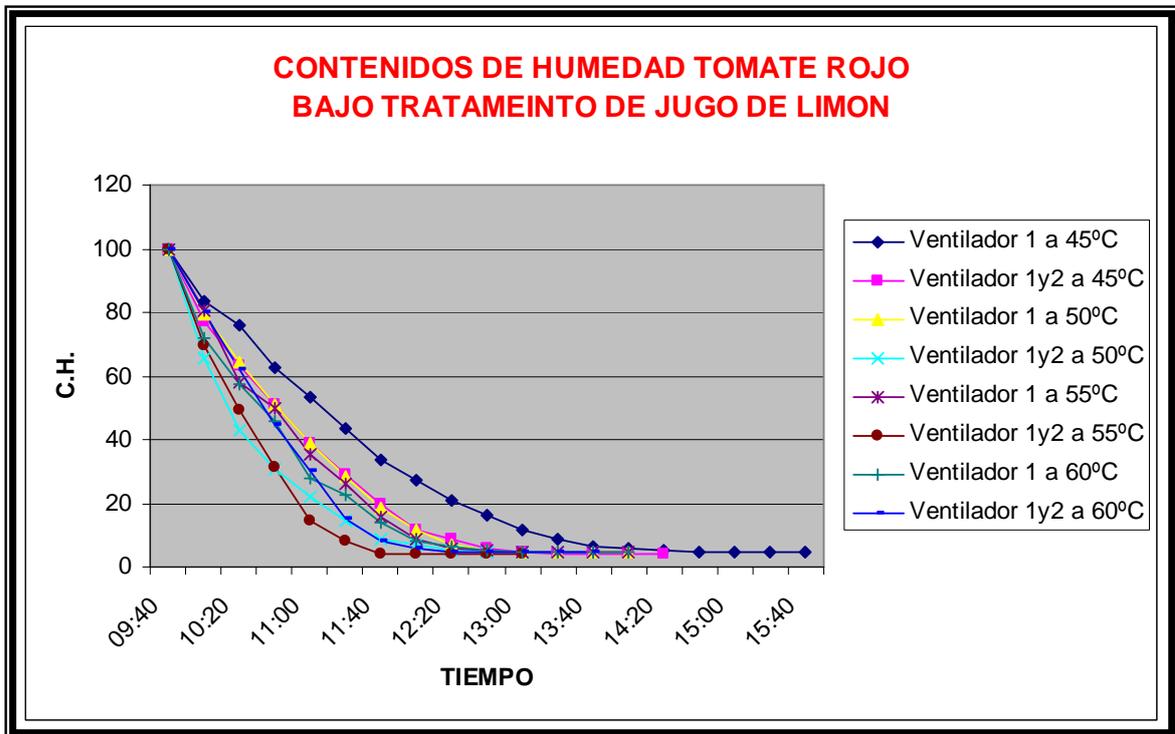


Figura 4-9.- Comportamiento de los contenidos de humedad de las diferentes pruebas, bajo tratamiento.

- En la figura 4-9, se analizó el comportamiento de cada uno de los contenidos de humedades, de las diferentes pruebas que realizaron para el jitomate bajo tratamiento de jugo de limón, dando como resultado que las pruebas menos indicadas para un proceso de secado son realizadas con la temperatura de operación de 45 °C, con 1 y 2 ventiladores, ya que se requiere de mayor tiempo de proceso de secado.

ANÁLISIS DE LAS DIFERENTES TEMPERATURAS DE OPERACIÓN CON UN SOLO VENTILADOR.

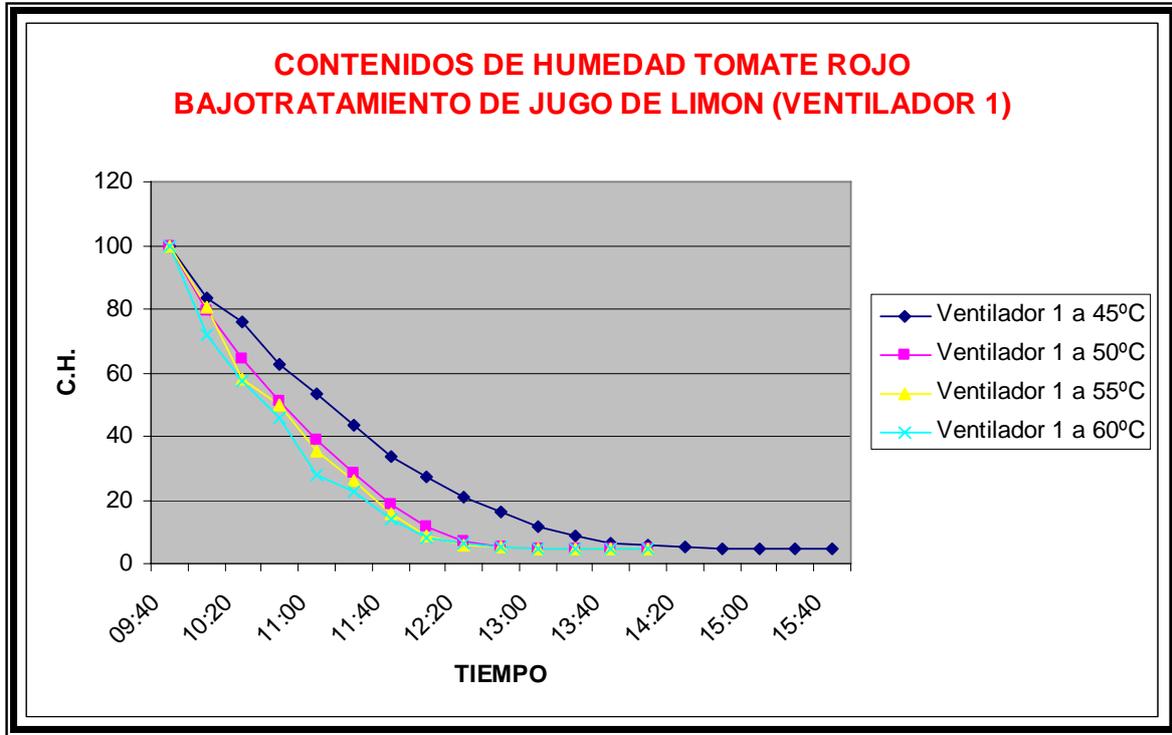


Figura 4-10.- Comportamiento de los contenidos de humedad con un solo ventilador, bajo tratamiento.

- La figura 4-10, nos describió el comportamiento de los contenidos de humedad, para el caso cuando se mantuvo un solo ventilador y diferentes temperaturas de operación, con esto se observó que la temperatura menos adecuada para realizar un proceso de jitomate es de 45 °C, pero a diferencia de los contenidos de humedad para el caso de la prueba de jitomate sin tratamiento, se observó que bajo tratamiento tiene un menor contenido de humedad.

ANÁLISIS DE LAS DIFERENTES TEMPERATURAS DE OPERACIÓN CON DOS VENTILADORES.

