

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**Estudio de Cinética y Curva Característica de Secado de Banano,  
Noni y Papaya en un Secador de Túnel**

**TRABAJO DE DIPLOMA PRESENTADO POR:**

**Br. Kevin Josías Gutiérrez García**

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE:  
INGENIERO QUÍMICO**

**TUTOR  
Rafael Gamero, PhD.**

Managua, Nicaragua, Diciembre de 2019

*Dedicado a mi papá Ing. Salvador Gutiérrez y mi mamá Ing. Celeste García*

## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente, a Dios por brindarme salud, vida y las energías necesarias para alcanzar esta meta.

A mi papá, mamá y hermanas por darme siempre su apoyo incondicional.

Muchas gracias a mi tutor PhD. Rafael Gamero por la guía durante este trabajo, a los Ingenieros Juan Alonso y Francisco Canelo les agradezco mucho por todo el apoyo y consejos durante esta etapa.

Agradezco en gran manera a cada uno de mis amigos que me animaron a culminar esta etapa.

## **OPINIÓN DEL CATEDRÁTICO GUÍA**

El trabajo realizado por el Br. Kevin Josías Gutiérrez García, titulado “Estudio de Cinética y Curva Característica de Secado de Banano, Noni y Papaya en un Secador de Túnel”, es un aporte más a la temática de investigación de secado desarrollada en la Facultad de Ingeniería Química. La importancia del trabajo del Br. Gutiérrez García estriba especialmente en su aporte a la base de datos de curvas características de secado de frutas y vegetales que se ha venido construyendo en la Facultad desde su inicio con el trabajo de diploma presentado por la Ing. Ligia Sánchez Méndez en el año 1993.

Evidentemente, la disponibilidad de una base de datos de curvas características de frutas y vegetales es de gran utilidad para cualquier tipo de estudio teórico o práctico de procesos de secado de diferentes tipos y escalas, el dimensionamiento de secadores y la evaluación de los mismos equipos existentes y en funcionamiento. Esto es, específicamente para operaciones de secado de frutas y vegetales de cosecha local, ya sea con enfoque industrial o de emprendimiento a pequeña o mediana escala.

El estudio del Br. Gutiérrez García hace además un aporte importante en cuanto al ajuste paramétrico de sus datos de secado con un modelo adecuado para el tipo de material que constituye las frutas utilizadas en el estudio. Con ello, se representa con suficiente claridad la comprensión de los elementos esenciales de la modelación de transferencia de masa en un proceso de secado convectivo, y la utilización de modificaciones semi-empíricas que describan con la mejor aproximación la cinética del secado.

Para llevar a cabo el presente trabajo, el Br. Gutiérrez García debió desarrollar habilidades en el uso del equipo experimental, que implica: calibración de los elementos de medición, control de los instrumentos que gobiernan el proceso, estabilización de los parámetros de operación, regeneración de la columna de secado del aire y adquisición de datos experimentales. Además, el graduando desarrolló un diseño experimental apropiado y llevó a cabo el procesamiento de datos experimentales para la consecución de todas las curvas correspondientes al análisis de la cinética del secado de las frutas estudiadas, así como el ajuste paramétrico requerido para seleccionar el modelo de secado de capa fina que mejor definiera la curva de secado.

El presente trabajo representa claramente las competencias que posee el graduando en cuanto a la operación unitaria de secado convectivo, la cual involucra transferencia de masa con transferencia de calor entre la superficie expuesta del material a secar y la corriente de aire caliente aplicado en el secador de túnel. Estos fenómenos de transporte simultáneos pueden tratarse de manera sintetizada estableciendo un modelo como el propuesto. Esto abre la oportunidad de establecer un método que conlleve a la economía experimental para futura extensión de este estudio.

Por todo lo antes expuesto, solicito a los miembros del honorable tribunal examinador del presente trabajo de diploma, le otorguen al Br. Kevin Josías Gutiérrez García el título de Ingeniero Químico.

Rafael Gamero. Ph.D.  
Tutor

## RESUMEN

En el presente trabajo se realiza un estudio de la cinética de secado de tres vegetales: banano, noni y papaya. El trabajo consiste en la realización de una serie de experimentos en un secador de túnel, la construcción de las curvas de secado correspondientes a cada experimento y el cálculo de sus respectivas curvas de velocidad de secado que conllevan a la obtención de las curvas características de cada vegetal. Se planteó también la prueba de ajuste de las curvas de secado experimentales de cada vegetal con diferentes modelos de secado de capa fina de la literatura, determinando así los valores de las constantes empíricas correspondientes.

Se escogieron como variables controladas temperatura y velocidad lineal de aire con tres niveles distintos: para el caso de la temperatura valores de 50, 60 y 70 °C y para el caso de la velocidad de aire 1, 1.5, y 2 m/s.

Los experimentos fueron llevados a cabo en un secador de túnel, se hizo pasar un flujo de aire con temperatura y humedad controladas sobre una muestra de las frutas antes mencionadas, la muestra estaba contenida en un porta muestras de teflón colocada sobre una balanza analítica, se utilizó una cámara de video para llevar el registro de la variación de peso con respecto al tiempo. Se desarrollaron las curvas de secado y velocidad de secado a diferentes niveles de temperatura y velocidad de flujo de aire para cada una de las frutas respectivamente.

Para el caso del banano se determinó estadísticamente que la variable temperatura influye en los valores de contenidos de humedad final alcanzados y el tiempo de operación que tarda en llegar a dicho valor, en cambio, la variable velocidad de flujo de aire solamente influye en el tiempo requerido para alcanzar el contenido final de humedad, los niveles altos de las variables temperatura (70 °C) y velocidad lineal de flujo de aire (2 m/s) permiten alcanzar los contenidos de humedad final en un menor tiempo respecto a los demás niveles, siendo ambas variables influyentes en el proceso de secado.

Con respecto al caso del noni se determinó estadísticamente que los niveles medios y altos de las variables temperatura y velocidad de flujo de aire seleccionados permiten alcanzar el contenido final de humedad en menor tiempo lo cual resulta en un impacto positivo, a diferencia de los niveles bajos de temperatura y velocidad de flujo de aire seleccionados que requieren mayor tiempo de operación. Los niveles medios de temperatura (60 °C) y velocidad de flujo de aire (1.5 m/s) fueron seleccionadas como la combinación que brinda el mejor resultado para alcanzar el contenido final de humedad en menor tiempo respecto a las demás condiciones.

En el caso de la papaya se determinó estadísticamente que las variables temperatura y velocidad de flujo de aire afectan tanto la velocidad de secado como el contenido de humedad final, los valores altos de temperatura influyen con respecto a un menor tiempo en alcanzar bajos contenido de humedad final, caso contrario son las altas velocidades de flujo de aire debido que causan un impacto negativo con respecto al tiempo que tarda en alcanzar contenidos bajos de humedad final, esto es debido a que los poros de la superficie expuesta a una corriente de aire a altas velocidades tienden a formar una película impermeable. El nivel alto de temperatura (70 °C) y nivel bajo de velocidad de flujo de aire (1 m/s) fueron seleccionadas como el mejor resultado para alcanza un contenido de humedad final más bajo en menor tiempo.

Se llevó a cabo la comparación de los modelos semiempíricos con respecto a los datos experimentales, los mejores resultados fueron obtenidos con la modificación planteada por

Alonso *et al* (2014), el cual ofrece el mejor ajuste y la estimación de sus correspondientes constantes empíricas.

Las curvas características de secado para cada fruta, responden a un ajuste polinomial de 7<sup>mo</sup> orden y en todos los casos la función de ajuste presenta un índice de correlación satisfactoria con valores mayores a los 0.95.

Los resultados obtenidos en este estudio enriquecen la base de datos de curvas características de secado de vegetales y frutas existente en la Facultad de Ingeniería Química y además plantea el principio de un modelo específico para determinar la curva de secado a diferentes condiciones de temperatura y velocidad lineal del aire.

## ÍNDICE

CONTENIDO	PÁGINA
<b>1 I INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>2 II OBJETIVOS</b> .....	<b>3</b>
2.1 Objetivo General.....	3
2.2 Objetivos Específicos .....	3
<b>3 III MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>4</b>
3.1 Generalidades de los Vegetales .....	4
3.1.1 <i>Banano</i> .....	4
3.1.2 <i>Noni</i> .....	4
3.1.3 <i>Papaya</i> .....	5
3.2 Deshidratación de vegetales .....	5
3.3 Secado.....	6
3.3.1 <i>Contenido y retención de humedad en sólidos</i> .....	6
3.3.2 <i>Cálculo de humedad en sólidos</i> .....	7
3.3.3 <i>Mecanismos de secado</i> .....	7
3.4 Cinética de secado .....	8
3.4.1 <i>Curva de secado</i> .....	8
3.4.2 <i>Curva de velocidad de secado</i> .....	9
3.4.3 <i>Cálculo del coeficiente de transferencia</i> .....	11
3.4.4 <i>Determinación experimental de curva de velocidad de secado</i> .....	11
3.5 Curva característica de secado.....	12
3.5.1 <i>Modelos Matemáticos</i> .....	13
3.5.2 <i>Difusividad efectiva</i> .....	13
3.5.3 <i>Modelos Empíricos y Semi-Empíricos</i> .....	15
<b>4 IV MATERIAL Y MÉTODO</b> .....	<b>17</b>
4.1 Materiales .....	17
Preparación de la muestra.....	17
4.1.1 <i>Trabajo Experimental</i> .....	18
Equipo.....	18
Funcionamiento del Sistema Dinámico.....	19
4.2 Método.....	20
4.2.1 <i>Experimentos</i> .....	20
4.2.2 <i>Diseño Experimental</i> .....	20
4.2.3 <i>Recopilación de Datos</i> .....	22
4.2.4 <i>Procesamiento de Datos</i> .....	22
<b>5 V PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS</b> .....	<b>24</b>
5.1 Efecto de la temperatura y velocidad de aire en la cinética de secado de banano, noni y papaya.....	24
5.1.1 <i>Curvas de secado</i> .....	24
Curva de secado del Banano.....	24

Curva de secado del Noni.....	26
Curvas de secado de la Papaya.....	27
5.1.2 <i>Análisis de Varianza para la Cinética de Secado</i> .....	28
ANOVA del secado del Banano.....	28
ANOVA del secado de Noni .....	29
ANOVA del secado de Papaya.....	30
5.2 Ajuste de Modelos de Secado de Capa Fina.....	31
5.3 Velocidad de Secado en Función de Humedad Libre .....	36
5.3.1 <i>Curvas de velocidad de secado</i> .....	36
Curva de velocidad de secado del banano .....	36
Curva de velocidad de secado del noni .....	37
Curva de velocidad de secado de la papaya .....	38
5.4 Curva Característica de Secado .....	39
Curva característica de secado del banano .....	39
Curva característica de secado del noni.....	40
Curva característica de secado de la papaya.....	41
<b>6 VI CONCLUSIONES.....</b>	<b>43</b>
<b>7 VII RECOMENDACIONES .....</b>	<b>44</b>
<b>8 VIII NOMENCLATURA .....</b>	<b>45</b>
<b>9 IX BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>47</b>
<b>10 X ANEXOS.....</b>	<b>49</b>
10.1 Anexo A.....	50
10.2 Anexo B.....	51
10.3 Anexo C.....	61
10.4 Anexo D.....	65
10.5 Anexo E.....	68

## Índice de Tablas

Tabla 3.1 Modelos de secado para película fina (Pletney, 2007).....	16
Tabla 4.1 Variables controladas y niveles .....	21
Tabla 4.2 Número de experimentos.....	22
Tabla 5.1 Consolidado de las Pruebas Post Hoc para el banano .....	28
Tabla 5.2 Consolidado de las Pruebas Post Hoc para el noni.....	29
Tabla 5.3 Consolidado de las Pruebas Post Hoc para la papaya .....	30
Tabla 5.4 Valores de variables de modelo de ajuste.....	32
Tabla 5.5 Valores de k y $R^2$ para caso de banano.....	32
Tabla 5.6 Valores de k y $R^2$ para caso de noni .....	33
Tabla 5.7 Valores de k y $R^2$ para caso de papaya .....	35
Tabla 10.1 Tipos de diseños experimentales (Montgomery, 2004) .....	50
Tabla 10.2 Resultado del ANOVA para las curvas de secado del banano.....	52
Tabla 10.3 Pruebas Post Hoc de la Temperatura en el secado del banano.....	53
Tabla 10.4 Pruebas Post Hoc de la Velocidad del Aire en el secado del banano.....	54
Tabla 10.5 Resultado del ANOVA para las curvas de secado del noni .....	55
Tabla 10.6 Pruebas Post Hoc de la Temperatura en el secado del noni .....	56
Tabla 10.7 Pruebas Post Hoc de la Velocidad del Aire en el secado del noni .....	57
Tabla 10.8 Resultado del ANOVA para las curvas de secado de la papaya .....	58
Tabla 10.9 Pruebas Post Hoc de la Temperatura en el secado de la papaya .....	59
Tabla 10.10 Pruebas Post Hoc de la Velocidad del Aire en el secado de la papaya .....	60
Tabla 10.11 Resultado de modelos de capa fina caso banano.....	62
Tabla 10.12 Resultado de modelos de capa fina caso noni .....	63
Tabla 10.13 Resultado de modelos de capa fina caso papaya.....	64

## Índice de Figuras

Figura 3.1 Curva de secado (parámetros de operación constantes).....	9
Figura 3.2 Curva de velocidad de secado en función de humedad libre .....	10
Figura 3.3 Representación de Condiciones Límites de Difusividad Efectiva .....	14
Figura 4.1 Esquema del Sistema Dinámico: Secador de Túnel y Equipos Periféricos .....	18
Figura 4.2 Dimensiones de porta muestra de teflón a utilizar .....	20
Figura 5.1 Curva de secado de banano .....	25
Figura 5.2 Curva de secado de noni .....	26
Figura 5.3 Curva de secado de papaya .....	27
Figura 5.4 Curvas de secado de secado experimental y ajuste del banano .....	33
Figura 5.5 Curvas de secado experimental y ajuste del noni.....	34
Figura 5.6 Curvas de secado experimental y ajuste de la papaya.....	35
Figura 5.7 Curva de velocidad de secado de banano.....	36
Figura 5.8 Curva de velocidad de secado de noni .....	37
Figura 5.9 Curva de velocidad de secado de papaya.....	38
Figura 5.10 Curva característica de secado del banano.....	40
Figura 5.11 Curva característica de secado de noni .....	41
Figura 5.12 Curva característica de secado de la papaya .....	42
Figura 10.1 Curvas de velocidad de secado banano.....	65
Figura 10.2 Curvas de velocidad de secado noni .....	66
Figura 10.3 Curvas de velocidad de secado papaya .....	67

## **I Introducción**

En el presente trabajo se realiza un estudio de la cinética de secado de tres vegetales: banano, noni y papaya, utilizando distintas condiciones de operación (temperatura y velocidad del aire de secado) mediante secado convectivo con aire seco y caliente como medio para remover la humedad contenida.

El estudio y aplicación de técnicas de secado en alimentos y materiales es muy extenso. Centrando el campo de investigación en el tema de los productos alimenticios se debe destacar que cada alimento por sus características tiene un comportamiento único durante el proceso de secado, por lo cual, la investigación de la cinética de secado de alimentos es una parte fundamental del estudio de esta operación unitaria.

Un proceso de secado eficaz, que dé como resultado un producto final que cumpla con las especificaciones deseadas y permita la reducción de costos de operación, se ha vuelto el objetivo de un sin número de investigaciones que resultan llamativas para las industrias.

En la Facultad de Ingeniería Química (FIQ) se han realizado estudios en la temática de secado, que son antecedentes a nivel interno. Algunos ejemplos de éstas son: el estudio de Gamero. (1993) “Evaluación experimental de algunos parámetros que influyen en el proceso de secado de granos por contacto en un medio particulado caliente”; Jarquín. (1996) “Determinación de las curvas características de secado de algunas especies de árboles maderables de Nicaragua”; Sánchez. (1993) “Determinación de curvas características de secado de algunos vegetales de importancia comercial”. Es necesario recalcar que este campo de investigación es amplio, dando la oportunidad de efectuar investigaciones que permitieron diseños y estimaciones de equipos secadores tales como las realizadas por Rivas (1999) con el tema Diseño y estimación de costo de un secador híbrido para jengibre, entre otros.

En este trabajo se estudió la cinética de secado del banano, noni y papaya, haciendo uso de los datos obtenidos experimentalmente se desarrolló la Curva de secado para cada una de las condiciones planteadas, se evaluó estadísticamente el resultado de la interacciones de temperatura y velocidad de flujo de aire, determinando las condiciones que presentaron los mejores resultados con respecto a el tiempo en alcanzar menor contenido de humedad final con cada vegetal; posteriormente se aplicó un modelo de ajuste de capa fina el cual permitirá hacer réplicas del comportamiento real de cinética de secado de cada uno de ellos.

Se desarrolló la Curva de Velocidad de Secado para cada una de las condiciones planteadas y Curva Característica de Secado respectivamente para cada fruta y su ecuación de ajuste.

Con los resultados obtenidos a partir de este estudio se podrán hacer estimaciones de tiempos de secado de los vegetales seleccionados respectivamente sin la necesidad de llevar a cabo gran cantidad de experimentos. Las curvas generadas a partir de este estudio servirán como herramientas en simulaciones y diseño de equipos.

Con el desarrollo de las curvas características de dichas frutas se contribuirá directamente a la base de datos de que se tiene actualmente en la FIQ, la cual fue iniciada principalmente por la tesis de Sánchez. (1993) Determinación de curvas características de secado de algunos vegetales de importancia comercial..

Los vegetales fueron seleccionados debido a los beneficios nutricionales que pueden brindar como valor agregado en productos tales como cereales, frutas secas como aperitivos y bebidas entre otros, por lo cual este trabajo también puede ser de utilidad en el caso de elaborar productos alimenticios como los antes mencionados.

## **II Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

Determinar experimentalmente la cinética de secado de tres vegetales: banano (*Musa acuminata*), noni (*Morinda citrifolia*) y papaya (*Carica papaya*), para ser utilizados en simulaciones y diseños de equipos.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Determinar el efecto de las variables temperatura y velocidad de aire sobre el contenido de humedad y tiempo de secado para cada vegetal.
- Ajustar un modelo de secado de capa fina que describa el comportamiento de los datos obtenidos experimentalmente a diferentes niveles de temperatura y velocidad de aire.
- Determinar las curvas características de secado para los tres vegetales considerados en el estudio, contribuyendo a la base de datos existente en la Facultad de Ingeniería Química.

### III Marco Teórico

#### 3.1 Generalidades de los Vegetales

Las frutas y las hortalizas son alimentos de origen vegetal, constituyen un grupo bastante heterogéneo de alimentos que destacan desde un punto de vista nutricional por su aporte en vitaminas y minerales.

De acuerdo a su naturaleza, existen tres tipos de frutas (Rivera, 2008):

- Frutas oleaginosas, se emplean habitualmente para obtener grasas y aceites para el consumo humano.
- Frutas secas o de cascara, poseen en su parte comestible menos de un 50% de humedad. A este grupo pertenecen los higos secos, uvas pasas, ciruelas pasas, castaña, almendra, avellana y pistacho entre otros.
- Frutas carnosas, son las más acuosas, concretamente poseen más de un 50% de humedad en su parte comestible.

##### 3.1.1 Banano

El banano (*Musa acuminata*) es una especie frutal de forma curvilínea, color amarillo, sabor dulce, textura dura. Nutricionalmente considerado un alimento altamente energético, con hidratos de carbono fácilmente asimilables.