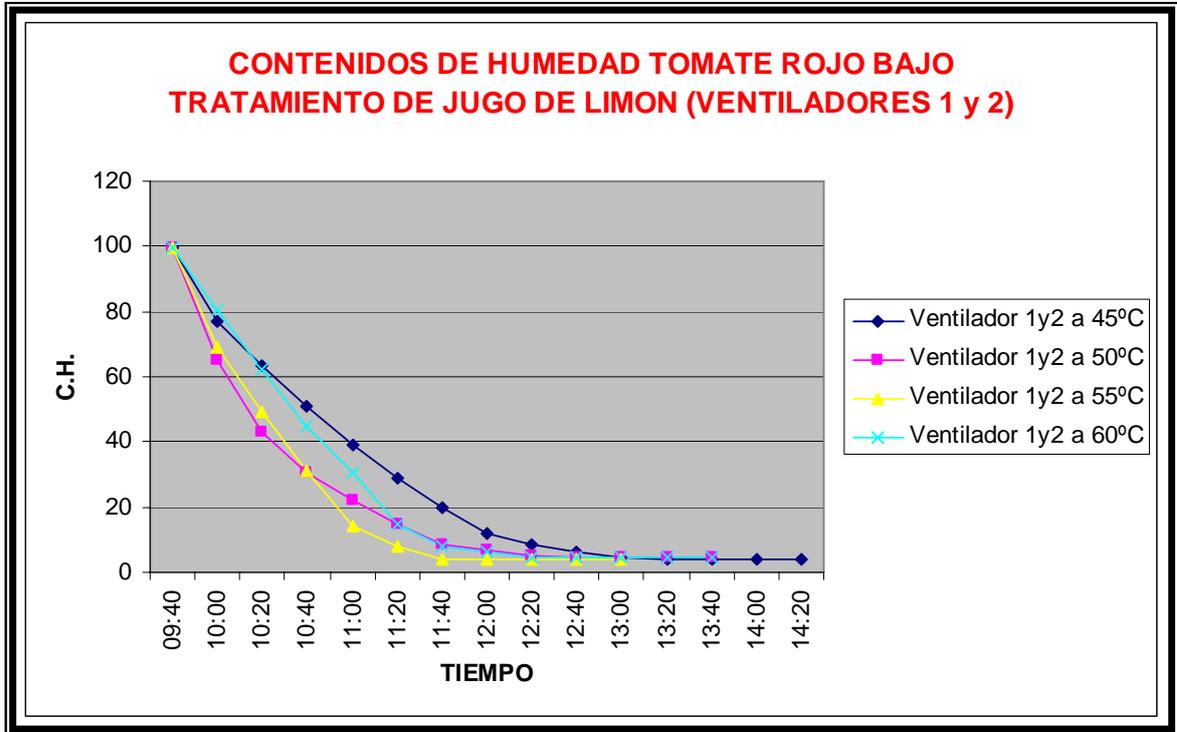


Figura 4-11.- Comportamiento de los contenidos de humedad con dos ventiladores, bajo tratamiento.

- En la figura 4-11, se pudo observar que en los contenidos de humedad de las diferentes temperaturas realizadas con 2 ventiladores, la mejor prueba de secado que nos lleva a tener un menor tiempo del proceso es la de 60 °C, ya que es la mayor temperatura de operación.

ANÁLISIS DEL USO DE UN VENTILADOR O DOS VENTILADORES, OPERANDO A LA MISMA TEMPERATURA.

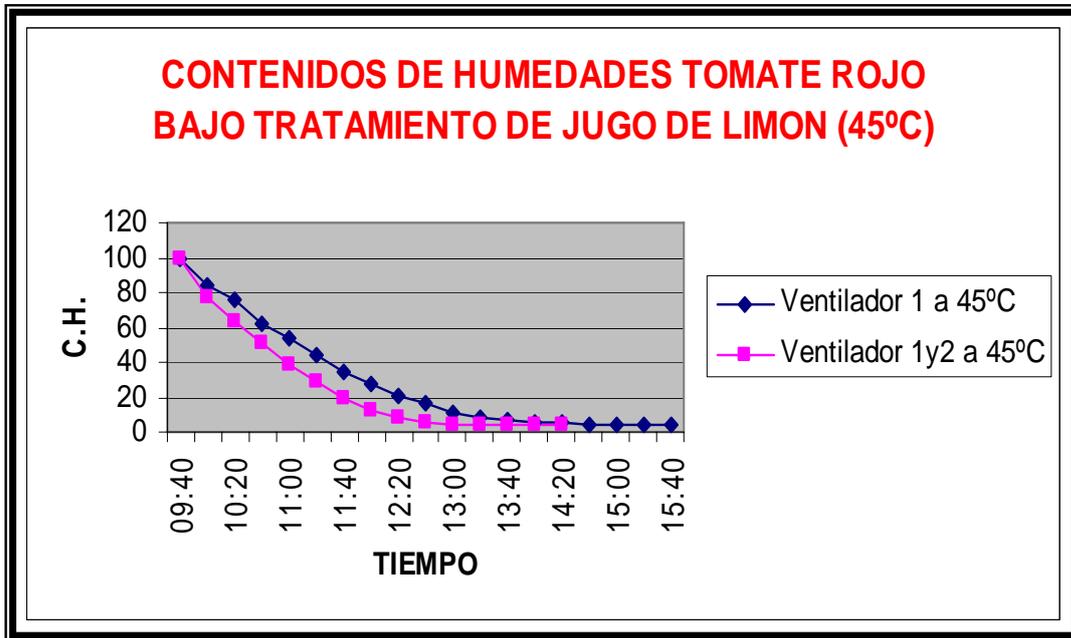


Figura 4-12.- Comportamiento del contenido de humedad a 45 °C, con 1 y 2 ventiladores, bajo tratamiento.

- En la figura 4-12, se observó que el menor tiempo para obtener un proceso de secado es a base del uso de 2 ventiladores.

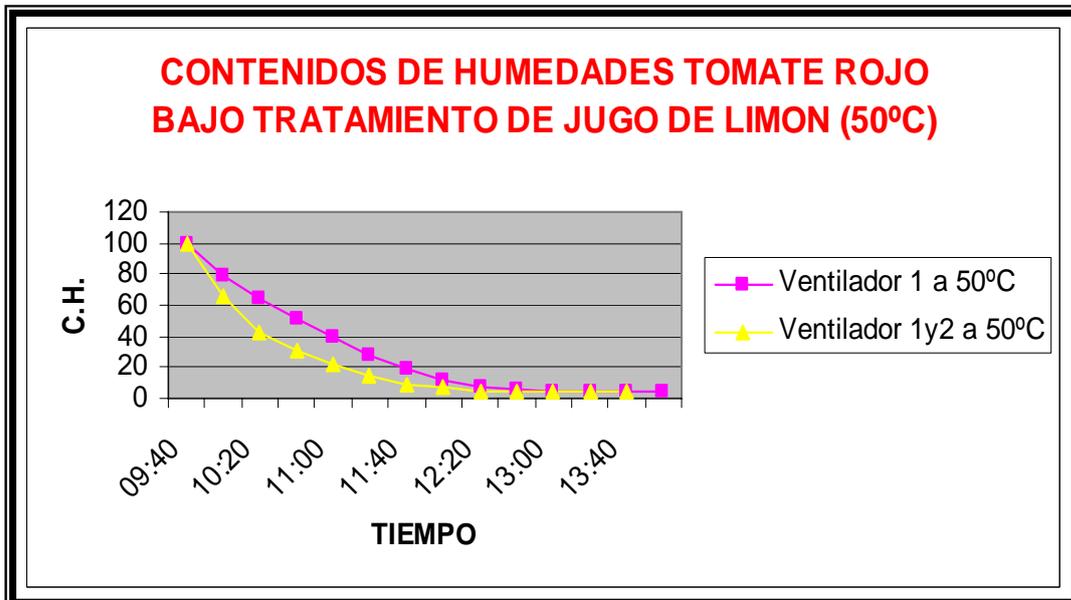


Figura 4-13.- Comportamiento del contenido de humedad a 50 °C, con 1 y 2 ventiladores, bajo tratamiento.

- En la figura 4-13, se analizó que cuando se usó 2 ventiladores se obtuvo un menor tiempo de proceso de secado.

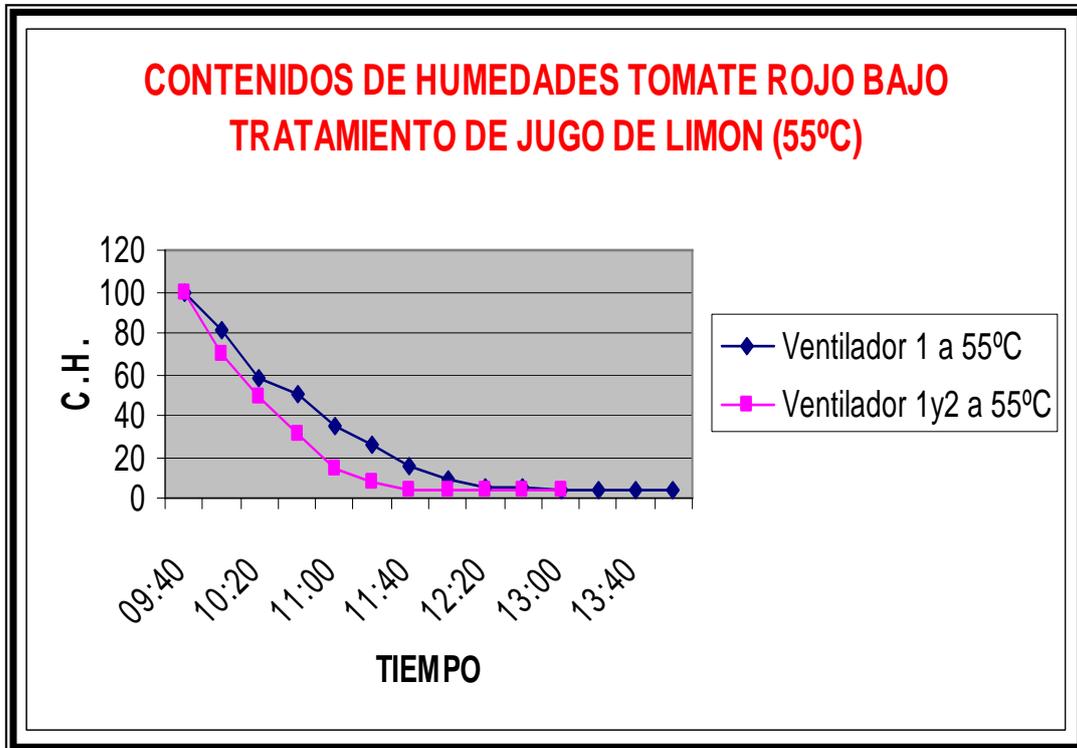


Figura 4-14.- Comportamiento del contenido de humedad a 55 °C, con 1 y 2 ventiladores, bajo tratamiento.

- Nuevamente, en la figura 4-14, observamos que el uso de 2 ventiladores, nos da como resultado un tiempo menor de proceso de secado.

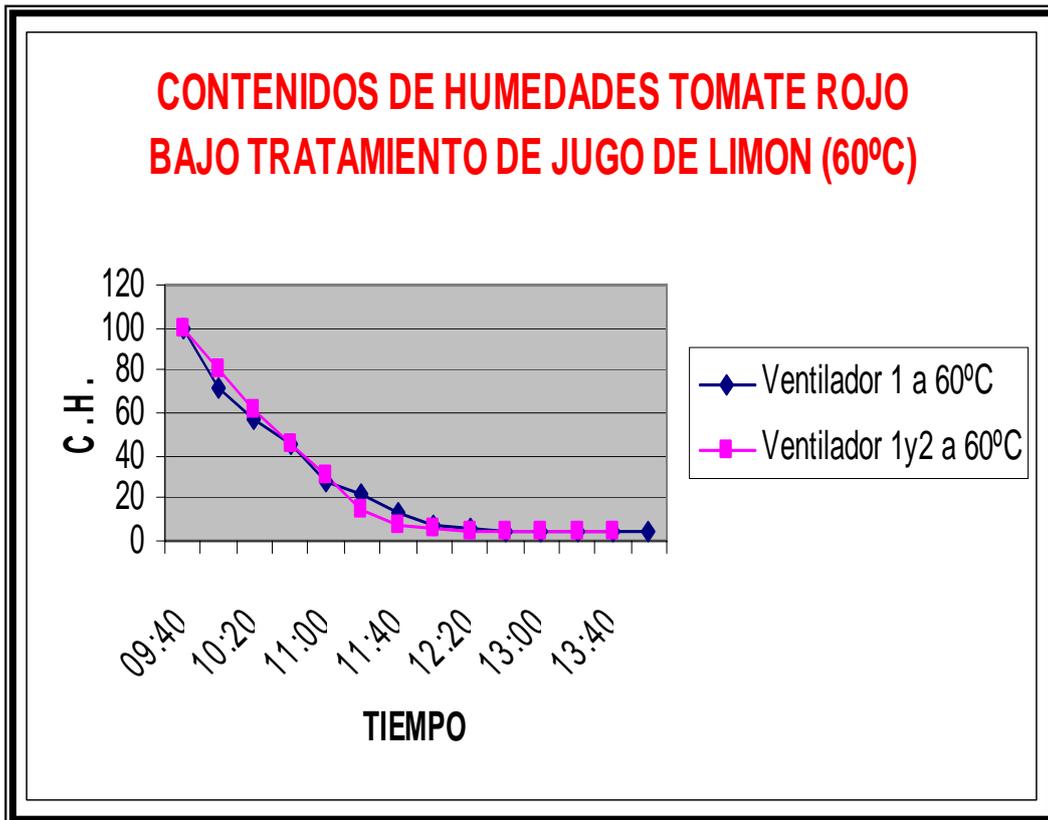


Figura 4-15.- Comportamiento del contenido de humedad a 60 °C, con 1 y 2 ventiladores, bajo tratamiento.

- En la figura 4-15, observamos que el uso de 2 ventiladores durante la prueba de secado de jitomate bajo tratamiento a una temperatura de 60 °C, dio como resultado un menor tiempo de proceso de secado.

ANÁLISIS DEL JITOMATE BAJO TRATAMIENTO Y SIN TRATAMIENTO EN LAS MISMAS CONDICIONES DE LA PRUEBA DE SECADO.

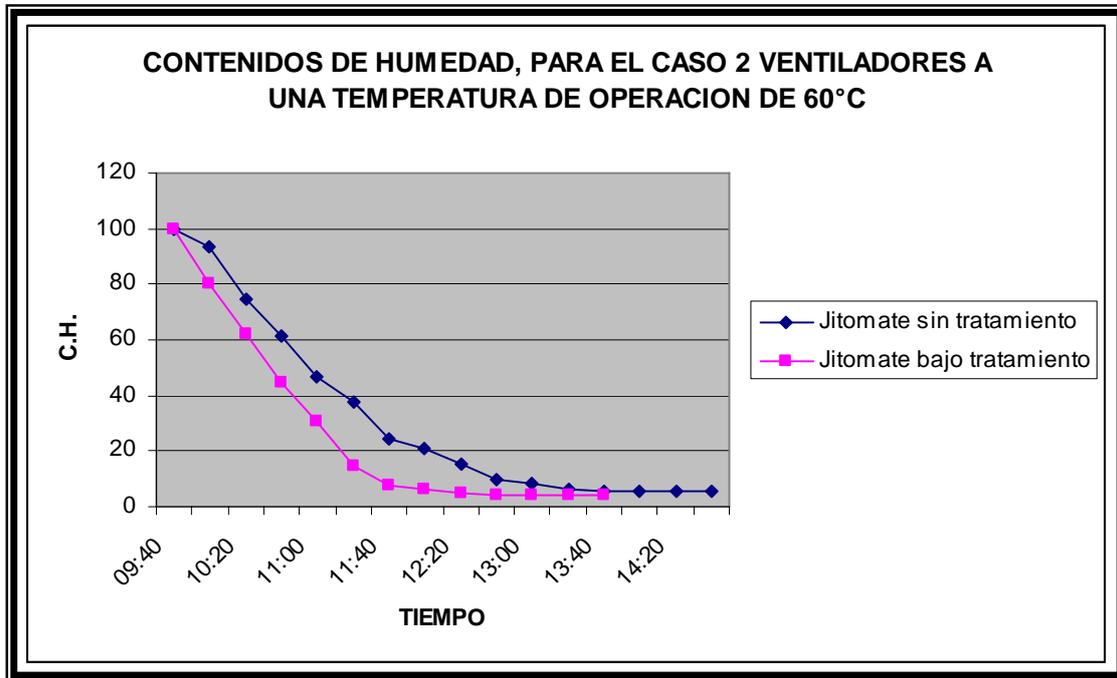


Figura 4-16.- Comportamiento del contenido de humedad si cuenta con tratamiento de jugo de limón.