El vegetal contiene aproximadamente un 74% de agua y es conocido por un alto contenido de carbohidratos, fósforo y potasio, este último se encuentra en gran cantidad en este alimento, es esencial para las funciones musculares, transmisión de impulsos nerviosos y buen funcionamiento del corazón y riñones (Casallas, 2011).

En nuestro organismo tiene acción astringente, esto se debe a la presencia de taninos, por lo cual es muy usado para tratar malestares estomacales, por su contenido de fibras tiene un efecto protector ante cáncer de colon, ayuda a regular el funcionamiento del intestino e inhibe el crecimiento de células tumorales.

El banano deshidratado se utiliza en barras energéticas, bocadillos, como producto de valor agregado en cereales y en pequeños trozos con otros productos como el yogurt.

##### 3.1.2 Noni

El noni (*Morinda citrifolia*) es una fruta de forma oval cuyo color varía de verde a amarillo hasta casi blanco al momento de su recolección, su cascara se encuentra cubierta de pequeñas protuberancias, cada una de las cuales contiene una semilla. El fruto maduro lo caracteriza un olor fuerte semejante al del ácido butírico; la pulpa es jugosa y amarga, de color amarillo opaco y aspecto gelatinoso.

El vegetal contiene aproximadamente un 90% de agua y aproximadamente 160 compuestos fitoquímicos se han identificado en este fruto de los cuales los principales compuestos son fenólicos, ácidos orgánicos y alcaloides. El fruto del noni es rico en su contenido de aminoácidos, aceites esenciales, proseronina, proseroninasa, xeronina, ácido ascórbico y minerales como: potasio, azufre, calcio y fósforo (Ulloa *et al.*, 2012).

El uso farmacológico del noni ayuda en diversos tratamientos: mejora el sistema digestivo, combatir infecciones e inflamaciones de la piel, afecciones internas, problemas de huesos y articulaciones, infecciones bucales, ayuda en el control de diabetes y la hipertensión.

El noni fresco por su olor fuerte y textura característica, las personas no gustan de su uso, el noni deshidratado en cambio es de fácil uso en bebidas como valor agregado o cápsulas para sacar provecho de sus muchos beneficios.

### **3.1.3 Papaya**

La papaya (*Carica papaya*) es la variedad oriunda de América Latina, entre el Sur de México y la región Centroamericana, esta variedad se encuentra abundante en Nicaragua, en casi todas las zonas del país: bosques, claros selváticos y sitios cercanos al mar.

Los frutos se forman en el tallo del árbol, presentan una forma elipsoide a esféricas, se tornan de verde-amarillo a anaranjado-rojo en la madurez, de pulpa blanda y jugosa con un espesor de entre 3 a 5 cm, el fruto mide de 10 a 50 cm de largo y cada uno presenta un contenido de entre 400 a 500 semillas negras envueltas en una sustancia mucilagosa.

Presenta un contenido de agua del 90% y dentro de su composición química se destacan vitamina C y vitamina A, en forma de carotenos, vitaminas del grupo B como son vitaminas B1, B2 y B3. En cuanto a los minerales, la papaya es rica en potasio y cantidades apreciables de calcio, magnesio, fosforo y hierro (Arana y Quijano, 2012).

Presenta propiedades antioxidantes, atribuyéndosele acción preventiva frente al cáncer y enfermedades cardiovasculares, también es buena fuente de fibra, mejora la actividad intestinal, evitando el estreñimiento.

La papaya deshidratada se consume en habitualmente en desayunos como producto de valor agregado en cereales o papillas compuestas de varios cereales, mezclándola con yogurt o simplemente en pequeños trozos como postre.

## **3.2 Deshidratación de vegetales**

El secado es una operación que contribuye a la preservación evitando el crecimiento microbiano, reduce el costo de transporte y almacenamiento debido a la disminución de peso y volumen de los productos (Sokhansanj. y Jayas., 2007).

Adicionalmente es importante considerar la influencia que el secado tiene en la calidad de los productos, porque, propicia reacciones degradativas que afectan su valor nutricional, textura, color, olor y sabor. Razón por la cual el proceso de secado no debe de ser tomado a la ligera, se

deben de determinar condiciones de operaciones adecuadas que permitan minimizar el impacto de los efectos secundarios (Alzate, 2003).

### **3.3 Secado**

El secado se refiere a la eliminación o remoción de líquido (humedad) contenido en un sólido mediante evaporación. El uso de métodos mecánicos para remover dicha humedad generalmente no se considera como método de secado, aunque a menudo este tipo de operaciones como centrifugado, prensado, etc., pueden preceder en si al proceso de secado (Moyers. y Baldwin., 1997).

La evaporación se refiere a la eliminación de cantidades de humedad bastante grande que en gran parte de casos suele ser agua; además, ahí el agua se elimina en forma de vapor a su punto de ebullición. En el secado, el agua casi siempre se elimina en forma de vapor con aire (Geankoplis, 1998).

Al momento de que un sólido húmedo es sometido a secado térmico, dos subprocesos ocurren de manera simultánea:

- Transferencia de energía (calor) del ambiente circundante para lograr evaporación de la humedad presente en la superficie.
- Transferencia de humedad contenida en el interior del solido hacia la superficie del mismo y consecuente su evaporación debido al subproceso anterior.

La velocidad de secado se rige por la rapidez a la cual se llevan a cabo los subprocesos antes mencionados, también cabe mencionar que cualquiera de ellos puede gobernar como factor limitante.

Es importante saber que la intensidad del proceso de secado es influenciado por parámetros como temperatura, humedad, velocidad del gas o medio circundante (aire en la mayoría de los casos), presión total, naturaleza del sólido y factores externos como impurezas que pueden alterar el equilibrio del proceso al interactuar con la superficie del sólido (Strumillo y Kudra., 1986).

#### **3.3.1 Contenido y retención de humedad en sólidos**

La humedad puede ser encontrada en combinación química, presente como una solución líquida dentro del solido o incluso atrapada en la microestructura del sólido, la cual, ejerce una presión de vapor menor que la del líquido puro y se conoce como humedad ligada; la humedad en exceso se conoce como humedad no ligada (Mujumdar, 2007).

La fijación de la humedad en los alimentos varía en función de sus componentes químicos frente a las moléculas de agua, las proteínas y los almidones retienen humedad con mayor fuerza que los lípidos y azúcares cristalizados. Las frutas con contenidos considerables de azúcares se consideran particularmente higroscópicas en estado deshidratado. La retención de humedad es un proceso influido por el estado físico cristalino o amorfo, en el que se encuentran las redes

moleculares que dependen del tipo de tratamiento térmico al cual el alimento es sometido (Gutiérrez, 2000)

### **3.3.2 Cálculo de humedad en sólidos**

El contenido de humedad en sólidos es usualmente expresada como contenido de humedad por unidad de peso o volumen de sólido seco o húmedo (Moyers. y Baldwin., 1997).

Los datos obtenidos mediante experimento de secado por lotes generalmente se expresan como peso total de sólido húmedo  $W$  (sólido seco más humedad) a diferentes tiempos  $t$ . El contenido de humedad  $X$  puede ser expresada de la siguiente manera en base seca (Geankoplis, 1998):

$$X = \frac{W - W_s}{W_s} \frac{\text{(kg de humedad)}}{\text{(kg de material seco)}} \quad (3.1)$$

### **3.3.3 Mecanismos de secado**

En 1929 Sherwood definió el mecanismo de secado como la manera en la cual la humedad se mueve a través de un sólido y desde su superficie hacia el medio circundante durante el tiempo del proceso de secado (Chirife, 1983).

El mecanismo que regula el secado de un producto alimenticio depende de la estructura que este posea y de parámetros como el contenido de humedad, dimensiones del producto, la temperatura del medio de calentamiento, las velocidades de transferencia en la superficie y la humedad en el equilibrio.

En un alimento sólido que se encuentra inicialmente muy húmedo o saturado, su superficie estará cubierta por una delgada película del líquido. Cuando este se expone a una corriente de aire relativamente seco, la eliminación de la humedad tendrá lugar desde su superficie por efecto de arrastre, los capilares del sólido pueden llevar la humedad restante a la superficie tan pronto como esta se evapore.

Cuando el sólido ha alcanzado una reducción significativa en su contenido de humedad, la velocidad del proceso va disminuyendo. Alcanzando contenidos de humedad crítico, la película de humedad que se apreciaba en el inicio sobre la superficie se reduce, posteriormente se produce la aparición de puntos secos sobre la superficie, condición que corresponde a un periodo de rapidez decreciente y finalmente cuando la humedad en la superficie ha desaparecido completamente se ha llegado al punto de humedad de equilibrio y el proceso de secado se detiene.

### **3.4 Cinética de secado**

La cinética de secado describe la variación de contenido de humedad a través del tiempo. Cuando la cinética de secado se ha determinado de manera adecuada permite estimar y modelar tiempos de secado, requerimientos que debe de cumplir el medio circundante, requerimientos energéticos, cantidades de humedad a evaporar y otros parámetros de operación y además proporcionar datos que facilitan el diseño de equipos.

La cinética de secado puede ser ilustrada mediante diagramas con las siguientes coordenadas:

1. Contenido de humedad del material  $X$  con respecto al tiempo de secado  $t$  (curva de secado).
2. Velocidad de secado  $N_v$  con respecto al contenido de humedad del material  $X$  (curva de velocidad de secado)

#### **3.4.1 Curva de secado**

La figura 3.1 representa la curva típica de secado convectivo de un material higroscópico, en donde, se puede determinar dos subprocesos que se llevan a cabo y se encuentran estrechamente conectados: transferencia de calor y masa (externo e interno respectivamente como se detalló en sección 3.3).

Previo al proceso de secado, el material se encuentra cubierto por una delgada película de humedad que puede ser considerada como humedad libre, la trayectoria comprendida entre los puntos A-B representa el cambio de contenido de humedad del material al inicio del proceso de secado. La exposición de la superficie del material a un flujo de gas caliente resulta en evaporación de dicha película de humedad, esta etapa se puede ver representada en la trayectoria inicial comprendida por los puntos B-C de la figura 3.1, mostrando un comportamiento lineal debido a que dicho proceso es dominado por condiciones externas y permanece constante hasta llegar a un punto crítico de contenido de humedad representado por el punto C.

Posteriormente la trayectoria tiende a curvarse debido a la disminución del contenido de humedad del material, trayectoria en la cual el mecanismo de secado que predomina es interno y el comportamiento va en dependencia de la naturaleza del material hasta llegar a un contenido mínimo de humedad o humedad de equilibrio representado por el punto E.

Este tipo de curva permite determinar el tiempo necesario para secar lotes de productos en las mismas condiciones de secado (Treybal, 1999).

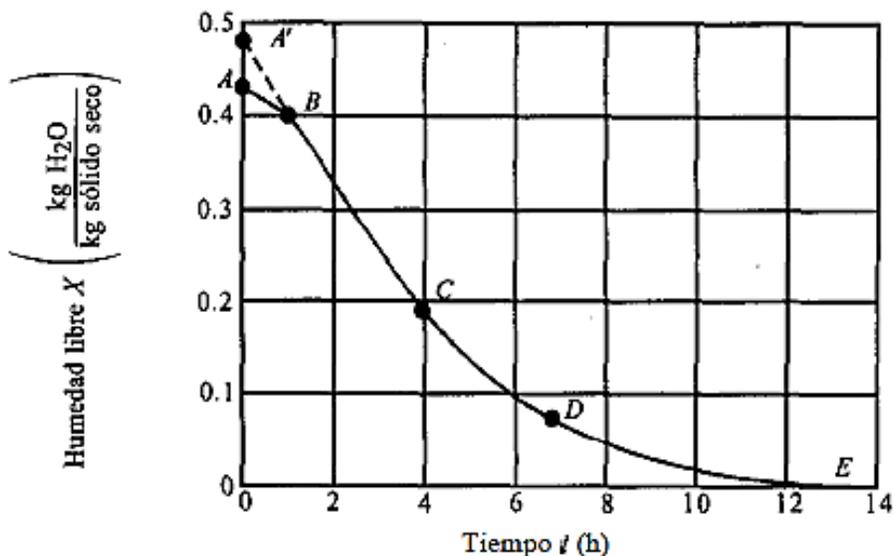


Figura 3.1 Curva de secado (parámetros de operación constantes)

### 3.4.2 Curva de velocidad de secado

La velocidad de secado  $N_v$ , puede ser expresada mediante el coeficiente de transferencia de masa de la fase gaseosa  $k_y$ ,  $Y_s$  y  $Y$  que a su vez representan las humedades de la capa líquida presente en la superficie del material y del gas o medio circundante, respectivamente (Kudra. y Strumillo., 1998) :

$$N_v = k_y (Y_s - Y) \quad (3.2)$$

Para una velocidad de gas constante con respecto a la superficie del material, el coeficiente de transferencia de masa  $k_y$  permanece constante.

La figura 3.2 representa la curva velocidad de secado típica de materiales higroscópicos, la trayectoria B-C representa una velocidad de secado constante, este periodo de velocidad equivale fundamentalmente a la evaporación a partir del cuerpo de agua que se encuentra en la superficie, este comportamiento es independiente de cualquier tipo de sólido (Sharma *et al.*, 2003), predominando las condiciones externas al igual que en la figura 3.1.

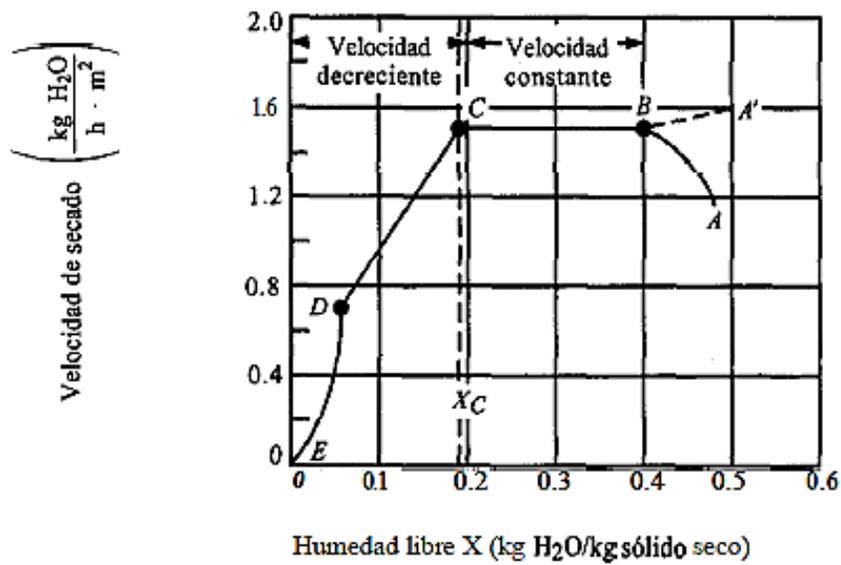


Figura 3.2 Curva de velocidad de secado en función de humedad libre

Para obtener la trayectoria completa de la curva además de la trayectoria constante es necesario tomar en cuenta la función de la Curva Característica de Secado ( $f$ , ver ecuación (3.6) en acápite 3.5: Curva Característica de Secado) como función de extensión en el proceso de secado tomando en cuenta el comportamiento y resistencia propio de cada muestra, por lo cual la expresión queda de la siguiente manera.

$$N_v = f N_w \tag{3.3}$$

El punto C en la gráfica representa el contenido crítico de humedad del sólido y el inicio de una nueva etapa, este suele ser el periodo más largo en el proceso, la superficie ya no se encuentra saturada y se empieza a apreciar la aparición de puntos secos sobre la superficie que antes se encontraba cubierta por una película de humedad. En esta etapa del proceso de secado la velocidad con que el sólido pierde humedad se reduce, los alimentos no higroscópicos podría presentar una sola etapa de velocidad decreciente mientras los alimentos higroscópicos presentan dos etapas de velocidad decreciente (Sharma *et al.*, 2003).

A pesar de una disminución en la velocidad de secado, la rapidez de secado por unidad de superficie húmeda se mantiene constante, esta etapa se le conoce como periodo de secado superficial no saturado, es la primera fase del periodo de velocidad decreciente comprendida por la trayectoria C-D (Lozano, 2009).

En la segunda etapa de velocidad decreciente representada por la trayectoria D-E, la rapidez con que se lleva a cabo la difusión de la humedad hacia el medio circundante es controlada en gran parte por el mecanismo de secado dentro del sólido.

### **3.4.3 Cálculo del coeficiente de transferencia**

El coeficiente de transferencia de masa de la fase gaseosa  $k_y$  puede ser calculado mediante la analogía Chilton-Colburn (James Welty, 2007):

$$\frac{h}{\rho v_{\infty} c_p} (\text{Pr})^{2/3} = \frac{k_y}{v} (\text{Sc})^{2/3} \quad (3.4)$$

Esta ecuación relaciona la transferencia convectiva de calor y masa, tomando en cuenta la velocidad de aire  $v$ , el coeficiente de transferencia  $k_y$ , número de Schmidt  $\text{Sc}$ , coeficiente convectivo de transferencia de calor  $h$ , densidad  $\rho$ , la capacidad calórica  $c_p$  y número de Prandtl  $\text{Pr}$ ; permitiendo la evaluación de un coeficiente de transferencia desconocido a través de la información obtenida de otro fenómeno de transferencia. Dicha analogía es válida para gases y líquidos con rangos dentro de los límites  $0.6 < \text{Sc} < 2500$  y  $0.6 < \text{Pr} < 100$ .

### **3.4.4 Determinación experimental de curva de velocidad de secado**

Para determinar experimentalmente la velocidad de secado de un material, se procede a colocar dentro del secador de túnel, de manera tal que sea posible llevar un registro de variación de peso en diferentes intervalos de tiempo haciendo uso de una balanza analítica.

La velocidad de secado se define de la siguiente manera (Geankoplis, 1998):

$$N_v = -\frac{W_s}{A} \frac{dX}{dt} \quad (3.5)$$

en donde  $W_s$  representa los kilogramos de sólido seco usados,  $A$  es el área superficial expuesta al secado en el intervalo de tiempo en el se lleva a cabo un cambio de humedad desde el valor inicial de cada muestra hasta un valor final de equilibrio.

### 3.5 Curva característica de secado

El concepto de curva característica de secado fue introducido por van Meel, su postulado refiere que cuando se trabaja el secado convectivo bajo determinadas condiciones de temperatura, humedad y velocidad de flujo de gas o aire establecidas, es posible determinar una sola curva normalizada de velocidad de secado que caracteriza a dicho material y es independiente de condiciones externas de secado.

Dicha curva se puede determinar bajo las coordenadas de velocidad relativa y contenido de humedad característico de humedad en relación a la humedad presente en su punto crítico. La velocidad relativa de secado  $f$  se puede definir de la siguiente manera (Chen y Mujumdar, 2009):

$$f = \frac{N_v}{N_w} \quad (3.6)$$

En donde  $N_v$  es la velocidad de secado por unidad de superficie y  $N_w$  es la velocidad de secado en el periodo constante representado en la trayectoria B-C de la figura 3.2.

El contenido característico de humedad  $\phi$  se puede definir de la siguiente manera:

$$\phi = \frac{X}{X_{cr}} \quad \text{Cuerpos higroscópicos} \quad (3.7)$$

$$\phi = \frac{X - X_{eq}}{X_{cr} - X_{eq}} \quad \text{Cuerpos no higroscópicos} \quad (3.8)$$

En las cuales  $X$  es el valor de humedad contenido en el sólido,  $X_{cr}$  es el valor crítico correspondiente. Para el caso particular de cuerpos no higroscópicos la humedad referida es la humedad libre que puede ser eliminada.