- Analizando la figura 4-16, se observó que al comparar el comportamiento de los contenidos de humedad, para el caso de la prueba jitomate sin tratamiento y bajo tratamiento de jugo de limón, arrojo como resultado que el someter el jitomate bajo tratamiento de jugo de limón, hizo que el tiempo del proceso de secado se rea menor, de la misma al experimentar con las temperaturas de 45, 50, y 55 °C, se logro mantener ese mismo resultado que bajo tratamiento, se reduce el tiempo del proceso de secado.

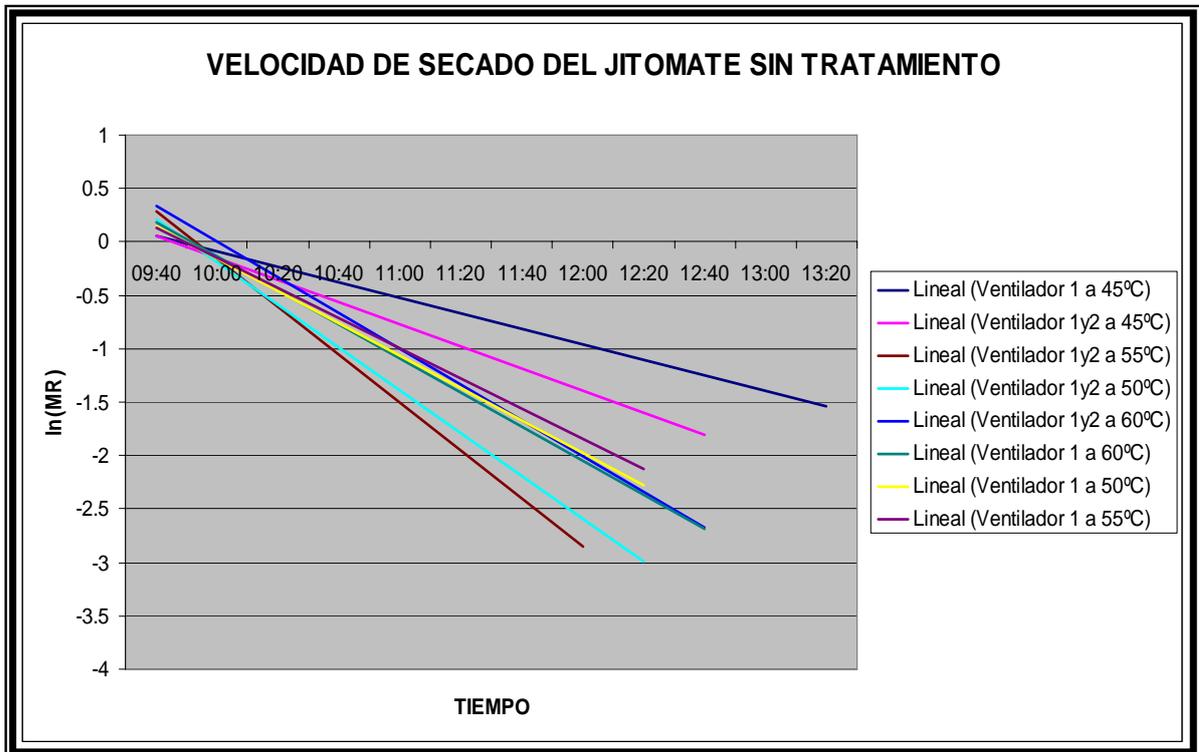


Figura 4-17.- Comportamiento de la velocidad de perdida de humedad, del jitomate sin tratamiento.

- En figura 4-17, se presenta el comportamiento de la velocidad de pérdida de humedad, en la prueba que se le realizó a la muestra de jitomate sin tratamiento, dando como resultado en la figura, que las pendientes que obtuvimos reflejaron el logaritmo natural de la relación de humedad durante el periodo de velocidad constante, además se observó que entre más tienda la pendiente a acercarse al eje vertical mayor es la velocidad de pérdida de humedad, notando que la prueba que mayor velocidad de pérdida de humedad tenía era la de 55 °C con 2 ventiladores.

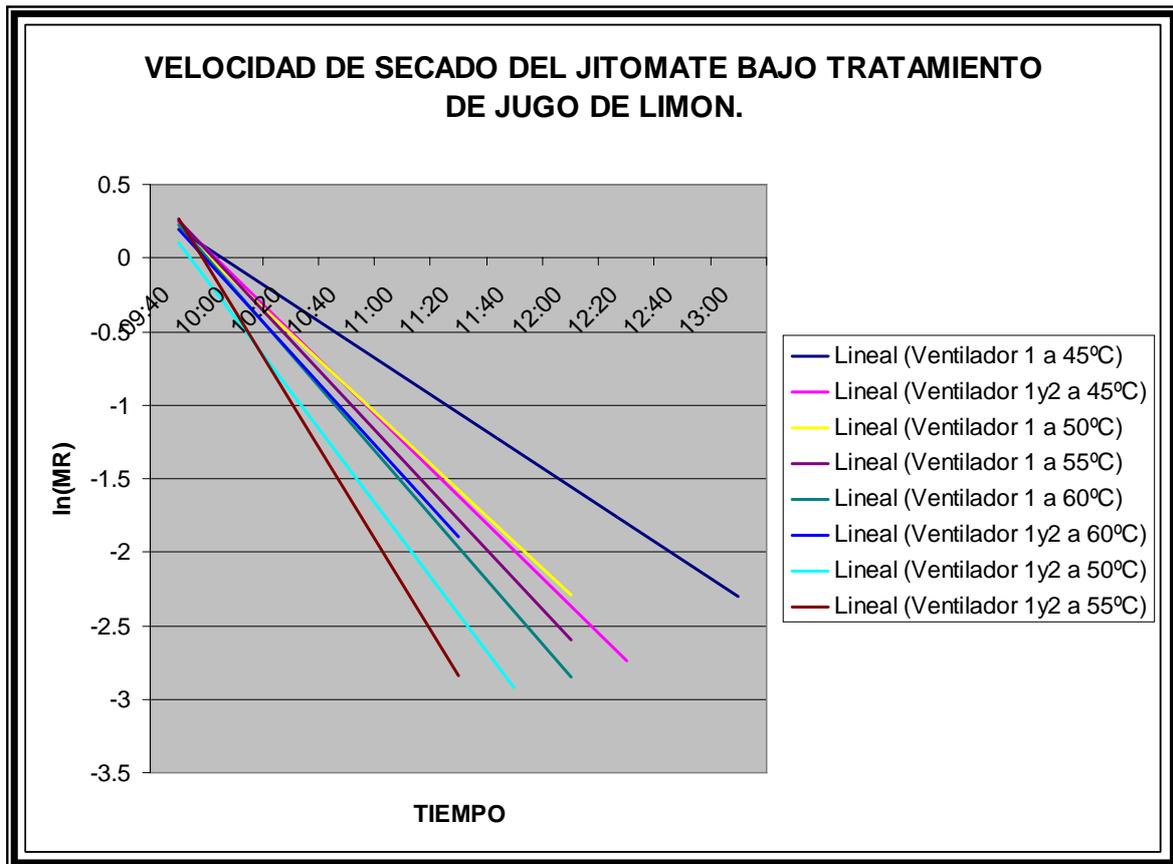


Figura 4-18.- Comportamiento de la velocidad de perdida de humedad, del jitomate bajo tratamiento.

- En figura 4-18, esta comportamiento de la velocidad de pérdida de humedad, en la prueba realizada a la muestra de jitomate bajo tratamiento de jugo de limón, dando como resultado en la figura, que entre mas tienda la pendiente a acercarse al eje vertical mayor es la velocidad de perdida de humedad, por lo cual se analizó que la prueba que mayor velocidad de perdida de humedad es la realizada al jitomate bajo tratamiento con una temperatura de operación de 55 °C y 2 ventiladores.

Tabla 4-10.- Resultados de los coeficientes de difusión.

COEFICIENTES DE DIFUSION DE HUMEDAD		
Condiciones de la prueba	Jitomate sin tratamiento	Jitomate bajo tratamiento
Ventilador 1 a 45°C	-9.654E-07	-5.4514E-07
Ventilador 1y2 a 45°C	-6.774E-07	-3.596E-07
Ventilador 1 a 50°C	-4.518E-07	-3.791E-07
Ventilador 1y2 a 50°C	-3.429E-07	-2.7272E-07
Ventilador 1 a 55°C	-4.855E-07	-3.2246E-07
Ventilador 1y2 a 55°C	-2.941E-07	-2.1561E-07
Ventilador 1 a 60°C	-4.274E-07	-3.0252E-07
Ventilador 1y2 a 60°C	-3.961E-07	-3.136E-07

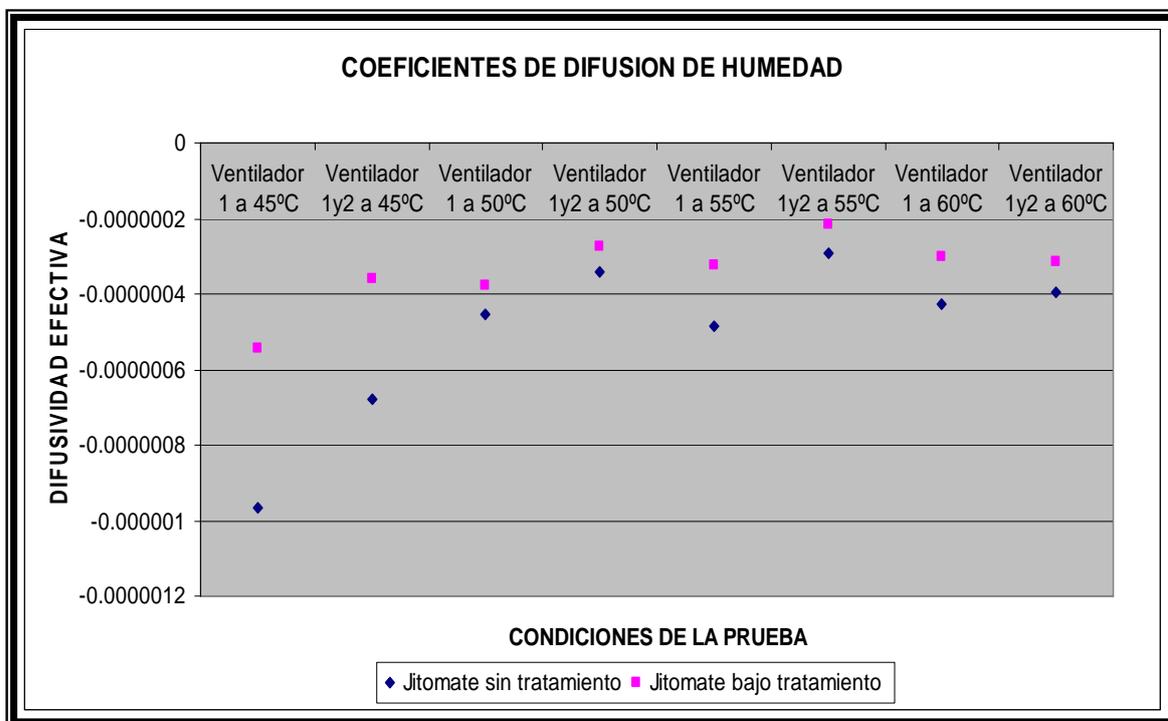


Figura 4-19.- Comportamiento de los coeficientes de difusión de humedad.

- Como se observa en la tabla 4-10 se presenta los valores de los coeficientes de difusión de humedad para las 8 diferentes pruebas realizadas en este trabajo, además, se cuenta con los resultados para las 2 condiciones con las que se expuso la muestra de jitomate: sin tratamiento y bajo tratamiento de jugo de limón. Por otra parte, se observo en la figura 4-19, el comportamiento de los coeficientes de difusión de humedad que en este trabajo era parte del objetivo principal. Cuando se analizo este comportamiento, se pudo entender que el punto mas cercano a la línea horizontal indico que esa fue la prueba con mayo rapidez de secado, es decir que el jitomate perdió mayor contenido de humedad en determinado tiempo.

CAPITULO V.- CONCLUSIONES.

Del estudio realizado al proceso de secado de rebanadas de 5 mm de espesor de jitomate a las temperaturas de 45, 50, 55 y 60 °C, con las velocidades del medio secante de 1.8 y 2.6 m/s, con y sin el pretratamiento en base a jugo de limón, se obtuvieron los valores experimentales para realizar el estudio de la cinética de secado del jitomate.

Después de haber construido las graficas representativas de su comportamiento, se puede concluir lo siguiente:

- Se ha encontrado que todas las temperaturas y condiciones de secado empleadas fueran adecuadas para lograr la conservación del producto sin dañarlo, es decir se conservaron sus propiedades físicas, como es el color y la textura.
- El uso de mayor temperaturas de secado así como del manejo de 2 ventiladores permiten tener un menor tiempo de secado, ya que en la mayoría de los casos, las temperaturas altas lograron deshidratar la muestra de jitomate con mayor facilidad, y con el uso de 2 ventiladores se logra retirar dentro del túnel de secado con mayor rapidez la cantidad de humedad.
- El emplear temperaturas menores de secado (45 y 50) permite lograr un secado de buena calidad pero requiere de tiempos más largos de secado, lo cual a nivel industrial implica mayores consumos de energía.
- Se han logrado obtener los valores de los coeficientes de difusión efectiva de humedad para las rebanadas de jitomate en el rango de temperatura de 45 a 60 °C, y con velocidades del medio secante de 1 y 2.2 m/s, y se ha encontrado que están en el rango de (-2.1561E-07 a -9.654E-07)
- Con las pruebas realizadas se ha encontrado que el mayor valor del coeficiente de difusión de humedad, corresponde a la prueba realizada con una temperatura de 55 °C y 2 ventiladores, esto implica que son las condiciones óptimas para retirar el contenido de humedad en el jitomate, debido a que esto implica una rapidez con la que el producto o muestra pierde su contenido de humedad.
- La metodología empleada puede ser extrapolada con éxito a otros productos, para encontrar sus condiciones óptimas de conservación.
- Las muestras deshidratadas, se ha visto que es factible conservarlas sin mayor problema por periodos de hasta 6 meses sin ningún cambio apreciable en sus propiedades.
- El pretratamiento no tiene ningún efecto en la velocidad de secado, sin embargo se ha visto que es importante para conservar la apariencia física del producto sin cambios en textura y coloración.

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.

Almacenar. Guardar alguna cosa u objeto.

Atemperar. Moderar o templar.

Concentración. Relación entre la cantidad de sustancia por unidad de volumen.

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.

Energía renovable. 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.

Energía solar. Es la energía obtenida mediante la captación de la luz y el calor emitidos por el Sol.

Energía térmica. Energía liberada en forma de calor.

Equilibrio térmico. Si en dos cuerpos no existe flujo de calor entonces se dice que ambos cuerpos se encuentran en equilibrio térmico, es decir se encuentran a la misma temperatura.

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.

Esterilización. Destrucción total de los gérmenes causantes de enfermedades que hay o puede haber en alguna cosa o lugar.

Experimentación. Método científico de investigación que consiste en provocar un fenómeno con el fin de estudiarlo.

Extracción. f. Acción y efecto de extraer.

Flujo. Es la acción y efecto de fluir.

Humedad. Presencia de agua u otro líquido en un cuerpo o en el ambiente.

Masa. Cantidad de materia que contiene un cuerpo.

Muestra. Parte o porción extraída de un conjunto.