La curva característica de secado se obtiene mediante la gráfica de las coordenadas  $f$  con respecto a  $\phi$ , esta expresión facilita el estudio de cinética de secado de diversos materiales, además, su desarrollo permite evaluar cálculos de transferencia de masa y calor durante procesos de secado a nivel de laboratorio e industriales, llevar a cabo balances de materia y energía, estimar coeficiente de transferencia de calor y energía y llevar a cabo estimaciones de tiempo de secado a condiciones determinadas lo cual la convierte en una herramienta sumamente valiosa ya que brinda la oportunidad de optimizar tiempo y recursos materiales.

### 3.5.1 Modelos Matemáticos

Existe un sin número de artículos en donde se pueden encontrar varios métodos propuestos para analizar el secado en capa fina de productos alimenticios: modelos teóricos, semiteóricos y empíricos. Estos modelos de secado permiten no solo predecir el mejor comportamiento durante el proceso de secado, sino que también ofrecen herramientas para predecir las condiciones de almacenamiento y empaque, ayuda a establecer el contenido final de humedad de los productos y los requisitos del proceso de secado (Montes *et al.*, 2008).

### 3.5.2 Difusividad efectiva

Difusión es el proceso en el cual se transporta materia de un punto del sistema a otro como resultado de un movimiento aleatorio de las moléculas (Crank, 1975), explicando el proceso en el que la humedad contenida en un material puede migrar hacia la superficie en fase líquida, fase gaseosa o en ambas fases. La transferencia de calor por conducción se debe también a un movimiento aleatorio de las moléculas, fenómeno que relaciona ambos procesos.

Esta relación es reconocida por la ley de Fick, que adopta en su modelo la expresión matemática de conducción de calor derivada previamente por Fourier. La teoría matemática de difusión de sustancias isotrópicas por lo tanto se encuentra basada en la hipótesis de que la velocidad de transferencia de una sustancia difundida a través de un área es proporcional al gradiente de concentración:

$$N_v = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (3.9)$$

En donde  $N_v$  es la velocidad de transferencia por unidad de superficie,  $C$  es la concentración de la sustancia de difusión,  $x$  representa el eje coordenado en dirección de la transferencia y  $D$  es el coeficiente de difusión. El signo negativo de la ecuación (3.9) es debido a que el fenómeno de difusión se lleva a cabo en dirección opuesta a la zona con la mayor concentración.

Considerando el movimiento de la humedad en una sola dirección y una placa o porta muestra delgado en donde se asegure una capa fina de material como muestra, la difusividad efectiva se puede estimar de la siguiente manera (Crank, 1975):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \quad (3.10)$$

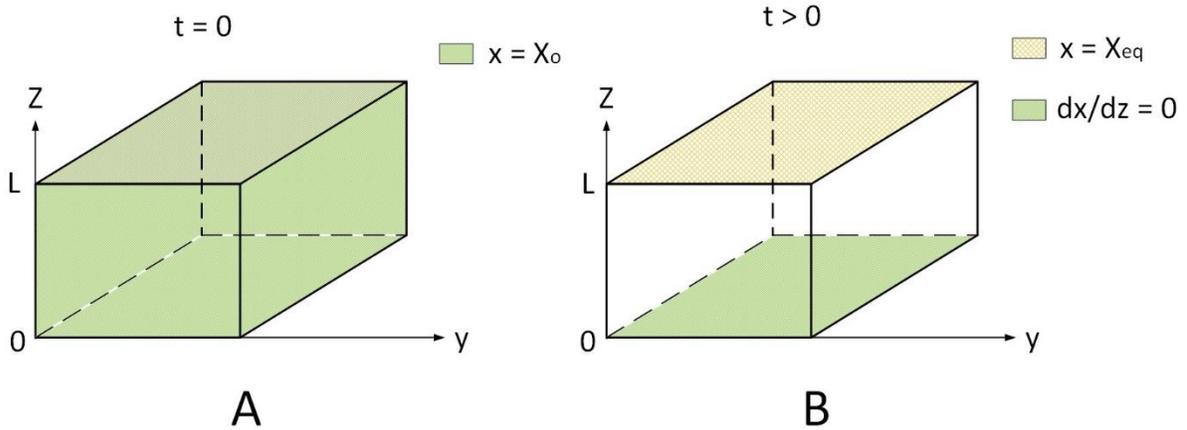
En donde  $z$  representa la longitud de la coordenada. Las condiciones limites correspondientes son (Lozano, 2009):

$$X = X_o \quad 0 \leq z \leq L \quad t = 0 \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial X}{\partial z} = 0 \quad z = 0 \quad t > 0 \quad (3.12)$$

$$X = X_{eq} \quad z = L \quad t > 0 \quad (3.13)$$

En la figura 3.3, se explica de manera gráfica las condiciones límites de Difusividad Efectiva en una muestra; en A (figura 3.3) donde  $t = 0$  no ha dado inicio la transferencia de humedad de la muestra hacia el medio o corriente de aire a la cual se expondrá, por lo cual la humedad inicial es en toda la muestra; en B (figura 3.3) donde  $t > 0$  la transferencia de humedad va desde 0 a L, en el inicio para  $z = 0$  no hay variación de humedad y para  $z = L$  la humedad presente en la muestra ha llegado al equilibrio.



**Figura 3.3** Representación de Condiciones Límites de Difusividad Efectiva

Asumiendo las condiciones límites, distribución uniforme de la humedad, una solución a la ecuación (3.10) es:

$$\frac{X - X_{eq}}{X_o - X_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[ -(2n+1)^2 \frac{\pi^2}{4} \frac{Dt}{L^2} \right] \quad (3.14)$$

Simplificando la ecuación (3.14) de tal manera que sólo se considere el primer término de la serie y asumiendo valores de  $X_{eq} = 0$ , lo cual es correspondiente para cuerpos higroscópicos (L. Hassini, 2004), tenemos el siguiente resultado:

$$\frac{X}{X_o} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[-\frac{\pi^2}{4} \frac{Dt}{L^2}\right] \quad (3.15)$$

### **3.5.3 Modelos Empíricos y Semi-Empíricos**

Los modelos empíricos y semi-empíricos son utilizados frecuentemente para describir el comportamiento de secado en una capa delgada de una muestra de un alimento, estos modelos expresan una relación directa entre el contenido de humedad y el tiempo de secado (Pletney, 2007). El enfoque principal está en la transferencia de masa desde la superficie de la muestra hacia la corriente de aire que pasa sobre la superficie. Se derivan de soluciones simplificadas de la ecuación de la Ley de Fick, como, por ejemplo, variantes relativas a la ecuación (3.15), no requieren considerar la geometría de la muestra con la cual se llevan a cabo los experimentos.

Se hace uso del modelo que mejor se ajusten a la Curva de Secado (Figura 3.1) respectiva de cada vegetal obtenida experimentalmente. A continuación, se presentan modelos aplicables para capa fina:

**Tabla 3.1** Modelos de secado para película fina (Pletney, 2007)

Nombre del Modelo	Ecuación de Modelo	Número de Ecuación
Henderson & Pabis	$rX = a * \exp(-kt)$	(3.16)
Lewis	$rX = a * \exp(-kt) + (1 - a) * \exp(-kat)$	(3.17)
Page	$rX = \exp(-kt^n)$	(3.18)
Page Modificado	$rX = \exp(-(kt)^n)$	(3.19)
Page Modificado II	$rX = \exp(-c(t / L^2)^n)$	(3.20)
Geométrico	$rX = at^n$	(3.21)
Wang & Singh	$rX = 1 + at + bt^2$	(3.22)
Dos Términos Exponenciales	$rX = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kat)$	(3.23)
Thompson	$rX = a \ln mr + b(\ln mr)^2$	(3.24)
Logarítmico	$rX = a_o + a * \exp(-kt)$	(3.25)
Logístico	$rX = a * \exp(-kt) + b * \exp(-gt) + c * \exp(-ht)$	(3.26)
Aproximación de Difusión	$rX = a * \exp(-kt) + (1 - a) * \exp(-bkt)$	(3.27)
Verma et al.	$rX = a * \exp(-kt) + (1 - a) * \exp(-gt)$	(3.28)
Dos Términos	$rX = a_1 * \exp(-k_1t) + a_2 * \exp(-k_2t)$	(3.29)
Midilli et al.	$rX = a * \exp(-kt^n) + bt$	(3.30)
Jena and Das	$rX = a * \exp(-kt + b\sqrt{t}) + c$	(3.31)
Distribución de Weibull	$rX = a - b * \exp(-(kt^n))$	(3.32)
Henderson & Pabis Modificado	$rX = a * \exp(-kt) + b * \exp(-gt) + c * \exp(-ht)$	(3.33)

**rX: Relación de contenido de humedad**  
**t: Tiempo**  
**k: Coeficiente de transferencia de masa**  
**a, b, c, g, h, n: Constantes empíricas**

## **IV Material y método**

A continuación, se describe el funcionamiento del equipo, herramientas, accesorios, materiales y procedimientos a utilizar para llevar a cabo cada uno de los experimentos, la manera en la cual se realizará el registro y análisis de los datos obtenidos y diseño experimental seleccionado.

### **4.1 Materiales**

Los materiales que se utilizaron son muestras de los tres vegetales propuestos los cuales poseen un alto contenido de humedad. Las variedades de las muestras son: banano caraceño variedad *Gros Michel* (Fuentes *et al.*, 2006), papaya rivense variedad *Maradol* (Reyes, 2007) y en el caso del Noni no se encuentra otra variedad presente en el país.

Por información obtenida en investigaciones previas de secado de materiales, se espera una reducción paulatina de tamaño de la muestra en cada experimento por motivos de reducción del contenido de humedad, este efecto no se considerará al momento de efectuar los cálculos correspondientes según los modelos planteados, esto es con el propósito de reducir la complejidad de cálculos y análisis de resultados.

#### ***Preparación de la muestra***

La preparación de cada muestra previo al inicio de los experimentos se efectuó de la siguiente manera:

1. Limpieza previa, con el fin de remover cualquier tipo de impureza que pueda afectar el comportamiento del mecanismo de secado durante el transcurso del experimento.
2. Eliminación de la cascara, cada muestra fue tomada exenta de cascara, solo se utilizó la parte carnososa.
3. Previo a cada experimento se efectuó prueba de humedad en balanza de humedad para determinar el porcentaje de humedad total de la fruta de la cual se extrae la muestra.
4. El corte realizado a cada muestra se describe a continuación:
  - 4.1. El banano se cortó en rodajas y se colocó en el porta muestras, posteriormente los espacios vacíos se rellenaron con pequeños trozos cortados a la medida, colocados sin hacer ningún tipo de presión.
  - 4.2. El noni se cortó en una sola capa a la medida del área del porta muestra, la muestra debe ir libre de semillas.
  - 4.3. La papaya se cortó en una sola capa a la medida del área del porta muestra, la muestra debe ir libre de semillas.

### 4.1.1 Trabajo Experimental

#### Equipo

Los equipos utilizados para llevar a cabo los experimentos que conforman el sistema dinámico son: un secador de túnel y equipos periféricos que conforman el equipo experimental que permitió establecer y controlar las diferentes condiciones de operación para cada uno de los experimentos (ver figura 4.1).

Los equipos periféricos son: ventilador, juego de resistencias eléctricas de 1 kw de potencia, torre de desecado llena de sílica gel, válvulas de bola para direccionar el flujo de aire en dirección del túnel de secado o devolver el flujo al sistema para llevar a cabo la regeneración de la sílica, tubería de acero inoxidable para conectar todas las piezas del equipo, balanza analítica para recopilar los datos de la muestra y dos controladores para establecer los parámetros de operación de las resistencias eléctricas y ventilador respectivamente.

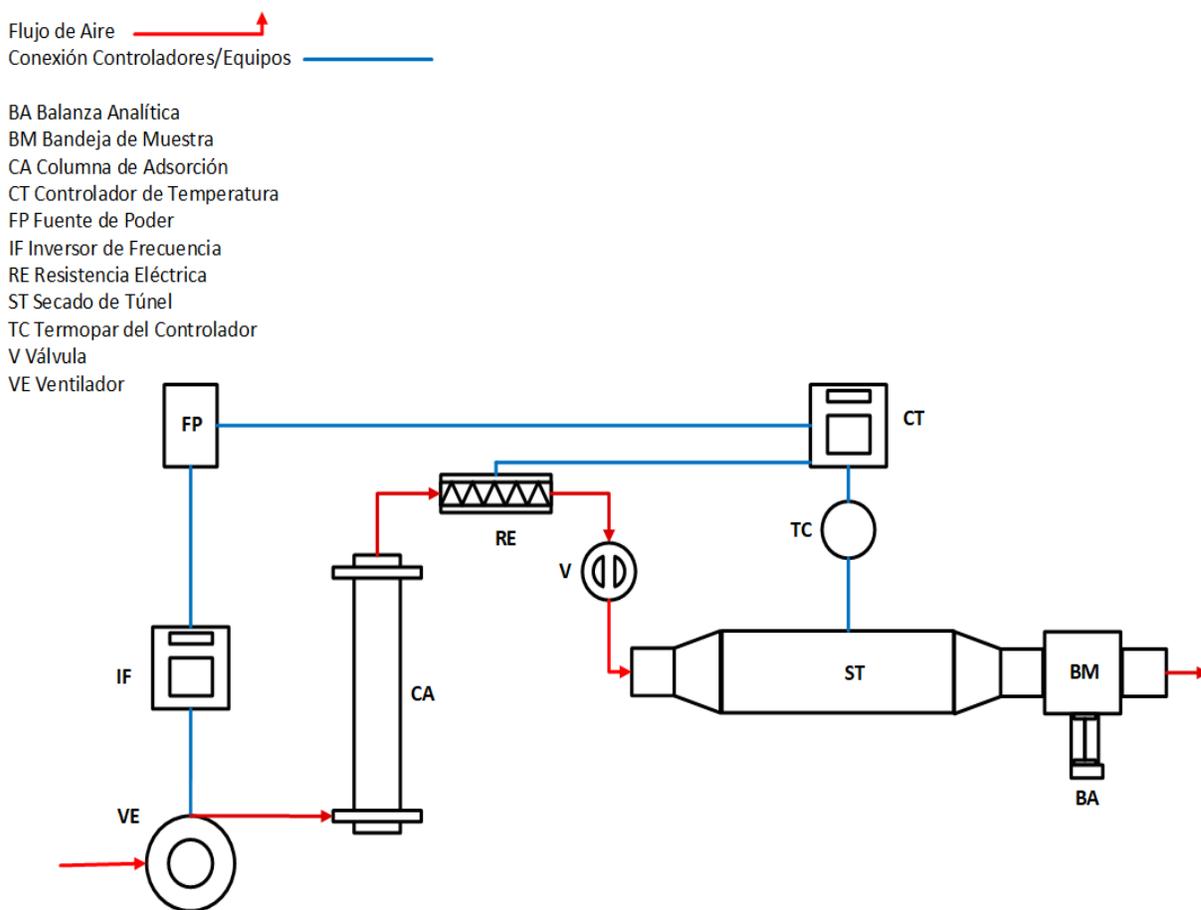


Figura 4.1 Esquema del Sistema Dinámico: Secador de Túnel y Equipos Periféricos

### **Funcionamiento del Sistema Dinámico**

El sistema dinámico funciona haciendo circular aire del ambiente seco y caliente, mediante el uso de un ventilador, haciéndolo llegar al secador de túnel donde se encuentra ubicada la muestra. El ventilador conduce el aire a través de una manguera móvil hacia una columna de adsorción, la cual tiene en su interior sílica gel como agente adsorbente para retirar la humedad del aire, posteriormente el aire seco pasa a través de un conjunto de resistencias eléctricas, las cuales se encuentran conectadas a un controlador que permite establecer y mantener constante la temperatura establecida de operación y finalmente pasar por el secador de túnel.

Cuando se han alcanzado los rangos de operación establecidos dentro de secador de túnel, se coloca la muestra del vegetal en la sección de prueba. La muestra de cada vegetal es colocada en una pequeña bandeja de teflón, la bandeja de teflón se encuentra suspendida sobre una balanza analítica, la cual permite tomar un registro del cambio de peso de la muestra debido a la pérdida de humedad en el tiempo.

Antes de llevar a cabo cada experimento, es necesario regenerar la sílica gel contenida en la torre de adsorción. Esto se realiza recirculando aire caliente a través de la torre para remover la humedad contenida en la sílica. El proceso finaliza cuando el aire a la salida de la torre contiene un valor de humedad relativamente bajo (menor al 5%), dicho valor de humedad es verificado con una sonda medidora de humedad portátil colocada a la salida de la torre.

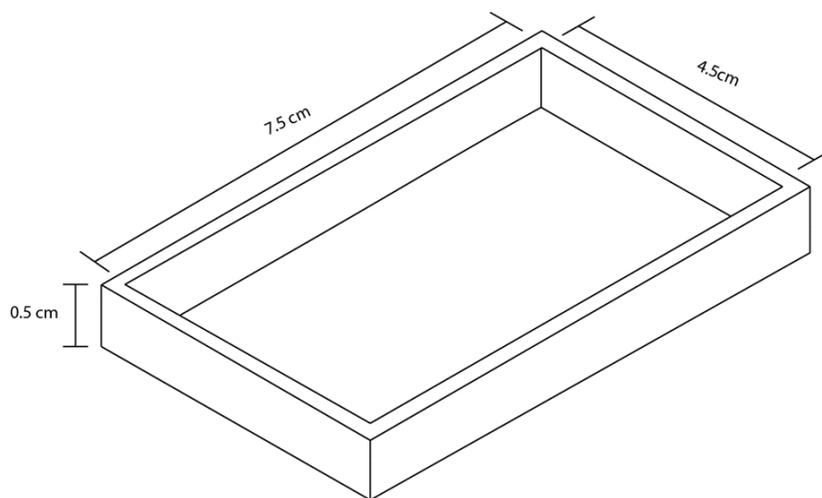
## 4.2 Método

### 4.2.1 Experimentos

Para cada uno de los experimentos, la muestra de vegetal previamente preparada fue cortada de manera que ocupe todo el espacio del porta muestras (ver figura 4.2), se ubicó en la sección BM sobre la balanza.

El porta muestra se colocó de manera que el lado que mide 4.5 cm quedó paralelo al flujo de aire con el objetivo de ayudar a que la corriente de aire contenga el mismo porcentaje de humedad al momento de hacer contacto sobre toda la superficie de la muestra.

La muestra quedó expuesta a las condiciones predeterminadas según cada experimento a llevar a cabo, garantizando que los niveles seleccionados de temperatura y velocidad de flujo se mantuviesen constante durante el proceso de secado.



**Figura 4.2** Dimensiones de porta muestra de teflón a utilizar

### 4.2.2 Diseño Experimental

El diseño experimental es una herramienta fundamental para implementar mejoras en el rendimiento de procesos, reducción de tiempo de desarrollo, reducciones de costos, desarrollo de procesos nuevos, etc. (ver Anexo A).

El objetivo radica en el estudio del efecto de la temperatura y velocidad de flujo de aire sobre las muestras de vegetales previamente mencionados, considerando la temperatura y velocidad de flujo de aire como las variables controladas durante los experimentos y la variación de humedad de la muestra en el transcurso de los experimentos como la variable respuesta.

Para cada variable controlada se emplearon tres niveles, siendo estos bajo, medio y alto, por lo cual el diseño experimental a seleccionar es el de  $3^k$ , en donde 3 corresponde al número de niveles a emplear durante los experimentos y el exponente k es igual a 2 debido al número de variables a controlar, quedando un diseño experimental  $3^2$ .