Periodo. Espacio de tiempo que incluye toda la duración o el proceso de una cosa.

Secado. Eliminación del líquido o la humedad de algún objeto.

Temperatura. Magnitud física que mide la sensación subjetiva de calor o frío de los cuerpos o del ambiente.

Variable. Se trata de algo inestable, inconstante y mudable.

BIBLIOGRAFIA.

- 1.- Saidani-Scott, H. tierney, M Day B. experimental and Analytical determination of transient moisture diffusion coefficient for pine wood. Nov. 2005 Mex. D.F.
- 2.- S. Rafice; A Keyhani; Modeling effective Moisture Diffusivity of Wheat during air drying. 11; 223-232, 2008.
- 3.- Kamil S. The thin layer modelling of tomato drying process; 343-349, 2007.
- 4.- Arsdel, W. B. (1963). Food Dehydration. Avi. Wesport, Connecticut.
- 5.- Casp, A. A. Proceso de conservación de alimentos. Segunda edición. España.
- 6.- Crank, J. (1975). The mathematics of diffusion. Oxford.: Pergamon Press.
- 7.- G. Nonhebel, M. A. (1979). Teoría simplificada del secado de sólidos. El secado de sólidos en la industria química.
- 8.- Maupoey, P. F. Introducción al secado de alimentos por aire caliente.
- 9.- Rosas, M. y. Energía Solar Térmica.
- 10.- Torres, E. (2002). Notas del curso: Secado Solar. XXVI SEMana Nacional de Energía Solar.
- 11.- A., R. J. Principios de secado. Universidad Autónoma de Baja California Sur.
- 12.- Aguilar, C. N. (1999). Aspectos de la relación entre el escaldado TB-TL y la textura de vegetales procesados.

Documentación en Línea.

- 13.- <http://www.euroresidentes.com/Alimentos/tomate.htm>.
- 14.- http://74.125.95.132/search?q=cache:70LYkIIQ0ycJ:es.wikipedia.org/wiki/Solanum_lycopersicum+que+es+el+tomate&cd=5&hl=es&ct=clnk&gl=mx.
- 15.- <http://www.infoagro.com/hortalizas/tomate.htm>.
- 16.- <http://www.botanical-online.com/tomates.htm>.
http://redescolar.ilce.edu.mx/redescolar/publicaciones/publi_reinos/flora/tomate/tomate.htm.
- 17.- http://www.taringa.net/posts/info/1658428/El-tomate_-%C2%BFFruta-o-verdura.html.
- 18.- <http://blogs.hola.com/viviresunplacer/2009/01/el-licopeno-y-el-tomate-1.html>.
- 19.- <http://mundo52.com/sentirse-bien/el-tomate-antioxidante-maestro>.
- 20.- http://www.cocinayhogar.com/parati/alimentos/verdurasyhortalizas/?pagina=parati_alimentos_verdurasyhortalizas_009_009.
- 21.- <http://www.fao.org/Wairdocs/X5403S/x5403s0d.htm#secado%20solar>.
- 22.- <http://www.agronet.com.mx/estadistica/avance.shtm>.
- 23.- http://www.senado.gob.mx/comisiones/LX/grupo_tlcan/content/noticias_diarias/2009/03septiembre2009.pdf.
- 24.- <http://www.aserca.gob.mx/artman/uploads/boletin--2008-06.pdf>.

ANEXOS (A).

A1.- BITACORA DE PRUEBAS DE SECADO PARA EL CASO, TOMATE ROJO SIN TRATAMIENTO.

A continuación se presenta la bitácora, con las mediciones registradas en las pruebas de secado para cada día en que fue realizada la prueba y las condiciones en que fue realizada.

Tabla A1-1.- Mediciones para el día 16/06/09.

TOMATE ROJO SIN TRATAMIENTO					
TEMPERATURA 45 °C			1 VENTILADOR, 16/06/09		
Tiempo (min.)	Wi (gr.)	Ti (°C)	Te (°C)	%RHi	%Rhe
09:40	31.6	45	29	39.2	79.2
10:00	28.1	45	29	39	79.5
10:20	25.4	45	29	39.7	79.8
10:40	22.3	45	29	38.4	78.9
11:00	20.1	45	29	37.2	78.5
11:20	17.8	45	29	37.4	78.9
11:40	16.2	45	29	36.9	78.9
12:00	14.1	45	29	37.2	77.3
12:20	12.4	45	30	36.4	76.3
12:40	10.7	45	30	35.4	73.4
13:00	9	45	30	34.9	72
13:20	8	45	31	37.2	68.4
13:40	6.9	45	31	36.7	67.7
14:00	5.9	45	31	37.7	69.9
14:20	5	45	31	41.4	78.3
14:40	4.4	45	31	38.8	79.5
15:00	3.7	45	31	37.3	76.8
15:20	3.3	45	31	38.5	79.5
15:40	3	45	31	38.2	78.9
16:00	2.5	45	30	39.1	80.5
16:20	2.3	45	30	37.7	79.8
16:40	2.1	45	30	37.7	80.3
17:00	2.1	45	30	39.6	81.5
17:20	2.1	45	30	39.2	81.8
17:40	2.1	45	30	38.4	82

Tabla A1-2.- Mediciones para el día 17/06/09.

TEMPERATURA 45 °C		1 y 2 VENTILADOR, 17/06/09			
Tiempo (min.)	Wi (gr.)	Ti (°C)	Te (°C)	%RHi	%Rhe
09:40	31.6	45	28	40.3	98.3
10:00	26.8	45	28	40.3	88.5
10:20	23.1	45	28	39.2	89.7
10:40	19.6	45	28	40	89.6
11:00	16.4	45	28	40	90.1
11:20	13.4	45	29	39.8	90.4
11:40	11.5	45	29	39.2	89.9
12:00	9.2	45	29	38.4	87.6
12:20	7.6	45	29	37.3	84.2
12:40	6.7	45	29	37.3	84.2
13:00	4.6	45	29	37.1	83.9
13:20	3.6	45	29	37.5	84.4
13:40	2.9	45	29	36.6	81.3
14:00	2.5	45	29	36.5	81.5
14:20	2.1	45	29	36.5	81.5
14:40	1.9	45	29	36.5	82
15:00	1.9	45	29	36.4	81.7
15:20	1.9	45	29	36.4	81.1
15:40	1.9	45	29	36	80.8

Tabla A1-3.- Mediciones para el día 21/04/09.

TEMPERATURA 50 °C		1 VENTILADOR, 21/04/09			
Tiempo (min.)	Wi (gr.)	Ti (°C)	Te (°C)	%RHi	%Rhe
09:40	31.6	50	29	33.7	67.5
10:00	25.7	50	29	31.1	64.5
10:20	21	50	30	29.9	61.7
10:40	17.4	50	30	29.3	59.8
11:00	13.7	50	31	29.6	55.2
11:20	10.8	50	31	29.1	55.4
11:40	8.4	50	31	28.4	53.8
12:00	6	50	31	27.7	51.7
12:20	4.5	50	31	27.8	51.4
12:40	3.4	50	31	27.2	50.9
13:00	2.9	50	31	26.8	49.9
13:20	2.6	50	31	26.2	49.9
13:40	2.2	50	32	25.3	48.4
14:00	2.1	50	32	25.9	49.4
14:20	2.1	50	32	26.3	48.6
14:40	2.1	50	32	28.4	50.9
15:00	2.1	50	32	28.5	50.9

Tabla A1-4.- Mediciones para el día 22/04/09.

TEMPERATURA 50 °C		1 y 2 VENTILADOR, 22/04/09				
Tiempo (min.)	Wi (gr.)	Ti (°C)	Te (°C)	%RHi	%Rhe	
09:40	31.6	50	28	30.3	65.4	
10:00	22.8	50	30	27.4	62.8	
10:20	20.7	50	30	27	61.5	
10:40	14.8	50	30	26.8	64.1	
11:00	11.5	50	30	26.3	63.8	
11:20	7.8	50	30	26.1	63.5	
11:40	5.8	50	30	26.1	62.4	
12:00	4.5	50	30	26	60.4	
12:20	3.4	50	30	25.4	58.9	
12:40	3	50	30	25.2	57.9	
13:00	2.7	50	30	25.1	56.4	
13:20	2.3	50	30	25	55.3	
13:40	2.3	50	30	25.8	44.9	
14:00	2.3	50	30	26.4	57.1	
14:20	2.3	50	30	27.2	57.2	

Tabla A1-5.- Mediciones para el día 24/06/09.

TEMPERATURA 55 °C		1 VENTILADOR, 24/06/09				
Tiempo (min.)	Wi (gr.)	Ti (°C)	Te (°C)	%RHi	%Rhe	
09:40	31.6	55	32	23.5	69	
10:00	26.2	55	32	25.9	67.8	
10:20	21.6	55	32	24.1	66.3	
10:40	17.6	55	33	23.6	65.3	
11:00	14	55	33	24.4	64.5	
11:20	11.6	55	33	23.7	63.8	
11:40	9	55	33	24.5	62.7	
12:00	6.3	55	33	23.9	61.3	
12:20	4.8	55	34	23	61.4	
12:40	3.5	55	34	22.4	61.1	
13:00	2.8	55	34	22.7	59.7	
13:20	2.5	55	34	22.4	57.7	
13:40	2.2	55	34	21.9	57.8	
14:00	1.9	55	35	22.9	25.4	
14:20	1.9	55	35	23.2	51.9	
14:40	1.9	55	35	22.8	52.6	
15:00	1.9	55	35	22.5	53.4	

Tabla A1-6.- Mediciones para el día 23/06/09.

TEMPERATURA 55 °C					
1 y 2 VENTILADOR, 23/06/09					
Tiempo (min.)	Wi (gr.)	Ti (°C)	Te (°C)	%RHi	%Rhe
09:40	31.6	55	32	26.3	69.5
10:00	24.6	55	32	25.1	67.5
10:20	19.3	55	32	24.4	65.5
10:40	14.3	55	32	25.2	65.2
11:00	10.6	55	32	24.4	63.6
11:20	7.5	55	32	24.2	63.1
11:40	5	55	33	24.5	63.3
12:00	3	55	33	24.1	62.7
12:20	2.5	55	34	24.1	63
12:40	2.1	55	34	24	62.6
13:00	2	55	34	23.9	61.8
13:20	2	55	34	23.5	60
13:40	2	55	34	23.2	59.7
14:00	2	55	34	22.1	50.1

Tabla A1-7.- Mediciones para el día 10/06/09.

TEMPERATURA 60 °C					
1 VENTILADOR, 10/06/09					
Tiempo (min.)	Wi (gr.)	Ti (°C)	Te (°C)	%RHi	%Rhe
09:40	31.6	60	33	21.1	66.3
10:00	24.8	60	33	20.9	63.9
10:20	21.5	60	33	21.5	63.5
10:40	16.2	60	34	21.4	63
11:00	13.6	60	34	20.6	62.2
11:20	10.3	60	34	20.2	61.1
11:40	8.1	60	34	20.7	60.2
12:00	5.9	60	35	19.9	59.3
12:20	4.3	60	35	19.7	58.9
12:40	3.2	60	35	19.6	58.2
13:00	2.3	60	36	20.1	58.5
13:20	2	60	35	20.6	58.6
13:40	1.9	60	36	20.5	57.6
14:00	1.7	60	35	19.4	55.9
14:20	1.7	60	36	19.2	50.3
14:40	1.7	60	37	20	47.5
15:00	1.7	60	35	20.3	56.7

Tabla A1-8.- Mediciones para el día 20/05/09.

TEMPERATURA 60 °C						1 Y 2 VENTILADOR, 20/05/09					
Tiempo (min.)	Wi (gr.)	Ti (°C)	Te (°C)	%RHi	%Rhe						
09:40	31.6	60	29	21.6	65.1						
10:00	29.6	60	29	20.8	63.2						
10:20	23.6	60	31	18.7	57.2						
10:40	19.6	60	31	18.7	56.3						
11:00	14.9	60	31	19.3	56.7						
11:20	12.1	60	31	19.8	56.4						
11:40	7.9	60	31	18.9	55.5						
12:00	6.8	60	31	18.4	55.5						
12:20	5	60	31	18.8	53.8						
12:40	3.1	60	31	18.3	53.4						
13:00	2.7	60	31	18.2	52.5						
13:20	2.1	60	31	18.1	46.7						
13:40	1.9	60	31	16.2	46.8						
14:00	1.9	60	31	16.2	46.9						
14:20	1.9	60	31	16.2	46.7						
14:40	1.9	60	31	16.2	46.7						

A2.- BITACORA DE PRUEBAS DE SECADO PARA EL CASO, TOMATE ROJO CON TRATAMIENTO.

Tabla A2-1.- Mediciones para el día 08/09/09.

TOMATE ROJO BAJO TRATAMIENTO											
TEMPERATURA 60 °c						1 VENTILADOR, 08/07/09					
Tiempo (min.)	Wi (gr.)	Ti (°C)	Te (°C)	%RHi	%Rhe						
09:40	31.6	60	32	22.4	70						
10:00	22.8	60	32	23.1	68.4						
10:20	18.3	60	32	22.6	67.1						
10:40	14.6	60	32	22	67.9						
11:00	8.8	60	32	22.2	67.3						
11:20	7.2	60	34	22.3	67.2						
11:40	4.4	60	34	22.5	68.1						
12:00	2.6	60	34	22.3	67.6						
12:20	2.1	60	34	21.6	64.9						
12:40	1.7	60	34	21.4	65						
13:00	1.5	60	34	20.6	65.1						
13:20	1.5	60	34	20.5	66.8						
13:40	1.5	60	34	20.7	66.9						
14:00	1.5	60	34	20.8	66.9						

Tabla A2-2.- Mediciones para el día 09/09/09.

TEMPERATURA 60 °C		1 y 2 VENTILADOR, 08/09/09			
Tiempo (min.)	Wi (gr.)	Ti (°C)	Te (°C)	%RHi	%Rhe
09:40	31.6	60	31	22.9	64
10:00	25.4	60	34	22.2	64.1
10:20	19.7	60	34	22	63.3
10:40	14.2	60	34	21.9	61.8
11:00	9.7	60	34	21.5	61.3
11:20	4.8	60	34	21.7	61.5
11:40	2.6	60	34	21.5	59.9
12:00	2	60	35	22.1	60.8
12:20	1.6	60	35	22.2	58.8
12:40	1.5	60	35	22	59.6
13:00	1.5	60	36	21.8	57.3
13:20	1.5	60	36	21.5	54.8
13:40	1.5	60	36	21.2	51.7

Tabla A2-3.- Mediciones para el día 10/09/09.

TEMPERATURA 55 °C		1 VENTILADOR, 08/09/09			
Tiempo (min.)	Wi (gr.)	Ti (°C)	Te (°C)	%RHi	%Rhe
09:40	31.6	55	33	27.4	67.1
10:00	25.6	55	33	27.4	66.6
10:20	18.4	55	34	27.1	63.7
10:40	15.8	55	34	25.4	63.7
11:00	11.3	55	34	26	64.4
11:20	8.4	55	34	24.6	62.5
11:40	5	55	35	24.2	61.3
12:00	2.9	55	35	24.7	62.7
12:20	1.9	55	35	24.8	61.3
12:40	1.7	55	35	24.9	60.7
13:00	1.5	55	35	26.4	64.7
13:20	1.5	55	36	25	57.3
13:40	1.5	55	36	24.8	56.8
14:00	1.5	55	36	24.5	54.8

Tabla A2-4.- Mediciones para el día 11/09/09.