Los valores de los tres niveles empleados para las variables controladas temperatura de secado y velocidad de aire se muestran en la tabla 4.1.

**Tabla 4.1** Variables controladas y niveles

<b>Variable Controlada</b>	<b>Nivel bajo</b>	<b>Nivel medio</b>	<b>Nivel alto</b>
<b>Temperatura de secado</b>	50 °C	60 °C	70 °C
<b>Velocidad de Aire</b>	1 m/s	1.5 m/s	2 m/s

Los niveles seleccionados para la variable controlada de temperatura de secado son debido a: nivel alto es una temperatura máxima común a la cual los vegetales no sufren deterioro considerable, nivel bajo seleccionado por encima de la temperatura promedio del ambiente para favorecer el proceso de secado y medio corresponde al promedio de los valores asignados a alto y bajo; los niveles seleccionados para la variable controlada de velocidad de aire son acorde a la operatividad del ventilador, destacando que el nivel alto es el máximo alcanzado en la sección BM (ver figura 4.1).

La cantidad de combinaciones posibles entre las variables controladas y niveles propuestos según el diseño experimental dio como resultado un total de nueve experimentos, a este modelo se efectuó una modificación, llevando a cabo los experimentos de los puntos extremos y centro, conociendo el comportamiento de los resultados obtenidos de las combinaciones de los extremos y un pivote central se puede estimar el comportamiento de las combinaciones que quedan en medio, cada experimento se efectuó por triplicado para asegurar que los resultados obtenidos son reproducibles respecto al comportamiento.

La tabla 4.2 representa lo antes explicado, el total de los nueve experimentos resultantes según todas las combinaciones posibles y los experimentos a llevar a cabo marcados en color gris.

**Tabla 4.2** Número de experimentos

Variables Controladas	Velocidad de aire			
	Niveles	Bajo	Medio	Alto
Temperatura de secado	Bajo	1	2	3
	Medio	4	5	6
	Alto	7	8	9

#### 4.2.3 Recopilación de Datos

Los datos recopilados durante cada experimento fueron:

- El tiempo.
- El peso de la muestra en el transcurso del tiempo.

Durante cada experimento los valores para las variables controladas temperatura y velocidad de aire se mantuvieron constantes.

Se hizo uso de una cámara de video para recopilar los datos de peso de la muestra a medida que transcurría el tiempo, una solución alternativa debido a que no se cuenta con el método original el cual consistía en que la balanza se encontraba conectada a un ordenador pc en el cual se podía llevar un registro de los valores deseados en los intervalos de tiempo predeterminados según los requerimientos de cada experimento.

#### 4.2.4 Procesamiento de Datos

Una vez obtenidos los datos de tiempo y peso de la muestra de cada experimento se aplicó Análisis de Varianza (ANOVA) haciendo uso de programa SPSS con el objetivo de su validación, posteriormente se ordenó en una hoja de cálculo de Microsoft Excel, de modo que el código del programa escrito en Matlab permite leer los datos y efectuar los cálculos correspondientes que se detallan a continuación:

- Haciendo uso de la **ecuación (3.1)** se calculó el contenido de humedad del sólido en base seca para cada corrida experimental y se efectuó normalización de los datos obtenidos, luego se graficó con respecto al tiempo, de esta manera se generó la curva de secado para cada uno de los vegetales dentro de límites estandarizados.

- Se introdujo los modelos matemáticos planteados en la tabla 3.1, se llevó a cabo la evaluación del resultado con respecto al comportamiento de las Curvas de Secado obtenidas experimentalmente de cada vegetal.
- Se efectuaron los cálculos correspondientes para generar la curva de velocidad de secado de cada uno de los vegetales utilizando las **ecuaciones (3.1) y (3.5)**.
- Se efectuaron los cálculos correspondientes para generar la curva característica de secado de cada uno de los vegetales, utilizando la **ecuación (3.6)** se obtuvieron los valores de  $f$  y la **ecuación (3.7)** para los valores de  $\phi$  para cuerpos higroscópicos, posteriormente se ajustaron a una función matemática polinomial para describir el comportamiento de las curvas características de secado de cada vegetal.

## **V Presentación y Discusión de los Resultados**

En el presente trabajo se llevó a cabo un estudio de la cinética de secado de banano, noni y papaya. Se realizaron una serie de experimentos en un túnel de secado convectivo controlando la temperatura y velocidad de aire empleando 3 niveles (bajo, medio y alto) para cada variable (ver tabla 4.1), se establecieron 5 combinaciones entre los niveles seleccionados (ver tabla 4.2) que permitieron describir el comportamiento de la cinética de secado para cada una de las frutas, cada experimento fue realizado por triplicado para garantizar la reproducibilidad del comportamiento mostrado por los datos obtenidos.

A partir de los datos generados experimentalmente se desarrollaron curva de secado, curva de velocidad de secado y curva característica para cada uno de los vegetales con el objetivo de estudiar la manera en como las variables temperatura de secado y velocidad de aire afectan la cinética de secado.

El presente estudio también incluye la selección de un modelo matemático de capa fina que genera un ajuste confiable al comportamiento de la curva de secado obtenida de los cálculos realizados a partir de los valores obtenidos experimentalmente de cada fruta.

### **5.1 Efecto de la temperatura y velocidad de aire en la cinética de secado de banano, noni y papaya**

Para el caso de los tres vegetales estudiados, se observó claramente que tanto la temperatura como la velocidad del aire influyen directamente en la cinética de secado, cada uno de los vegetales muestra un comportamiento propio lo cual permite generar observaciones particulares respecto a la manera en como los niveles de las variables y las 5 distintas combinaciones seleccionadas afectan la cinética de secado.

Los resultados para cada vegetal serán analizados a continuación mostrando los factores clave y las interacciones encontradas, así como efectos particulares que ocurrieron durante el secado debido a las características propias de cada vegetal.

#### **5.1.1 Curvas de secado**

##### ***Curva de secado del Banano***

En la figura 5.1 se muestra la gráfica de las curvas de secado obtenidas experimentalmente para el banano, se muestran las 5 curvas generadas a partir de las combinaciones temperatura vs velocidad de aire de secado seleccionadas de acuerdo a la tabla 4.2.

La curva generada a partir de los niveles de las variables controladas temperatura 70°C y velocidad de aire 2 m/s muestra menor contenido de humedad con respecto al tiempo en comparación con las demás curvas, debido a eso podemos afirmar que para este caso particular los niveles más altos de las variables temperatura y velocidad de aire de secado permiten reducir el contenido de humedad en menor tiempo con respecto a los niveles intermedio y bajos y sus respectivas combinaciones.

Cabe resaltar que, el banano es la fruta que muestra mayor resistencia a la migración de la humedad hacia la corriente de aire caliente en comparación con las demás frutas, por sus características propias es la que requiere de mayores tiempos de operación (promedio) para alcanzar contenidos de humedad por debajo de 5%.

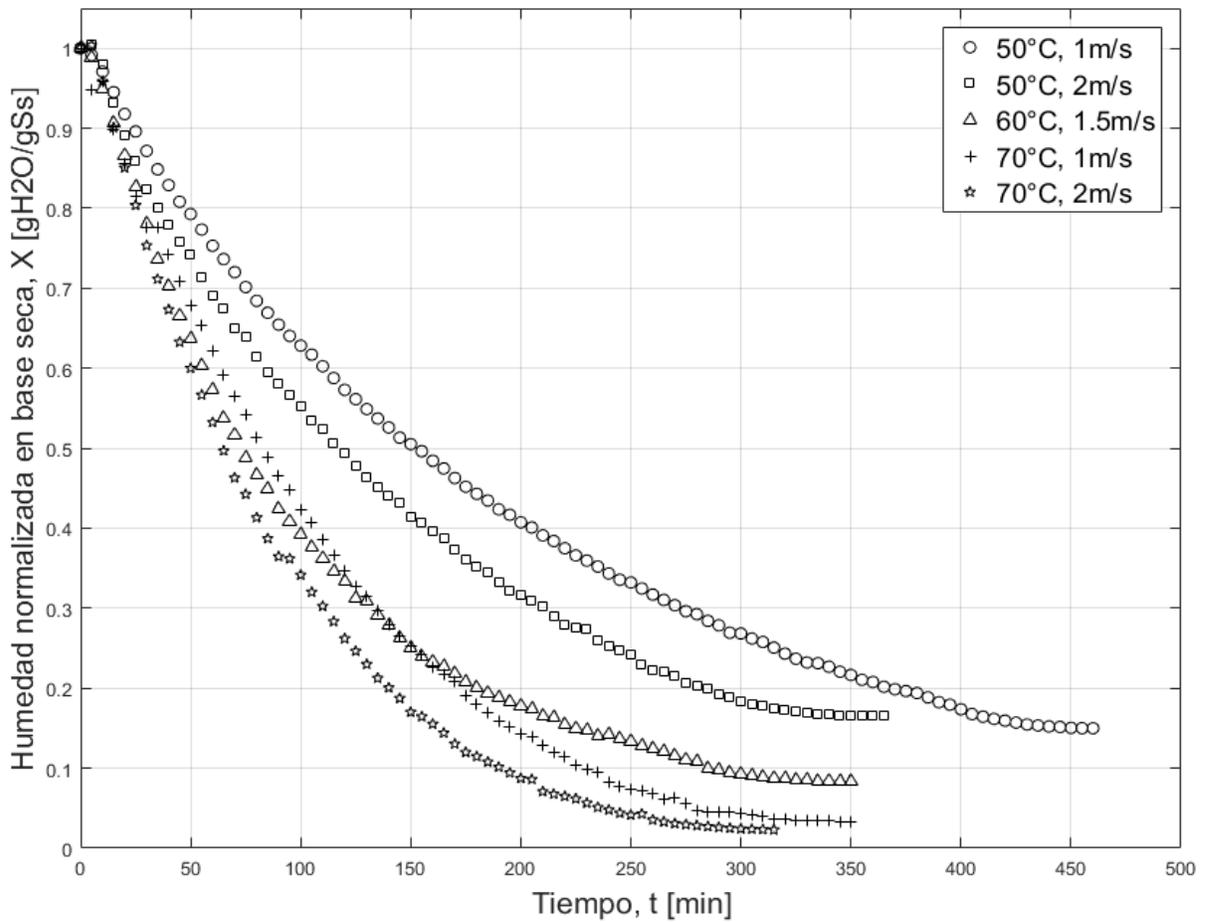


Figura 5.1 Curva de secado de banano

### Curva de secado del Noni

En la figura 5.2 se muestra las 5 curvas de secado obtenidas experimentalmente para el noni generadas a partir de las combinaciones temperatura vs velocidad de aire de secado seleccionadas de acuerdo a la tabla 4.2.

Las curvas generadas a partir de los niveles de las variables controladas temperatura 60°C/ velocidad de aire 1.5 m/s y temperatura 70°C/ velocidad de aire 2 m/s, muestran menor contenido de humedad con respecto al tiempo en comparación a las demás curvas.

Comparando las curvas previamente resaltadas, se puede observar que el contenido de humedad alcanzado es similar, por lo cual se puede afirmar que el efecto de la variable de flujo de aire es relevante debido a que niveles altos de esta variable permiten obtener resultados similares a los obtenidos a partir de niveles alto de temperatura.

Debido a lo antes expuesto se puede afirmar que la combinación de los niveles intermedios de las variables controladas temperatura y velocidad de flujo de aire ofrecen el mejor resultado.

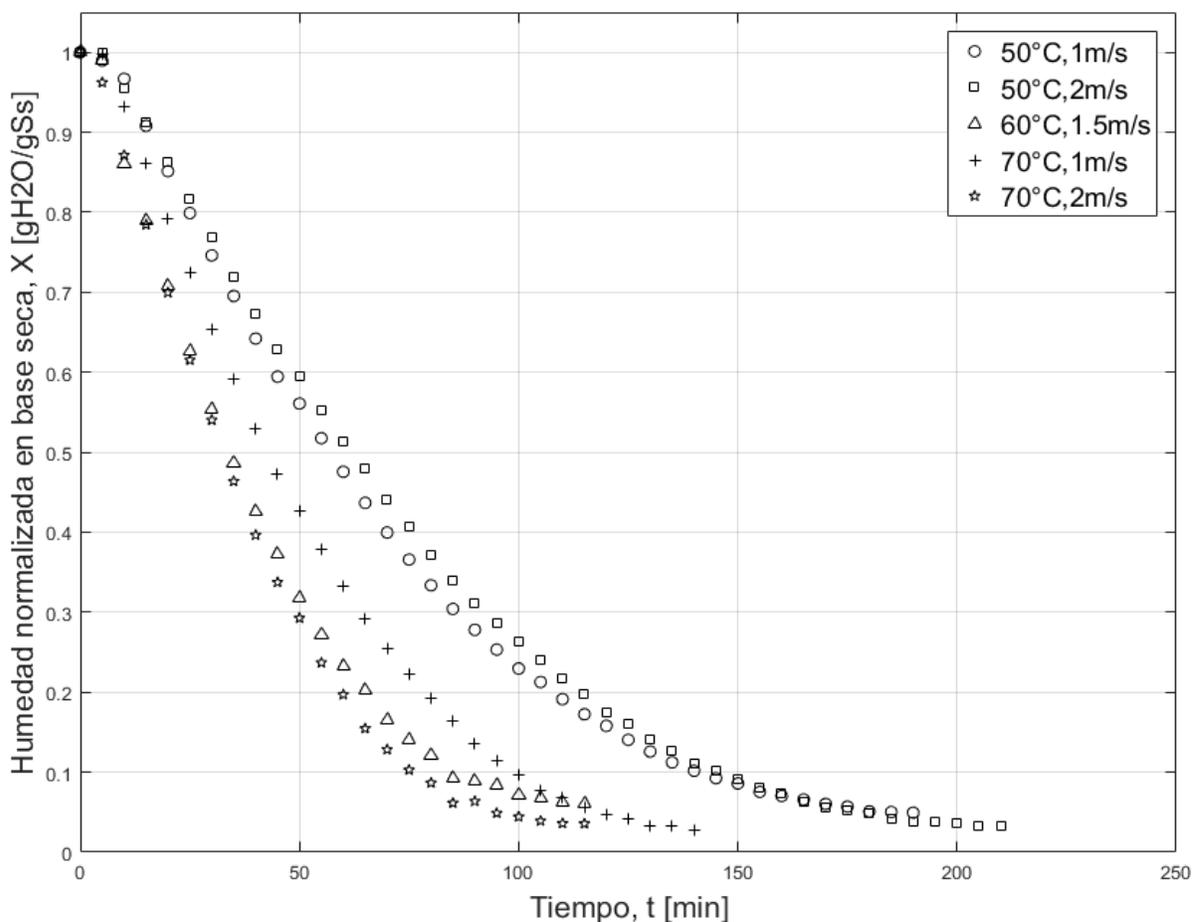


Figura 5.2 Curva de secado de noni

### Curvas de secado de la Papaya

En la figura 5.3 se muestra la gráfica de las curvas de secado obtenidas experimentalmente para la papaya, se muestran las 5 curvas generadas a partir de las combinaciones temperatura y velocidad de aire de secado seleccionadas de acuerdo a la tabla 4.2.

Las curvas generadas a partir de las combinaciones que involucran los niveles más altos de temperatura de secado son las que muestran menor contenido de humedad respecto al tiempo en comparación a las demás curvas generadas.

Se debe de resaltar que la curva generada a partir de los niveles temperatura 70°C y velocidad de aire 1 m/s muestran un menor contenido de humedad con respecto a la generada a partir de los niveles de temperatura 70°C/ velocidad de aire 2 m/s, por lo cual se puede afirmar que para este caso en particular el uso de una velocidad alta de flujo de aire causa un impacto negativo respecto a la migración del contenido de humedad de la muestra con el transcurso del tiempo, con niveles altos de velocidad de aire de secado los poros de la superficie expuesta de la muestra tienden a formar una película impermeable que ofrece resistencia a la migración de la humedad y cabe señalar que este comportamiento no se presenta en los niveles bajos de corriente de flujo de aire.

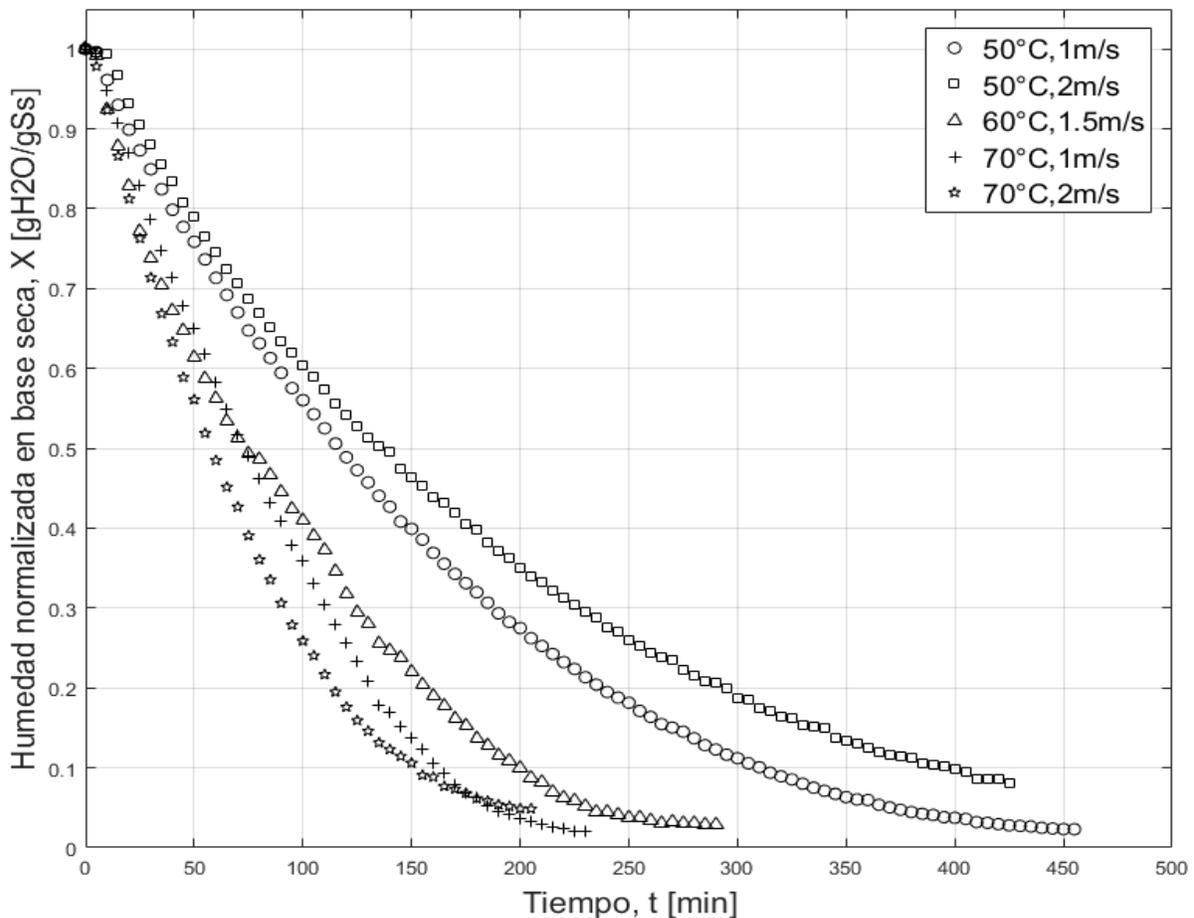


Figura 5.3 Curva de secado de papaya

### 5.1.2 Análisis de Varianza para la Cinética de Secado

A continuación, se presentan los resultados del análisis estadístico aplicado al diseño experimental para cada uno de los vegetales estudiados, en los cuales se evaluó el efecto de los factores temperatura y velocidad de aire de secado en los parámetros contenido de humedad y tiempo de secado (X, t), respectivamente.

Se realizó un ANOVA Multivariante (por las dos variables de respuesta: contenido de humedad y tiempo de secado) para cada vegetal, usando el software SPSS 18 con el modelo lineal general, el cual se utiliza para el diseño factorial presentado en la sección Metodología.

En todos los casos, se verificó previamente que los datos siguieran una distribución normal y que se cumpliera con la hipótesis de varianzas iguales mediante la prueba de Levene.

#### ANOVA del secado del Banano

Como resultado del ANOVA (ver tabla 10.2 en sección Anexo B), se deduce lo siguiente para el caso del banano:

Existe un modelo general que logra explicar el comportamiento de los datos, tanto para el contenido de humedad como para el tiempo de secado. Para el modelo corregido y la intersección,  $p \ll 0.05$ .

Al menos uno de los niveles del factor temperatura de secado afecta significativamente tanto el contenido de humedad final como el tiempo de secado.

La velocidad de aire no afecta el contenido de humedad, pero sí al menos uno de los niveles de velocidad influye significativamente en el Tiempo de Secado.

Por último, el ANOVA revela que no existe una interacción significativa entre los parámetros de temperatura y velocidad de aire de secado tanto en el contenido de humedad como el tiempo de secado.

En la tabla 5.1 se detalla un consolidado del resultado de las pruebas post hoc (ver tablas 10.3 y 10.4 en sección Anexo B) para el caso del banano, indicando las medias respectivas para cada tratamiento. Se denotó con una letra, a, b y c los grupos de tratamientos que diferían estadísticamente entre sí.

**Tabla 5.1** Consolidado de las Pruebas Post Hoc para el banano

Factor	Niveles	Tiempo de Secado <sup>†</sup> [min]	Contenido de Humedad <sup>†</sup> normalizada, base seca X/X <sub>0</sub> [-]
Temperatura de Secado (°C)	50	384.17 ± 6.85 a	0.15853 ± 0.00771 a
	60	341.67 ± 9.68 b	0.08563 ± 0.01091 b
	70	285.00 ± 6.85 c	0.03354 ± 0.00772 c
Velocidad del aire (m/s)	1	355.00 ± 6.85 a	0.10016 ± 0.00771 a
	1.5	341.67 ± 9.68 a	0.08563 ± 0.01091 a
	2	314.17 ± 6.85 b	0.09191 ± 0.00772 a

<sup>†</sup> Cada valor es la media ± límites del intervalo de confianza al 95%.

a,b,c denotan niveles significativamente distintos entre sí, con un valor  $p < 0.05$ .

Analizando la tabla 5.1 se puede observar que, si se desea un tiempo de secado rápido deben utilizarse como condiciones una temperatura de 70 °C y velocidad de aire de 2 m/s. El secado más lento se produce con 50°C y con velocidades de aire de 1 y 1.5 m/s.

Si se busca un contenido de humedad lo más baja posible para el banano, se recomienda utilizar una temperatura de 70°C sin importar el valor entre 1 a 2 m/s en la velocidad del aire, ya que este factor no afecta el contenido de humedad final.

### **ANOVA del secado de Noni**

Como resultado del ANOVA (ver tabla 10.5 en sección Anexo B) podemos deducir lo siguiente para el caso del noni:

Existe un modelo general que logra explicar el comportamiento de los datos, tanto para el contenido de humedad como para el tiempo de secado. Para el modelo corregido y la intersección,  $p \ll 0.05$ .

La temperatura y velocidad del aire de secado no afectan el contenido de humedad final entre los valores estudiados, pero si al menos uno de los niveles de cada factor afecta significativamente al tiempo de secado.

La tabla 5.2 es un resumen de los resultados del ANOVA y las pruebas post hoc (ver tablas 10.6 y 10.7 en sección Anexo B) para el noni, en el cual se concluye que el menor tiempo de secado se obtiene con temperaturas de 60 o 70°C y velocidades de aire de 1.5 m/s. El contenido de humedad final de no es apreciablemente afectado para ninguno de los valores de velocidad de aire y puesto que a 1.5 m/s el tiempo de secado se reduce, se recomienda usar este valor para el secado del noni.

**Tabla 5.2** Consolidado de las Pruebas Post Hoc para el noni

Factor	Niveles	Tiempo de Secado <sup>†</sup> [min]	Contenido de Humedad <sup>†</sup> normalizada, base seca $X/X_0$ [-]
Temperatura de Secado (°C)	50	191.67 ± 6.95 a	0.03563 ± 0.00304 a
	60	123.33 ± 9.83 b	0.05726 ± 0.00430 b
	70	128.33 ± 6.95 b	0.03328 ± 0.00304 a
Velocidad del aire (m/s)	1	172.50 ± 6.95 a	0.03418 ± 0.00304 a
	1.5	123.33 ± 9.83 b	0.05726 ± 0.00430 b
	2	147.50 ± 6.95 c	0.03473 ± 0.00304 a

<sup>†</sup> Cada valor es la media ± límites del intervalo de confianza al 95%.

<sup>a,b,c</sup> denotan niveles significativamente distintos entre sí, con un valor  $p < 0.05$ .

### ANOVA del secado de Papaya

Como resultado del ANOVA (ver tabla 10.8 en sección Anexo B) podemos deducir lo siguiente para el caso de la papaya:

Existe un modelo general que logra explicar el comportamiento de los datos, tanto para el contenido de humedad como para el tiempo de secado. Para el modelo corregido y la intersección,  $p \ll 0.05$ .

Al menos uno de los niveles de temperatura y de velocidad del aire de secado afecta significativamente tanto el contenido de humedad final como el tiempo de secado.

Existe una interacción significativa entre los parámetros de temperatura y velocidad de aire de secado respecto al contenido de humedad final, pero no en el tiempo de secado.

**Tabla 5.3** Consolidado de las Pruebas Post Hoc para la papaya

Factor	Niveles	Tiempo de Secado <sup>†</sup> [min]	Contenido de Humedad <sup>†</sup> normalizada, base seca $X/X_0$ [-]
Temperatura de Secado (°C)	50	434.17 ± 7.05 a	0.06116 ± 0.00238 a
	60	281.67 ± 9.96 b	0.03139 ± 0.00337 b
	70	216.67 ± 7.05 c	0.03246 ± 0.00238 b
Velocidad del aire (m/s)	1	340.00 ± 7.05 a	0.03204 ± 0.00238 a
	1.5	281.67 ± 9.96 b	0.03139 ± 0.00337 a
	2	310.83 ± 7.05 c	0.06158 ± 0.00238 b

<sup>†</sup> Cada valor es la media ± límites del intervalo de confianza al 95%.

<sup>a,b,c</sup> denotan niveles significativamente distintos entre sí, con un valor  $p < 0.05$ .

La tabla 5.3 es un resumen del análisis ANOVA y las pruebas post hoc (ver tablas 10.9 y 10.10 en sección Anexo B) revela que, para obtener los menores tiempos de secado para la papaya, se recomienda una temperatura de 70°C y una velocidad de aire intermedia de 1.5 m/s. Velocidades de aire de 2 m/s tienen un efecto desfavorable ya que prolongan el tiempo de secado debido a que los poros de la superficie expuesta se cierran interfiriendo en el proceso de migración de la humedad, lo cual se pudo observar en los experimentos.

Si se desea un contenido de humedad baja en el producto en menor tiempo, se recomiendan temperaturas de 60 o 70 °C con una velocidad de 1 a 1.5 m/s. La combinación de 70°C y 1 m/s dio el mejor resultado para tiempo y contenido de humedad final para la papaya.

## 5.2 Ajuste de Modelos de Secado de Capa Fina

Como se detalla en el acápite 3.5.3, los modelos semi-empíricos permiten describir el comportamiento de secado en una muestra de alimento, lo cual resulta como una herramienta útil para predecir y evaluar el comportamiento de un alimento respecto al procesos de secado.

Se llevó a cabo la evaluación de los modelos planteados en la tabla 3.1, con la finalidad de determinar cuál de ellos presenta el mejor ajuste a las curvas de secado respectivas de cada vegetal. Los resultados obtenidos por los modelos planteados en la tabla 3.1, no fueron satisfactorios con respecto a un ajuste y descripción de las curvas obtenidas experimentalmente. En la sección Anexo C, se muestra un análisis de los resultados obtenidos.

De acuerdo a planteamientos hechos por Kemp (2010), modelos con parámetro de ajuste exponencial en el tiempo no logran alcanzar una descripción adecuada en todo el proceso de secado, el mismo detalle que, para modelos como Page y otros derivados los cuales utilizan un parámetro de ajuste exponencial ( $n$ ) en el tiempo, es necesario considerar distintos valores de  $n$  para poder describir el proceso de secado en ambas etapas, considerando valores de  $n=0$  para la etapa de velocidad constante y valores de  $n>0$  para la etapa de velocidad decreciente, resultando poco práctico que en un mismo modelo el valor de ajuste exponencial adquiriera distintos valores.

Por lo expuesto anteriormente de acuerdo con Kemp (2010) y con base en los resultados arrojados por los modelos propuestos en la tabla 3.1, se decidió utilizar el modelo empleado por Alonso *et al.* (2014), dicho modelo también describe el comportamiento de secado en una capa delgada de una muestra de un alimento.

A continuación, se detalla el modelo de ajuste utilizado para describir las curvas de secado experimentales de cada uno de los vegetales:

$$rX = a * \exp(-k * t) + b * t + c \quad (5.1)$$

Los resultados obtenidos resultan satisfactorios con respecto a la descripción de la curva de secado experimental y la correlación que el modelo logra son aceptables.

Para los tres vegetales se generaron los valores de las constantes empíricas  $a$ ,  $b$  y  $c$ , y el valor de transferencia de masa  $k$  para cada una de las condiciones de operación planteadas.

Es importante aclarar que los valores de  $k$  corresponden estrictamente a las combinaciones planteadas de temperatura y velocidad lineal de aire para cada experimento, en el modelo usado,  $k$  conlleva aporte por parte de ambas variables.

La razón por la cual  $k$  presenta un valor propio de cada una de las condiciones planteadas de acuerdo con las tablas 4.1 y 4.2, es debido a que el factor  $k$  es quien involucra la difusividad, esto de acuerdo con el planteamiento de la ecuación (3.15), y la difusividad actúa de acuerdo a las condiciones de operación del secado de la muestra.

A continuación, en la tabla 5.4 se muestran los valores de constantes empíricas  $a$ ,  $b$  y  $c$  respectivas de cada vegetal:

**Tabla 5.4** Valores de variables de modelo de ajuste

Constantes empíricas	Banano	Noni	Papaya
<b>a</b>	1.076	1.094	1.178
<b>b</b>	0.0002486	-2.046*10 <sup>6</sup>	0.0003549
<b>c</b>	-0.05391	-0.01045	-0.1475

En la tabla 5.5, se detallan los valores de  $k$  respectivos de cada curva de secado experimental y el índice de correlación del banano.

**Tabla 5.5** Valores de  $k$  y  $R^2$  para caso de banano

T (°C)	V (m/s)	k	R <sup>2</sup>
<b>50</b>	<b>1</b>	0.004959	0.9974
<b>50</b>	<b>2</b>	0.006153	0.9987
<b>60</b>	<b>1.5</b>	0.009121	0.9984
<b>70</b>	<b>1</b>	0.009323	0.9866
<b>70</b>	<b>2</b>	0.01128	0.9918

En la figura 5.4, se muestra la comparación de cada una de las curvas de secado experimentales con respecto al ajuste empleado. Se puede observar que el ajuste se apega a la trayectoria de las curvas experimentales y a como se detalló en la tabla 5.5 el índice de correlación es alto por lo cual los resultados obtenidos son satisfactorios.

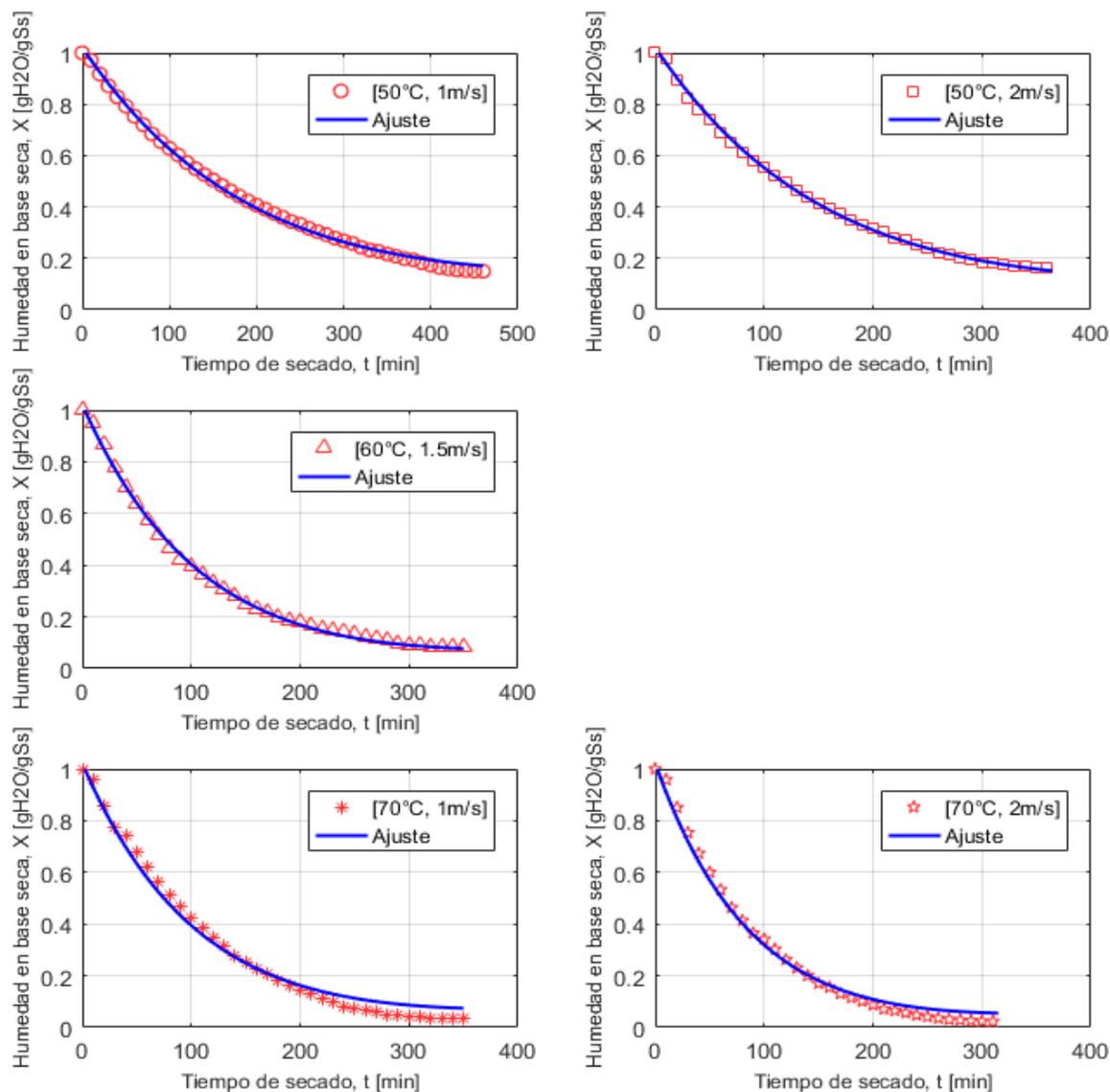


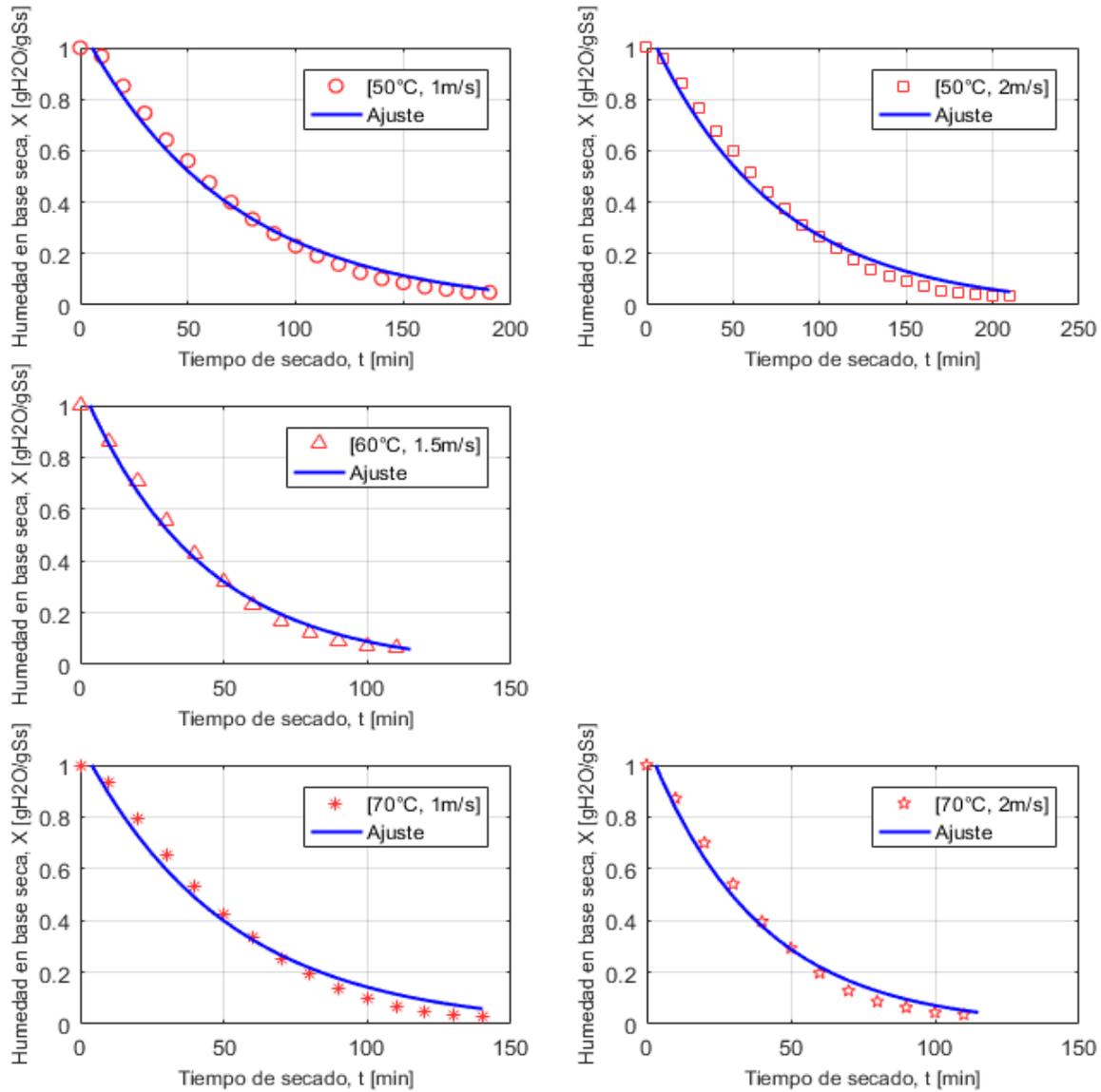
Figura 5.4 Curvas de secado de secado experimental y ajuste del banano

A continuación, en la tabla 5.6, se muestran los valores de  $k$  respectivos de cada curva de secado experimental y el índice de correlación para el caso del noni.