TEMPERATURA 55 °C			1 y 2 VENTILADOR, 08/09/09		
Tiempo (min.)	Wi (gr.)	Ti (°C)	Te (°C)	%RHi	%Rhe
09:40	31.6	55	34	29.1	64.2
10:00	22	55	34	29	64.1
10:20	15.6	55	34	25.1	63.3
10:40	10	55	34	24.7	62
11:00	4.6	55	34	24.1	61
11:20	2.6	55	34	26.3	60.3
11:40	1.4	55	34	23.9	61.3
12:00	1.3	55	35	23.2	60.6
12:20	1.3	55	35	23.4	60.5
12:40	1.3	55	35	23.6	60.4
13:00	1.3	55	35	23.7	60.3

Tabla A2-5.- Mediciones para el día 12/09/09.

TEMPERATURA 50 °C			1 VENTILADOR, 08/09/09		
Tiempo (min.)	Wi (gr.)	Ti (°C)	Te (°C)	%RHi	%Rhe
09:40	31.6	50	33	30.3	65.4
10:00	25.2	50	33	31.1	65.5
10:20	20.4	50	33	30	64.3
10:40	16.2	50	33	30.1	64.6
11:00	12.4	50	33	28.9	62.2
11:20	9	50	33	29.1	61.8
11:40	6	50	33	29	61.3
12:00	3.8	50	34	29.4	61.3
12:20	2.2	50	35	28.5	60.5
12:40	1.8	50	35	28.1	58.5
13:00	1.6	50	35	26.6	57.4
13:20	1.6	50	35	26.6	55.8
13:40	1.6	50	35	26.7	53.6
02:00	1.6	50	35	26.8	51.4

Tabla A2-6.- Mediciones para el día 13/09/09.

TEMPERATURA 50 °C		1 y 2 VENTILADOR, 08/09/09			
Tiempo (min.)	Wi (gr.)	Ti (°C)	Te (°C)	%RHi	%Rhe
09:40	31.6	50	34	34.5	70.6
10:00	20.7	50	34	32.4	69.5
10:20	13.7	50	34	33.2	68.2
10:40	9.8	50	34	32.8	67.2
11:00	7	50	34	32.8	67.2
11:20	4.7	50	34	32.1	65.9
11:40	2.8	50	35	31.7	65.7
12:00	2.3	50	35	31.6	64.9
12:20	1.7	50	35	31.6	64.1
12:40	1.6	50	36	31.2	62.8
13:00	1.6	50	36	30.8	59.6
13:20	1.6	50	36	30.3	57.8
13:40	1.6	50	36	29.5	55.3

Tabla A2-7.- Mediciones para el día 14/09/09.

TEMPERATURA 45 °C		1 VENTILADOR, 08/09/09			
Tiempo (min.)	Wi (gr.)	Ti (°C)	Te (°C)	%RHi	%Rhe
09:40	31.6	45	33	35.4	68.9
10:00	26.5	45	33	35.9	65.2
10:20	24	45	33	35.8	65.1
10:40	19.8	45	33	36.6	65.3
11:00	17	45	34	36.2	65.2
11:20	13.9	45	34	35.7	64.6
11:40	10.8	45	34	37.6	70
12:00	8.7	45	32	39.3	70.2
12:20	6.6	45	32	38.1	72.4
12:40	5.3	45	32	36.4	69.7
13:00	3.7	45	32	35.2	67.6
13:20	2.8	45	32	36.1	70
13:40	2.1	45	32	37	72
14:00	1.9	45	32	37	73.4
14:20	1.7	45	32	37	73.5
14:40	1.5	45	32	37	74.3
15:00	1.5	45	32	37	74.3
15:20	1.5	45	32	35.6	68.9

Tabla A2-8.- Mediciones para el día 15/09/09.

TEMPERATURA 45 °C					
1 y 2 VENTILADOR, 08/09/09					
Tiempo (min.)	Wi (gr.)	Ti (°C)	Te (°C)	%RHi	%Rhe
09:40	31.6	45	33	38.4	65.8
10:00	24.5	45	33	38.4	67.3
10:20	20.1	45	33	38.7	67.1
10:40	16.2	45	33	38	66.6
11:00	12.4	45	33	38.7	66.3
11:20	9.3	45	33	37.1	64.7
11:40	6.3	45	34	36.7	63.5
12:00	3.8	45	34	35.4	62
12:20	2.8	45	35	35.7	60.8
12:40	2	45	35	37.2	60.6
13:00	1.6	45	35	36.1	58.6
13:20	1.4	45	36	35.2	53.8
13:40	1.4	45	36	35.1	53.7
14:00	1.4	45	36	35.1	53.8
14:20	1.4	45	36	35.1	53.8

Tabla A2-9.- Estudio para la obtención del peso seco, durante el día 01/07/09.

Fecha: 1/07/09 MASA SECA DEL TOMATE ROJO	
Observación: muestra de control de espesor de 5mm	
TIEMPO (min.)	MASA (gr.)
11:00	10.8
11:10	9.43
11:20	8.82
11:30	7.72
11:40	6.47
11:50	5.62
12:00	4.41
12:10	3.63
12:20	2.53
12:30	1.68
12:40	0.78
12:50	0.21
13:00	0.09
13:10	0.09
13:20	0.09
13:30	0.09

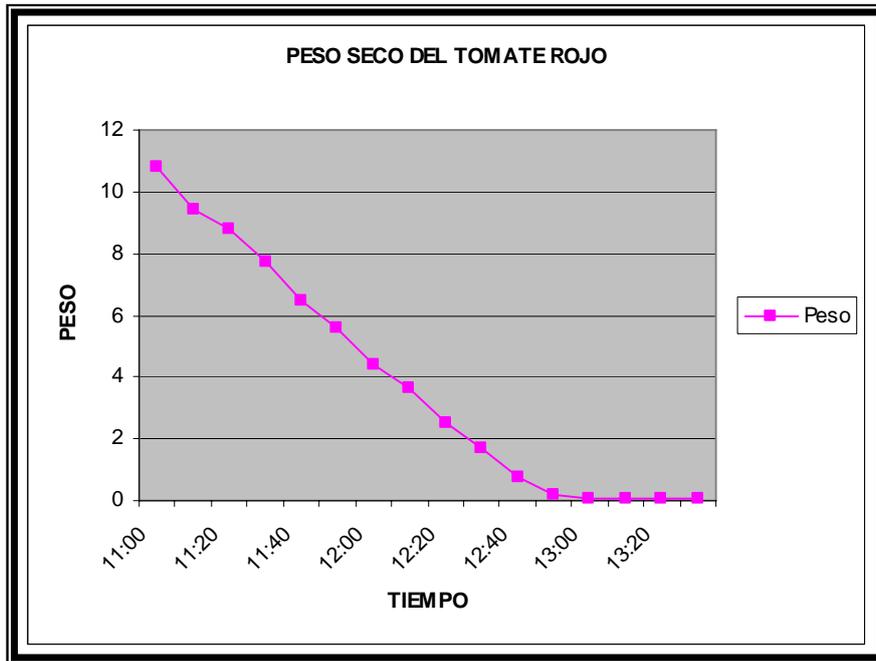


Figura A2-1.- Comportamiento y obtención del masa seca de la muestra, día 01/07/09.

ANEXOS (B).

B.- PRUEBAS PRELIMINARES CON OTROS PRODUCTOS.

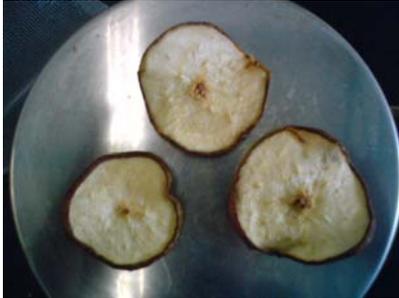


Figura B-1.- Secado de manzana.



Figura B-2.- Secado de guayaba.



Figura B-3.- Secado de pera.



Figura B-4.- Secado de tomate verde.



Figura B-5.- Secado de durazno.



Figura B-6.- Secado de papaya.



Figura B-7.- Secado de uva.



Figura B-8.- Secado de mango.