Tabla 5.6 Valores de  $k$  y  $R^2$  para caso de noni

T (°C)	V (m/s)	k	R <sup>2</sup>
50	1	0.0144	0.9899
50	2	0.01363	0.9866
60	1.5	0.02398	0.9909
70	1	0.01967	0.9821
70	2	0.02591	0.9855

En la figura 5.5, se muestran las cinco curvas de secado experimentales del noni comparadas con el ajuste empleado, al igual que el caso anterior el comportamiento del ajuste respecto a la trayectoria de la curva experimental y a como se muestra en la tabla 5.6 el índice de correlación alto, los resultados son satisfactorios.



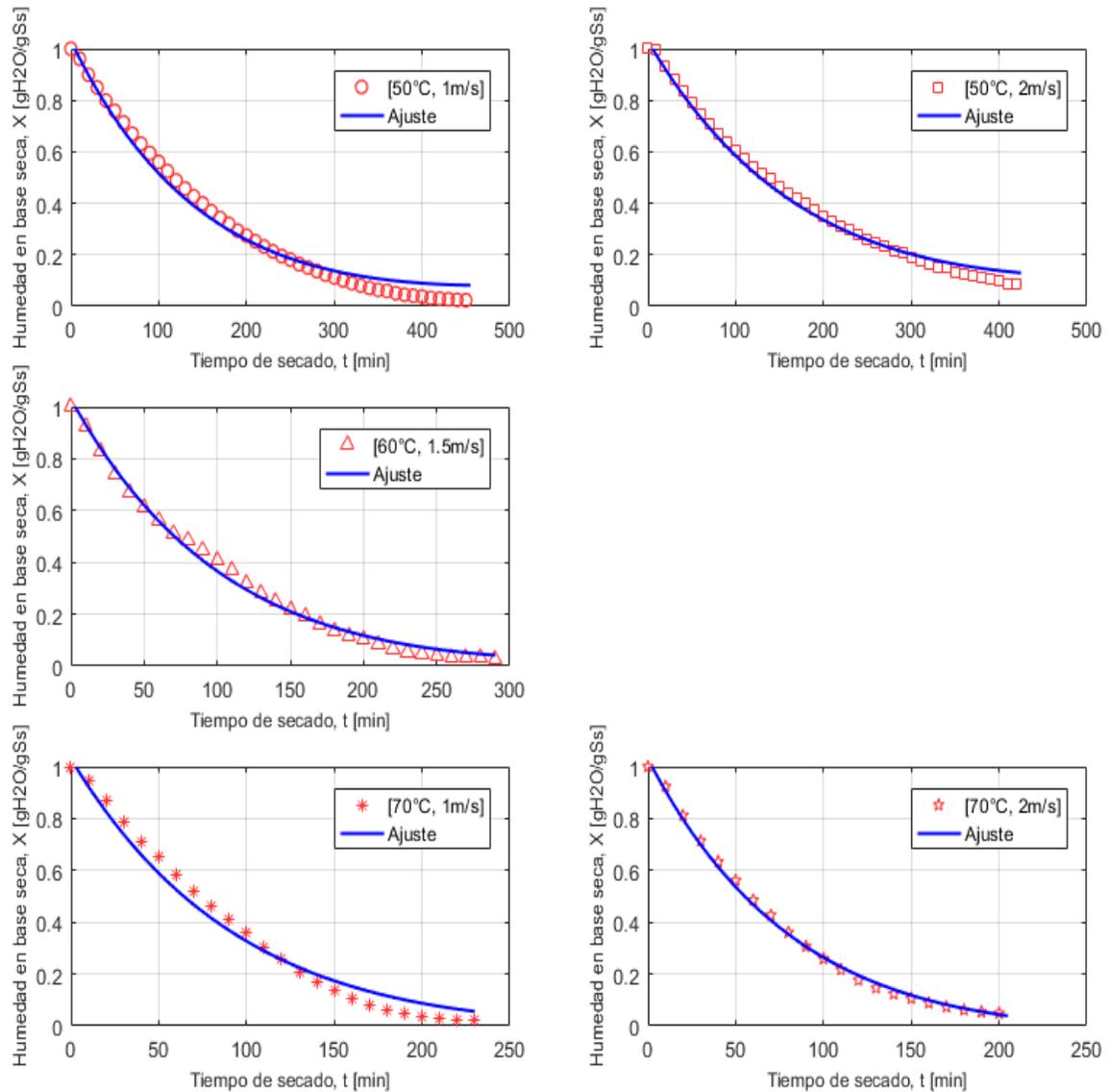
**Figura 5.5** Curvas de secado experimental y ajuste del noni

En la tabla 5.7, se muestran los valores de  $k$  respectivos de cada curva de secado experimental y el índice de correlación para el caso de la papaya.

**Tabla 5.7** Valores de  $k$  y  $R^2$  para caso de papaya

T (°C)	V (m/s)	k	R <sup>2</sup>
50	1	0.006292	0.9848
50	2	0.005256	0.9928
60	1.5	0.009013	0.9937
70	1	0.009874	0.9809
70	2	0.01142	0.9975

En la figura 5.6, se muestran las cinco curvas de secado experimental de la papaya comparadas con el ajuste empleado, al igual que los casos anteriores el comportamiento del ajuste respecto a la trayectoria de la curva experimental es bueno, por lo cual los resultados son satisfactorios.



**Figura 5.6** Curvas de secado experimental y ajuste de la papaya

### 5.3 Velocidad de Secado en Función de Humedad Libre

El cálculo experimental de la velocidad de secado  $N_V$ , se efectuó mediante el uso de la **ecuación 3.5**, posteriormente se elaboró la curva de velocidad de secado mediante la gráfica de  $N_V$  con respecto a los valores de humedad en base seca.

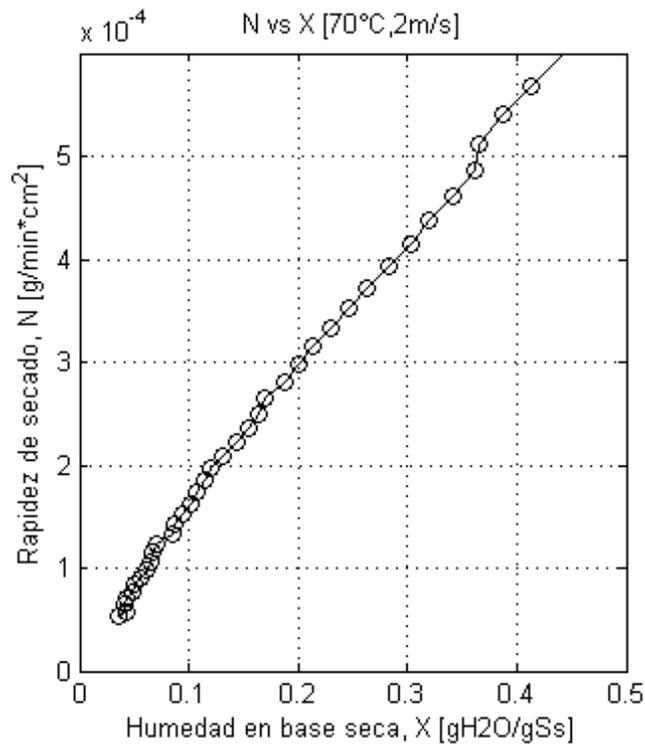
A continuación, se muestran las curvas de velocidad de secado respectivas de cada vegetal correspondientes a las curvas de secado que dan mejor resultado según se discute en acápite 5.1.

En la sección Anexo D, se muestran las curvas de velocidad de secado correspondiente a cada curva de secado para cada uno de los vegetales.

#### 5.3.1 Curvas de velocidad de secado

##### *Curva de velocidad de secado del banano*

La curva de velocidad de secado correspondiente a los datos experimentales obtenidos a partir de los niveles de las variables controladas temperatura  $70^{\circ}\text{C}$  y velocidad de aire  $2\text{ m/s}$  se muestra a continuación en la figura 5.7.



**Figura 5.7** Curva de velocidad de secado de banano

Se puede observar para este caso particular que la curva generada no cuenta con una etapa de velocidad constante, esto indica que el banano no posee en su suficiente la cantidad de humedad necesaria para la formación de la película de humedad de donde se deriva la etapa de velocidad constante.

El mecanismo de secado denota que la transferencia de humedad se lleva a cabo de manera directa a través de los poros hacia la corriente de aire, este es el motivo por el cual la curva de velocidad de secado empieza en la etapa de velocidad decreciente.

A medida el tiempo transcurre la humedad debe migrar desde los poros que se encuentran más alejados de la superficie hacia la corriente de aire de manera lenta, además la velocidad con la cual se lleva a cabo la migración de la humedad se ve reducida por efecto del encogimiento de la red interna de los capilares. Lo antes explicado es fácilmente apreciable en la figura 5.7 en donde se presenta una aglomeración de varios puntos al final de la curva mostrando una lenta variación de humedad, destacando claramente que este comportamiento es propio del banano.

### Curva de velocidad de secado del noni

La curva de velocidad de secado correspondiente a los datos experimentales obtenidos a partir de los niveles de las variables controladas temperatura 60 °C y velocidad de aire 1.5 m/s se muestra a continuación en la figura 5.8.

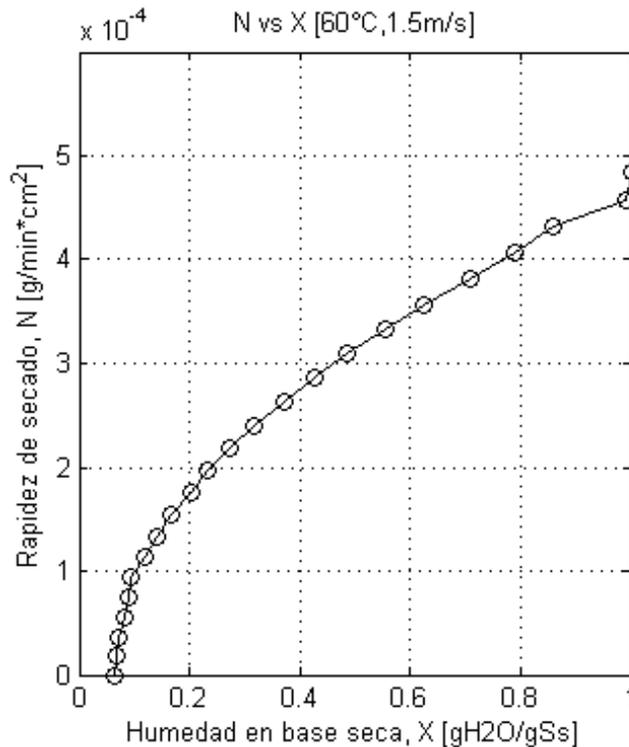


Figura 5.8 Curva de velocidad de secado de noni

Se puede observar al igual que en el caso anterior no existe una etapa de velocidad constante, la curva de velocidad de secado del noni empieza en etapa de velocidad decreciente y esto es producto de la carencia de una película de humedad presente en la superficie de la muestra.

Para este caso en particular, el mecanismo de secado se da la transferencia de humedad de manera casi directa de los poros hacia a la corriente de aire, esto es debido a que la humedad que viaja a través de los poros forma en la superficie de la muestra pequeños puntos húmedos, pero al igual que el caso anterior a medida el tiempo transcurre la red de poros interna se encoge y causa un decremento en la velocidad con la cual la humedad migra.

La naturaleza del noni respecto a su contenido característico de humedad y tipo de estructura permite este comportamiento antes descrito, es por esta razón que la curva no presenta una trayectoria tan pronunciada como el caso del banano.

### Curva de velocidad de secado de la papaya

La curva de velocidad de secado correspondiente a los datos experimentales obtenidos a partir de los niveles de las variables controladas temperatura 60 °C y velocidad de aire 1.5 m/s se muestra en la figura 5.9.

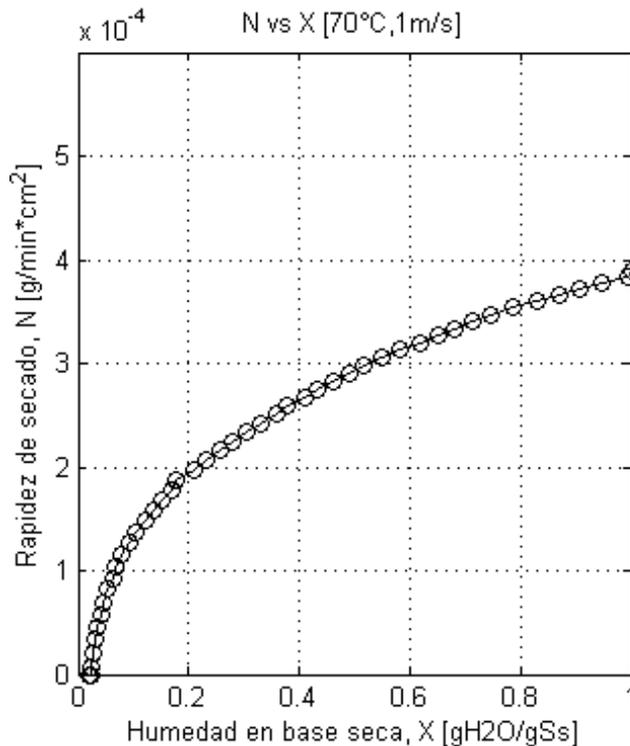


Figura 5.9 Curva de velocidad de secado de papaya

Al igual que los casos anteriores carece de una etapa de velocidad de secado constante, pero es la curva que presenta la etapa decreciente menos pronunciada debido a la presencia de una película de humedad muy delgada.

Esta capa delgada presente al inicio del proceso sobre la superficie de la muestra posteriormente se convierte en puntos húmedos, esta característica propia es suficiente para que en el mecanismo de secado la transferencia de humedad no se lleve a cabo de manera directa desde los poros de la muestra hacia la corriente de flujo de aire.

Al igual que en los casos anteriores la velocidad decrece producto del encogimiento de los capilares internos retrasando la velocidad de migración de la humedad

## **5.4 Curva Característica de Secado**

Para el desarrollo de la curva característica de secado de cada vegetal se tomaron en cuenta las curvas de velocidad de secado generadas a partir de todas las combinaciones planteadas de acuerdo al acápite 4.2.2, las curvas de velocidad de secado se pueden observar en la sección Anexos.

De acuerdo con el estudio realizado por Lozano (2009) y Lozano. *et al.* (2006.), la curva característica de secado es independiente no sólo de la temperatura, sino que también de la velocidad lineal del aire (gas de transferencia de calor y masa por convección). Por lo tanto, en este estudio, se combinan todas las curvas de velocidad de secado generadas para cada vegetal, combinando los diferentes niveles de las variables temperatura y velocidad lineal del aire, de acuerdo al diseño experimental planteado.

A continuación, se detallan las curvas características de secado respectiva de cada vegetal, así como la función de ajuste correspondiente.

### ***Curva característica de secado del banano***

En general las curvas de secado presentan un comportamiento estable con respecto al tiempo, no se cuenta con incidentes que alteren el comportamiento y trayectoria de la curva a como se pueden observar en la figura 10.1 en la sección Anexo D.

En la figura 5.10, se muestra la curva característica de secado del banano, el comportamiento que presenta es debido al tipo de estructura que posee, la porosidad característica de la fruta influye en el mecanismo de la migración de la humedad hacia el medio circundante.

A como se ha explicado anteriormente la migración se da de manera directa de los poros hacia la corriente de aire, esto explica el inicio de la curva en etapa de velocidad decreciente y en comparación con las curvas de noni y papaya es la curva más pronunciada.

La función de ajuste corresponden a un polinomio de 7<sup>mo</sup> orden, el cual se muestra a continuación con:

$$f(\phi) = 32.7*\phi^7 - 113.4*\phi^6 + 156*\phi^5 - 108.8*\phi^4 + 40.63*\phi^3 - 7.646*\phi^2 + 1.461*\phi + 0.01216$$

El polinomio tiene un índice de correlación ( $R^2$ ) de 0.9564, esto significa una relación positiva.

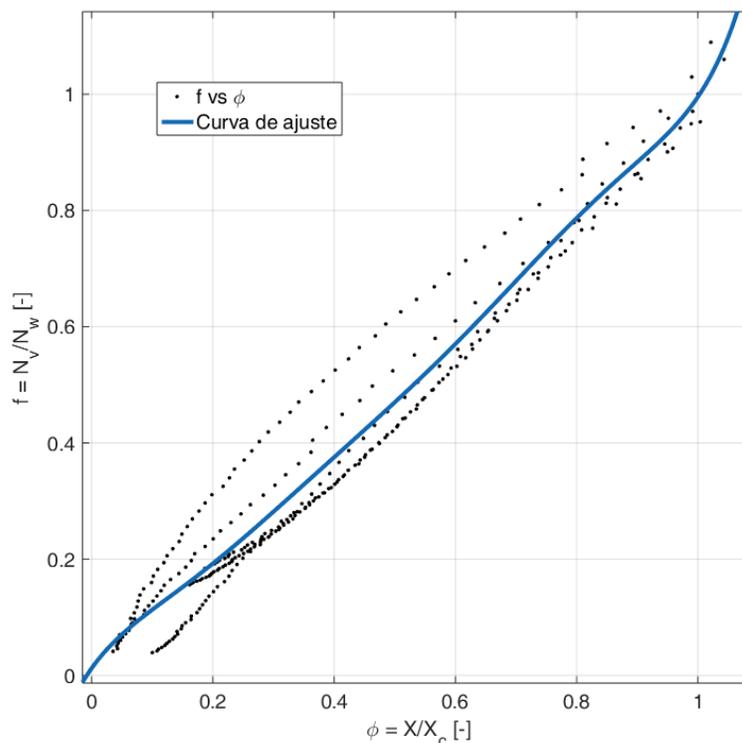


Figura 5.10 Curva característica de secado del banano

### Curva característica de secado del noni

Las curvas de secado de noni al igual que el caso anterior muestran un comportamiento estable con respecto al tiempo, no se cuenta con incidentes que alteren el comportamiento y la trayectoria de las curvas, entre ellas se presentan diferencias cuantitativas que se pueden observar en la figura 10.2 en Anexo D.

En la figura 5.11, se muestra la curva característica de secado del noni, presenta un comportamiento satisfactoriamente consistente. La curva característica inicia en etapa de velocidad decreciente, a como se ha explicado anteriormente esto es debido al mecanismo de migración de la humedad de la muestra hacia la corriente de aire.

Esta curva es menos pronunciada que la curva característica del banano, lo cual evidencia velocidades más altas de secado.

La función de ajuste corresponden a un polinomio de 7<sup>mo</sup> orden al igual que en el caso anterior, el cual se muestra a continuación con:

$$f(\phi) = 26.42*\phi^7 - 109.8*\phi^6 + 189.8*\phi^5 - 176.2*\phi^4 + 95.02*\phi^3 - 30.29*\phi^2 + 6.279*\phi - 0.1969$$

El polinomio de ajuste tiene un índice de correlación ( $R^2$ ) de 0.9912, lo cual muestra una correlacion positiva casi perfecta.

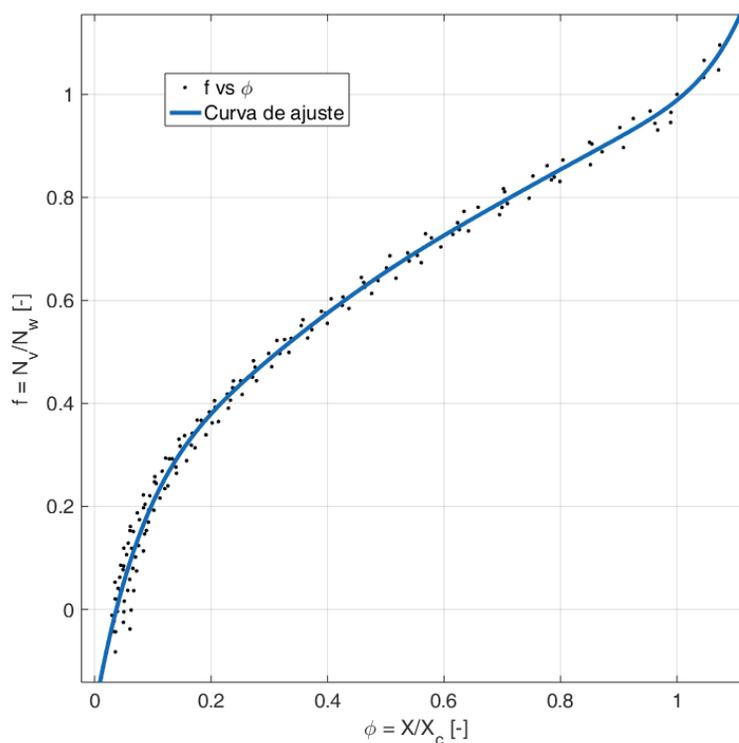


Figura 5.11 Curva característica de secado de noni

### Curva característica de secado de la papaya

Las curvas de secado de la papaya presentan un comportamiento consistente en general, con claras diferencias cuantitativas y cualitativas, estas se pueden observar en la figura 10.3 de Anexo D.

En la figura 5.12, se muestra la curva característica de secado, el comportamiento descrito depende de la naturaleza propia de la fruta, en el cual a como se ha detallado se presenta un efecto adverso a medida que las velocidades de aire pasan a través de la muestra, causando un efecto en el cual los poros o capilares se cierran y esto interrumpe la difusión de la humedad desde el interior de la muestra hacia el medio circundante.

La función de ajuste corresponde a un polinomio de 7<sup>mo</sup> orden al igual que en los casos anterior, el cual se muestra a continuación con:

$$f(\phi) = 15.84*\phi^7 - 55.85*\phi^6 + 82.5*\phi^5 - 67.31*\phi^4 + 33.14*\phi^3 - 9.91*\phi^2 + 2.614*\phi - 0.01567$$

Para este caso el polinomio de ajuste tiene un índice de correlación ( $R^2$ ) de 0.9887, mostrando una correlacion altamente positiva.

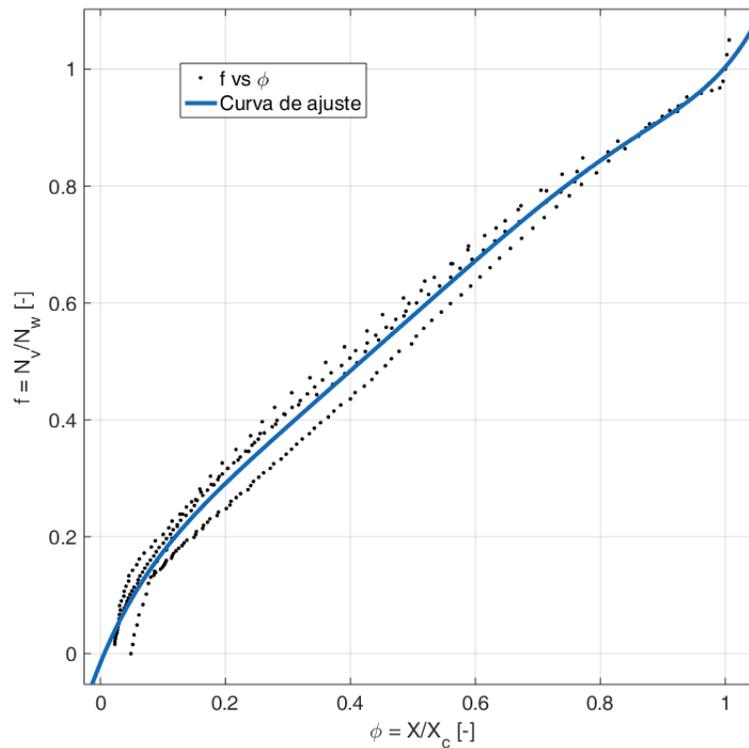


Figura 5.12 Curva característica de secado de la papaya

## VI Conclusiones

Se ha llevado a cabo un estudio experimental y teórico de la cinética de secado de tres vegetales: Banano (*Musa acuminata*), Noni (*Morinda citrifolia*) y Papaya (*Carica papaya*), en el cual se logró comprender varios aspectos importantes respecto al proceso de secado de vegetales, particularmente respecto al impacto que producen las variables temperatura y velocidades de flujo de aire de secado.

Las curvas de secado de cada fruta muestran un comportamiento estable con respecto al tiempo, no se cuenta con incidentes que alteren el comportamiento y la trayectoria de la curva.

En el caso particular del banano la cinética de secado se encuentra favorecida por los valores de temperatura 70 °C y velocidad de aire 2 m/s, estos niveles ofrecen los mejores resultados debido que permiten alcanzar contenidos de humedad más bajo y en menor tiempo en comparación a las demás condiciones planteadas.

Para el caso del noni, la cinética de secado se ve favorecida por los valores de temperatura 60 °C y velocidad de aire 1.5 m/s, estos niveles ofrecen los mejores resultados para alcanzar contenidos de humedad bajos y en un tiempo comparable con los niveles más altos planteados.

Referente a la papaya, la cinética de secado se encuentra favorecida por niveles altos de temperatura y valores bajos de velocidad de aire; en este caso particular los niveles más altos de velocidad de flujo de aire producen un efecto en el cual los capilares forman una capa impermeable en la superficie interrumpiendo el proceso de migración de la humedad hacia la corriente de aire, por lo cual los valores de temperatura 70 °C y velocidad de aire 1 m/s ofrecen los mejores resultados para alcanzar los contenidos de humedad más bajos y en menor tiempo con respecto a las demás condiciones planteadas.

Los modelos de ajuste de capa fina predeterminados no lograban brindar una descripción de cada una de las curvas obtenidas experimentalmente, por lo cual se empleó una modificación propuesta por Alonso *et al.* (2014), con lo cual se determinaron las constantes empíricas del modelo correspondientes a cada vegetal. Sin embargo, para determinar las curvas de secado teóricamente, el estudio del ajuste de este modelo debe extenderse para determinar la dependencia del factor  $k$  con las variables temperatura y velocidad lineal del aire.

Ninguno de los tres vegetales presenta una etapa de velocidad constante en sus curvas de velocidad de secado respectivas, en todos los casos empiezan por la etapa de velocidad decreciente, esto es debido a la manera en la cual se da la migración de la humedad presente en la muestra. El mecanismo de secado ocurre de los poros hacia la corriente de aire, sin formación de una película con un contenido de humedad suficientemente abundante en la superficie que propicie una etapa de velocidad constante.

El encogimiento de la red capilar interna del sólido ofrece resistencia a la migración del líquido desde las cavidades porosas a la superficie. Esto genera, por lo tanto, un decrecimiento de la velocidad de secado. En el caso particular de la papaya, ocurre la formación de una capa en la superficie del fruto, la cual causa un efecto impermeabilizante que también contribuye al decrecimiento de la velocidad de secado.

Las curvas características de cada vegetal presentan una función de ajuste satisfactoria ( $R^2 > 0.95$ ) que corresponden a un polinomio de 7<sup>mo</sup> orden para cada vegetal respectivamente.

## **VII Recomendaciones**

De los resultados obtenidos a partir del presente estudio, análisis y conclusiones de los mismos, se generan las siguientes recomendaciones válidas para la aplicación en procesos productivos e investigaciones de los procesos de secados de estos vegetales.

Para el caso del banano, se recomienda el uso de temperaturas de 70 °C y velocidades de aire a 2 m/s en el secado, tal como se demostró en el presente estudio, estas condiciones permiten alcanzar bajos contenidos de humedad en menor tiempo respecto a condiciones que emplean temperaturas y velocidades de aire más bajas.

En el caso particular del noni, se recomienda el uso de temperaturas de 60 °C en el secado y velocidades de aire de 1.5 m/s, estos parámetros de operación permiten alcanzar resultados muy parecidos a los obtenidos por los niveles más altos de temperatura y velocidad de flujo de aire, lo cual resulta muy atractivo debido a que en procesos que emplean altos niveles de temperatura los productos se deterioran más, además, el proceso de producción encarece.

Respecto al caso de la papaya, se recomienda no usar altas velocidades de flujo de aire en los procesos de secado convectivo debido al efecto que se produjo en el uso de velocidad de flujo a 2 m/s.

Para el caso de los tres vegetales, se recomienda el uso del modelo semi-empírico de la curva de secado, propuesta por Alonso *et al.* (2014), que presenta el mejor ajuste con los datos experimentales para evaluar el comportamiento del secado de dichos vegetales reduciendo drásticamente el trabajo experimental. Aunque para ello, se deba determinar la dependencia del factor  $k$  de la ecuación con respecto a la combinación de las variables temperatura y velocidad lineal del aire.

Se recomienda el uso de las curvas características desarrolladas a partir de las variaciones de temperatura y velocidad de aire, ya que muestran consistencia y confiabilidad. Las curvas características se recomiendan para la realización de cálculos de balance de masa y energía como también para cálculos de diseño, dimensionamiento de equipos de secado destinados a etapas de producción.

## VIII Nomenclatura

### Letras latinas

$A$	Área	(m <sup>2</sup> )
$C$	Concentración	(kmol m <sup>-3</sup> )
$D$	Difusión	(m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
$h$	Coefficiente de transferencia de calor	(W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> )
$k_y$	Coefficiente de transferencia de masa de la fase gaseosa	---
$L$	Grosor	(m <sup>2</sup> )
$N$	Velocidad de secado	(kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )
$T$	Temperatura	(°C)
$t$	Tiempo	(s)
$W$	Peso de solido húmedo	(kg)
$W_s$	Peso de solido seco	(kg)
$V$	Velocidad de aire	(kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )
$X$	Contenido de humedad	(kg kg <sup>-1</sup> )
$Y$	Humedad de corriente de gas/aire	(kg kg <sup>-1</sup> )
$Y_s$	Humedad de capa líquida en superficie del material	(kg kg <sup>-1</sup> )
$z$	Coordenada de longitud	(m)
$f$	Velocidad relativa de secado	---

### Letras Griegas

$\phi$	Contenido característico de humedad	---
$\rho$	Densidad	(kg m <sup>-3</sup> )
$\pi$	Constante pi	---

## **Subíndices**

cr	Crítico
eq	Equilibrio
o	Inicial
s	Sólido seco
v	Unidad de superficie
w	Periodo constante

## **Números adimensionales**

Sc	Número de Schmidt
Pr	Número de Prandlt

## IX Bibliografía

- Alonso, J., García-Jarquín, K., González-Lindo, K., *et al.* (2014). Producción de harina de papa para puré instantáneo. *Nexo Revista Científica*, vol. 22(2) pp. 99-114.
- Alzate, C. E. O. (2003). *Procesamiento de alimentos*, Universidad Nacional de Colombia
- Arana, P. y Quijano, M. (2012). “Extracción, Caracterización y Comparación de Látex Obtenido, en Secado por Aspersión, de tres Variedades de Papaya (Carica papaya L.)”. TESIS DE GRADO (Investigación), ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL, GUAYAQUIL – ECUADOR, pp. 199
- Casallas, L. (2011). Evaluación del análisis fisicoquímico del banano común (*Musa sapientum* L) transformado por acción de la levadura *Candida guilliermondii*. (Investigación), Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, D.C., pp. 34
- Crank, J. (1975). *The mathematics of diffusion*, Oxford Science Publications
- Chen, X. D. y Mujumdar, A. S. (2009). *Drying Technologies in Food Processing*, Wiley
- Chirife, J. (1983). *Fundamentals of the Drying Mechanism during Air Dehydration of Foods*. In: Mujumdar, A. S. (ed.) *Advances in Drying*.
- Elnuevodiario (2014). Rivenses producen 15 millones de papaya. *El Nuevo Diario*.
- Fuentes, E. E. P., Meléndez, R. J. P. y Dolmos, R. P. (2006). Elaboración de banano deshidratado en forma de pasa, con el uso de un Secador Eléctrico modelo ST3, utilizando como materia prima bananos de la variedad Pisang Ceylan (AAB). Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Leon, Nicaragua, pp. 6
- Gamero., R. (1993). Evaluación experimental de algunos parámetros que influyen en el proceso de secado de granos por contacto en un medio particulado caliente. Universidad Nacional de Ingeniería, Managua, Nicaragua, pp.
- Geankoplis, C. J. (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias*, Compañía Editorial Continental
- Gutiérrez, J. B. (2000). *Ciencia bromatológica: principios generales de los alimentos*, Díaz de Santos
- James Welty, C. W., Robert Wilson, Gregory Rorrer (2007). *Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer*,
- Jarquín., A. (1996). Determinación de las curvas características de secado de algunas especies de árboles maderables de Nicaragua. (Investigación), Universidad Nacional de Ingeniería, Managua, Nicaragua, pp.
- Kemp, I. C. (2010). Drying Myths and Misinterpretation. En: Evangelos Tsotsas, T. M., Mirko Peglow., ed. *International Drying Symposium*, October 2010 Otto-von-Guericke University, Magdeburg, Germany., 109 - 116.
- Kudra., T. y Strumillo., C. (1998). *Thermal processing of bio-materials*,

- L. Hassini, S. A., A. Belghith (2004). Estimation of the moisture diffusion coefficient of potato during hot-air drying. *En: International Drying Symposium, August 2004 Sao Paulo, Brazil.* 1488-1495.
- Lozano, E. (2009). Estudio teorico y experimental de la cinetica del secado del ácido acetilsalicílico. (Investigación), Universidad Nacional de Ingeniería, pp.
- Lozano., L. M. E., Martínez., J. y Gamero., R. (2006). Mass Transfer during the Isothermal Drying of Acetylsalicylic Acid. *En, 2006.*
- Montes, E., Gallo, R., Andrade, R., *et al.* (2008). Modelado de la cinética de secado de ñame (dioscorea rotundata) en capa delgada *SciELO*, vol. 28(2).
- Montgomery, D. C. (2004). *Diseño y Analisis de Experimentos*, México
- Moyers., C. G. y Baldwin., G. W. (1997). *Psychrometry, Evaporative Cooling, and Solids Drying. In: Perry, R. H. (ed.) Perry's Chemical Engineers's Handbook. 7th ed.*
- Mujumdar, A. S. (2007). *Principles, Classification, and Selection of Dryers. In: Mujumdar, A. S. (ed.) Handbook of Industrila Drying. 3rd ed.: Taylor and Francis.*
- Pletney, V. N. (2007). *Focus on food engineering research and developments*, Nova Science Publishers, Inc. New York
- Reyes, J. D. S. (2007). Diagnóstico del Estado de Aplicación y Manual de Recomendaciones Buenas Prácticas Agrícolas en cinco Unidades de Producción de Papaya (Carga papaya L.) del Departamento de Rivas, Nicaragua Diplomado, Universidad Nacional Agraria, Managua, Nicaragua, pp.
- Rivas, J. (1999). Diseño y estimacion de costo de un secador hibrido para jengibre. (Investigacion), Universidad nacional de Ingeniería, Managua, Nicaragua, pp.
- Rivera, V. M. R. (2008). *Bases de la Alimentación Humana*, Netbiblo
- Sánchez., L. (1993). Determinacion de curvas caracteristicas de secado de algunos vegetales de importancia comercial. Universidad Nacional de Ingeniería, pp.
- Sharma, S. K., Mulvaney, S. J. y Rizvi, S. S. H. (2003). *Ingeniería de los alimentos: operaciones unitarias y prácticas de laboratorio*, Editorial Limusa S.A. De C.V.
- Sokhansanj., S. y Jayas., D. (2007). *Drying of Foodstuffs. In: Mujumdar, A. S. (ed.) Handbook of Industrial Drying. Taylor and Francis.*
- Strumillo, C. y Kudra., T. (1986). *Drying: Principles, Applications, and Design*, Gordon and Breach Science Publishers
- Treybal, R. E. (1999). *Operaciones de Transferencia de Masa*, McGraw-Hill
- Ulloa, J., Rosas, P., Ramírez, J., *et al.* (2012). El noni: propiedades, usos y aplicaciones potenciales. *Revista Fuente* vol. 4(10) pp. 44-49.

## **X Anexos**

## 10.1 Anexo A

Entre las aplicaciones del diseño experimental en ingeniería se encuentran:

- Evaluaciones y comparaciones de diseños.
- Evaluaciones de materiales alternativos.
- Reducciones de tiempo de desarrollo.
- Determinación de parámetros claves de diseño de producto que afectan el desempeño del mismo.

Existen varios tipos de diseños experimentales, y la selección del diseño a implementar debe de ser acorde a los objetivos del experimento. En la tabla 10.1, se muestran los diversos tipos de diseños experimentales.

**Tabla 10.1** Tipos de diseños experimentales (Montgomery, 2004)

Objetivo		Tipo de Diseño
<b>Comparar dos o tres tratamientos</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño completamente al azar</li> <li>• Diseño de bloques completos al azar.</li> <li>• Diseño cuadros Latinos y grecolatinos</li> </ul>
<b>Estudio del efecto de varios factores sobre una o más variables de respuesta</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño factorial <math>2^k</math></li> <li>• Diseño factorial <math>3^k</math></li> <li>• Diseño factorial fraccionado <math>2^k</math> y <math>2^{k-p}</math></li> </ul>
<b>Optimización de Proceso</b>	Modelo de primer orden	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño factorial <math>2^k</math> y <math>2^{k-p}</math></li> <li>• Diseño de Plakett- Burman</li> <li>• Diseño simplex</li> </ul>
	Modelo de segundo orden	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño de central compuesto</li> <li>• Diseño de Box-Behnken</li> <li>• Diseño factorial fraccionado <math>3^k</math> y <math>3^{k-p}</math></li> </ul>
<b>Diseños Robustos</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arreglos ortogonales (Diseños fraccionales)</li> <li>• Diseños con arreglos internos y externos</li> </ul>
<b>Diseños de Mezclas</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diseño Lattice-Simplex</li> <li>• Diseño simplex con centroide</li> <li>• Diseño con restricciones</li> <li>• Diseño axial</li> </ul>

## **10.2 Anexo B**

### **Datos estadísticos**

A continuación, se muestran los resultados del análisis de varianza considerando el efecto de cada uno de los factores: temperatura y velocidad del aire de secado en las variables de respuesta tiempo de secado y contenido de humedad.

La columna más importante, es el estadístico  $p$  para cada elemento del modelo, el cual se muestra en la última columna *Sig.* (Significancia). Si el valor es mayor a 0.05 se acepta la hipótesis de que de ninguno de los niveles de ese factor tiene un efecto significativamente distinto en la respectiva variable de respuesta. Si el valor es menor que 0.05 se rechaza la hipótesis, concluyendo de que al menos uno de los 3 niveles de temperatura o velocidad del aire influye de manera significativa en la variable de respuesta contenido de humedad y tiempo de secado.

### **Resultados Estadístico del Banano**

En la tabla 10.2, se muestran los resultados del análisis de varianza para el caso del secado de banano, considerando el efecto de cada uno de los factores: temperatura y velocidad del aire de secado en las variables de respuesta contenido de humedad y tiempo de secado.

**Tabla 10.2** Resultado del ANOVA para las curvas de secado del banano

Origen	Variable dependiente	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	Contenido de Humedad	4	.012	165.269	.000
	Tiempo de Secado	4	8698.333	153.500	.000
Intersección	Contenido de Humedad	1	.123	1708.008	.000
	Tiempo de Secado	1	1610977.596	28429.016	.000
Temperatura	Contenido de Humedad	1	.047	651.596	.000
	Tiempo de Secado	1	29502.083	520.625	.000
VelocidadAire	Contenido de Humedad	1	.000	2.841	.123
	Tiempo de Secado	1	5002.083	88.272	.000
Temperatura * VelocidadAire	Contenido de Humedad	1	.000	3.029	.112
	Tiempo de Secado	1	168.750	2.978	.115
Error	Contenido de Humedad	10	7.193E-5		
	Tiempo de Secado	10	56.667		
Total	Contenido de Humedad	15			
	Tiempo de Secado	15			
Total corregida	Contenido de Humedad	14			
	Tiempo de Secado	14			

En las pruebas post hoc se revelará cuáles de los niveles de los factores que influyeron en las variables de respuesta afecta significativamente cada variable.

**Tabla 10.3** Pruebas Post Hoc de la Temperatura en el secado del banano

Variable dependiente	(I)Temperatura	(J)Temperatura	Diferencia de medias (I-J)	Error típ.	Sig.	
Contenido de Humedad (DHS de Tukey)	50	60	.07290*	.005997	.000	
		70	.12500*	.004897	.000	
	60	50	-.07290*	.005997	.000	
		70	.05209*	.005997	.000	
	70	50	-.12500*	.004897	.000	
		60	-.05209*	.005997	.000	
	Tiempo de Secado (DHS de Tukey)	50	60	42.50*	5.323	.000
			70	99.17*	4.346	.000
60		50	-42.50*	5.323	.000	
		70	56.67*	5.323	.000	
70		50	-99.17*	4.346	.000	
		60	-56.67*	5.323	.000	

Analizando la tabla 10.3, en las pruebas post hoc para el factor temperatura puede observarse que, en todos los casos, el valor  $p < 0.05$ , lo cual indica que cada nivel de temperatura afectó de manera distinta y significativa tanto el tiempo de secado como el contenido de humedad.

La tabla 10.4 evidencia resultados distintos para el factor velocidad del aire. Ninguno de los niveles de velocidad del aire de secado utilizados, causa que las medias de contenido de humedad sean distintas de forma significativa.

En el caso del tiempo de Secado, sólo el nivel de 2 m/s causa un efecto distinto. Para valores de 1 y 1.5 m/s, el tiempo promedio de secado no es estadísticamente distinto entre sí.

**Tabla 10.4** Pruebas Post Hoc de la Velocidad del Aire en el secado del banano

Variable dependiente	(I)Velocidad del Aire	(J)Velocidad del Aire	Diferencia de medias (I-J)	Error típ.	Sig.
Contenido de Humedad (DHS de Tukey)	1	1.5	.01453	.005997	.084
		2	.00825	.004897	.258
	1.5	1	-.01453	.005997	.084
		2	-.00628	.005997	.566
	2	1	-.00825	.004897	.258
		1.5	.00628	.005997	.566
Tiempo de Secado (DHS de Tukey)	1	1.5	13.33	5.323	.073
		2	40.83*	4.346	.000
	1.5	1	-13.33	5.323	.073
		2	27.50*	5.323	.001
	2	1	-40.83*	4.346	.000
		1.5	-27.50*	5.323	.001

## Resultados Estadístico del Noni

En la tabla 10.5, se muestran los resultados del análisis de varianza para el caso del secado de noni, considerando el efecto de cada uno de los factores: temperatura y velocidad del aire de secado en las variables de respuesta tiempo de secado y contenido de humedad.

**Tabla 10.5** Resultado del ANOVA para las curvas de secado del noni

Origen	Variable dependiente	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	Contenido de Humedad	4	.000	32.507	.000
	Tiempo de Secado	4	4302.500	73.757	.000
Intersección	Contenido de Humedad	1	.024	2158.520	.000
	Tiempo de Secado	1	316459.563	5425.021	.000
Temperatura	Contenido de Humedad	1	1.650E-5	1.479	.252
	Tiempo de Secado	1	12033.333	206.286	.000
VelocidadAire	Contenido de Humedad	1	9.057E-7	.081	.782
	Tiempo de Secado	1	1875.000	32.143	.000
Temperatura * VelocidadAire	Contenido de Humedad	1	.000	16.535	.002
	Tiempo de Secado	1	75.000	1.286	.283
Error	Contenido de Humedad	10	1.116E-5		
	Tiempo de Secado	10	58.333		
Total	Contenido de Humedad	15			
	Tiempo de Secado	15			
Total corregida	Contenido de Humedad	14			
	Tiempo de Secado	14			

La tabla 10.6 muestra los resultados de las pruebas post hoc respecto a la temperatura para el caso del noni.

**Tabla 10.6** Pruebas Post Hoc de la Temperatura en el secado del noni

Variable dependiente	(I)Temperatura	(J)Temperatura	Diferencia de medias (I-J)	Error típ.	Sig.	
Contenido de Humedad (DHS de Tukey)	50	60	-.021637*	.0023618	.000	
		70	.002346	.0019284	.471	
	60	50	.021637*	.0023618	.000	
		70	.023983*	.0023618	.000	
	70	50	-.002346	.0019284	.471	
		60	-.023983*	.0023618	.000	
	Tiempo de Secado (DHS de Tukey)	50	60	68.33*	5.401	.000
			70	63.33*	4.410	.000
60		50	-68.33*	5.401	.000	
		70	-5.00	5.401	.637	
70		50	-63.33*	4.410	.000	
		60	5.00	5.401	.637	

Aunque la tabla 10.6 revela que a 60°C el efecto de la temperatura en el contenido de humedad difiere un poco que en el caso de 50 y 70 °C, el resultado es en promedio similar, y no hay una diferencia significativa apreciable.

Con respecto al tiempo de secado, solamente hay una variación notable a la temperatura de 50°C, obteniéndose menores tiempos tanto para 60 °C como para 70 °C.

Analizando la tabla 10.7, la cual compara los efectos del factor velocidad del aire entre los niveles de cada factor, se observa que, aunque la velocidad de 1.5 m/s resulta en contenidos de humedad un poco distintas que a 1 y 2 m/s, estos valores no son significativamente distintos entre sí, por lo que, según el ANOVA, la velocidad del aire no afecta el contenido de humedad final en el noni.

En el caso del tiempo de secado, si es evidente que la velocidad del aire en el rango de 1 a 2 m/s afecta de manera notable, los valores estadísticos de Significancia por debajo de 0.05 denotan que entre cada uno de los niveles existen diferencias que se a

**Tabla 10.7** Pruebas Post Hoc de la Velocidad del Aire en el secado del noni

Variable dependiente	(I)Velocidad del Aire	(J)Velocidad del Aire	Diferencia de medias (I-J)	Error típ.	Sig.
Contenido de Humedad (DHS de Tukey)	1	1.5	-.023085*	.0023618	.000
		2	-.000549	.0019284	.956
	1.5	1	.023085*	.0023618	.000
		2	.022535*	.0023618	.000
	2	1	.000549	.0019284	.956
		1.5	-.022535*	.0023618	.000
Tiempo de Secado (DHS de Tukey)	1	1.5	49.17*	5.401	.000
		2	25.00*	4.410	.001
	1.5	1	-49.17*	5.401	.000
		2	-24.17*	5.401	.003
	2	1	-25.00*	4.410	.001
		1.5	24.17*	5.401	.003

## Resultados Estadístico de la Papaya

En la tabla 10.8, se muestran los resultados del análisis de varianza para el caso del secado de papaya, considerando el efecto de cada uno de los factores: temperatura y velocidad del aire de secado en las variables de respuesta tiempo de secado y contenido de humedad.

**Tabla 10.8** Resultado del ANOVA para las curvas de secado de la papaya

Origen	Variable dependiente	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	Contenido de Humedad	4	.001	209.363	.000
	Tiempo de Secado	4	37270.833	621.181	.000
Intersección	Contenido de Humedad	1	.025	3702.830	.000
	Tiempo de Secado	1	1388434.973	23140.583	.000
Temperatura	Contenido de Humedad	1	.002	360.147	.000
	Tiempo de Secado	1	141918.750	2365.313	.000
VelocidadAire	Contenido de Humedad	1	.003	381.466	.000
	Tiempo de Secado	1	2552.083	42.535	.000
Temperatura VelocidadAire *	Contenido de Humedad	1	8.699E-5	12.680	.005
	Tiempo de Secado	1	18.750	.313	.588
Error	Contenido de Humedad	10	6.860E-6		
	Tiempo de Secado	10	60.000		
Total	Contenido de Humedad	15			
	Tiempo de Secado	15			
Total corregida	Contenido de Humedad	14			
	Tiempo de Secado	14			

En las pruebas post hoc se revelará cuáles de los niveles de los factores que influyeron en las variables de respuesta afecta significativamente cada variable.

Respecto a las pruebas post hoc de la temperatura de secado (tabla 10.9), el contenido promedio de humedad difiere solamente entre el nivel de 50 °C respecto a 60 y 70°C. En el caso del tiempo de secado, cada nivel de temperatura produce tiempos distintos de secado para la papaya.

En la tabla 10.10 se observa que solo a una velocidad de aire de 2 m/s, el contenido de humedad cambia de forma notable y que para 1 y 1.5 m/s no es estadísticamente distinta. Sin embargo, el tiempo de secado si se ve afectado para cada nivel de velocidad considerado en el estudio (de 1 a 2 m/s).

**Tabla 10.9** Pruebas Post Hoc de la Temperatura en el secado de la papaya

Variable dependiente	(I)Temperatura	(J)Temperatura	Diferencia de medias (I-J)	Error típ.	Sig.
Contenido de Humedad (DHS de Tukey)	50	60	.029767*	.0018521	.000
		70	.028698*	.0015122	.000
	60	50	-.029767*	.0018521	.000
		70	-.001069	.0018521	.835
	70	50	-.028698*	.0015122	.000
		60	.001069	.0018521	.835
Tiempo de Secado (DHS de Tukey)	50	60	152.5000*	5.47723	.000
		70	217.5000*	4.47214	.000
	60	50	-152.5000*	5.47723	.000
		70	65.0000*	5.47723	.000
	70	50	-217.5000*	4.47214	.000
		60	-65.0000*	5.47723	.000

**Tabla 10.10** Pruebas Post Hoc de la Velocidad del Aire en el secado de la papaya

Variable dependiente	(I)Velocidad del Aire	(J)Velocidad del Aire	Diferencia de medias (I-J)	Error típ.	Sig.
Contenido de Humedad (DHS de Tukey)	1	1.5	.000650	.0018521	.935
		2	-.029535*	.0015122	.000
	1.5	1	-.000650	.0018521	.935
		2	-.030186*	.0018521	.000
	2	1	.029535*	.0015122	.000
		1.5	.030186*	.0018521	.000
Tiempo de Secado (DHS de Tukey)	1	1.5	58.3333*	5.47723	.000
		2	29.1667*	4.47214	.000
	1.5	1	-58.3333*	5.47723	.000
		2	-29.1667*	5.47723	.001
	2	1	-29.1667*	4.47214	.000
		1.5	29.1667*	5.47723	.001

## **10.3 Anexo C**

### **Resultados de los modelos de ajuste**

En las tablas 10.11, 10.12 y 10.13, se muestran los resultados obtenidos de cada uno de los ajustes planteados respectivos para los tres vegetales, en cada una de las tablas se detalla el coeficiente de correlación obtenido en cada uno de las combinaciones temperatura y velocidad de aire de secado, el promedio de correlación de las 5 combinaciones y también se detalla si el modelo logró describir la trayectoria de las curvas de secado experimentales.

Para el caso del banano, fueron 7 modelos los que no lograron describir la trayectoria de ninguna de las curvas experimentales y los demás modelos de ajuste solo logran describir 3 de 5 en el mejor de los casos.

Con respecto al caso del noni, son 10 los modelos que no lograron describir la trayectoria de ninguna de las curvas de secado experimentales y los demás modelos de ajuste solo logran describir 3 de 5 curvas de secado experimentales.

En el caso de la papaya, fueron 11 los modelos no logran describir la trayectoria de ninguna de las curvas de secado experimentales y solo 1 logra describir 3 de 5.

En general, los resultados obtenidos por los modelos de ajuste de capa fina planteados en la tabla 3.1 no resultaron satisfactorios y considerando que la mayoría de los casos no lograban una descripción precisa de las trayectorias de las curvas de secado experimentales.

**Tabla 10.11** Resultado de modelos de capa fina caso banano

Modelo	r <sup>2</sup>					Describe la curva al final?	Promedio
	T = 50°C; V = 1 m/s	T = 50°C; V = 2 m/s	T = 60°C; V = 1.5 m/s	T = 70°C; V = 1 m/s	T = 70°C; V = 2 m/s		
Lewis	0,9988	0,9964	0,9937	0,9925	0,9935	NO	0,9950
Page	0,9996	0,9979	0,9949	0,9993	0,9989	2/5 casos	0,9981
Page modificado	0,9996	0,9979	0,9949	0,9993	0,9989	2/5 casos	0,9981
Henderson & Pabis	0,9990	0,9966	0,9936	0,9954	0,9979	2/5 casos	0,9965
Geométrico	no se ajusta	no se ajusta	no se ajusta	no se ajusta	no se ajusta	NO	-
Wang & Singh	0,9938	0,9942	0,9752	0,9954	0,9873	NO	0,9892
Exponencial 2 términos	0,9991	0,9985	0,9936	0,9924	0,9934	NO	0,9954
Thompson	0,9993	0,9949	0,9961	0,9945	0,9967	NO	0,9963
Logarítmico	0,9997	0,9989	0,9992	0,9981	0,9988	1/5 casos	0,9989
Logístico	0,9990	0,9965	0,9935	0,9995	0,9992	1/5 casos	0,9975
Enfoque Difusional	0,9997	0,9987	0,9979	0,9994	0,9968	3/5 casos	0,9985
Verma et al	0,9990	0,9965	0,9935	0,9959	0,9991	3/5 casos	0,9968
Dos términos	0,9998	0,9989	0,9992	0,9994	0,9992	NO	0,9993
Midilli et al	0,9998	0,9990	0,9990	0,9994	0,9993	3/5 casos	0,9993
Jena y Das	0,9997	0,9989	0,9994	0,9989	0,9995	NO	0,9993
Distribución de Weibull	0,9998	0,9989	0,9992	0,9994	0,9993	3/5 casos	0,9993
Henderson & Pabis Modificado	0,9999	0,9977	0,9998	0,9967	0,9991	1/5 casos	0,9986

**Tabla 10.12** Resultado de modelos de capa fina caso noni

Modelo	r <sup>2</sup>					Describe la curva al final?	Promedio
	T = 50°C; V = 1 m/s	T = 50°C; V = 2 m/s	T = 60°C; V = 1.5 m/s	T = 70°C; V = 1 m/s	T = 70°C; V = 2 m/s		
Lewis	0,9750	0,9708	0,9793	0,9645	0,9721	NO	0,9723
Page	0,9992	0,9997	0,9982	0,9985	0,9995	3/5 casos	0,9990
Page modificado	0,9992	0,9997	0,9982	0,9985	0,9995	2/5 casos	0,9990
Henderson & Pabis	0,9891	0,9856	0,9894	0,9814	0,9834	NO	0,9858
Geométrico	no se ajusta	no se ajusta	no se ajusta	no se ajusta	no se ajusta	NO	-
Wang & Singh	0,9957	0,9950	0,9960	0,9934	0,9957	NO	0,9952
Exponencial 2 términos	0,9996	0,9992	0,9985	0,9990	0,9992	NO	0,9991
Thompson	0,9915	0,9900	0,9866	0,9890	0,9839	NO	0,9882
Logarítmico	0,9948	0,9949	0,9934	0,9935	0,9917	NO	0,9937
Logístico	0,9990	0,9996	0,9979	0,9991	0,9993	3/5 casos	0,9990
Enfoque Difusional	0,9996	0,9995	0,9986	0,9992	0,9994	2/5 casos	0,9993
Verma et al	0,9996	0,9995	0,9986	0,9993	0,9993	2/5 casos	0,9993
Dos términos	0,9996	0,9995	0,9985	0,9991	0,9994	NO	0,9992
Midilli et al	0,9997	0,9997	0,9989	0,9996	0,9996	2/5 casos	0,9995
Jena y Das	0,9993	0,9990	0,9985	0,9992	0,9980	NO	0,9987
Distribución de Weibull	0,9997	0,9997	0,9956	0,9996	0,9996	3/5 casos	0,9988
Henderson & Pabis Modificado	0,9998	0,9995	0,9729	0,9992	0,9992	NO	0,9941

**Tabla 10.13** Resultado de modelos de capa fina caso papaya

Modelo	r <sup>2</sup>					Describe la curva al final?	Promedio
	T = 50°C; V = 1 m/s	T = 50°C; V = 2 m/s	T = 60°C; V = 1.5 m/s	T = 70°C; V = 1 m/s	T = 70°C; V = 2 m/s		
Lewis	0,9896	0,9955	0,9889	0,9650	0,9883	NO	0,9855
Page	0,9988	0,9992	0,9941	0,9972	0,9994	2/5 casos	0,9977
Page modificado	0,9988	0,9992	0,9941	0,9972	0,9994	2/5 casos	0,9977
Henderson & Pabis	0,9936	0,9983	0,9905	0,9780	0,9939	NO	0,9909
Geométrico	no se ajusta	no se ajusta	no se ajusta	no se ajusta	no se ajusta	NO	-
Wang & Singh	0,9975	0,9976	0,9937	0,9979	0,9991	NO	0,9972
Exponencial 2 términos	0,9990	0,9991	0,9947	0,9958	0,9908	2/5 casos	0,9959
Thompson	0,9982	0,9996	0,9937	0,9879	0,9951	NO	0,9949
Logarítmico	0,9991	0,9996	0,9971	0,9962	0,9979	NO	0,9980
Logístico	0,9993	0,9994	0,9953	0,9981	0,9995	NO	0,9981
Enfoque Difusional	0,9932	0,9988	0,9887	0,9958	0,9994	NO	0,9952
Verma et al	0,9940	0,9987	0,9907	0,9955	0,9994	NO	0,9957
Dos términos	0,9991	0,9994	0,9941	0,9958	0,9994	2/5 casos	0,9976
Midilli et al	0,9996	0,9996	0,9969	0,9987	0,9994	3/5 casos	0,9987
Jena y Das	0,9972	0,9996	0,9971	0,9980	0,9991	1/5 casos	0,9985
Distribución de Weibull	0,9969	0,9994	0,9951	0,9988	0,9994	NO	0,9979
Henderson & Pabis Modificado	0,9941	0,9987	0,9902	0,9928	0,9993	NO	0,9950

## 10.4 Anexo D

A continuación, se presentan las curvas de velocidad de secado generadas a partir de cada una de las condiciones planteadas para cada uno de los vegetales.

### Curvas de Velocidad de Secado de Banano

La figura 10.1 muestra las curvas de velocidad de secado generadas a partir de las curvas de secado obtenidas de manera experimental. Todas las curvas inician en etapa de velocidad decreciente, esto es debido a la manera en como la humedad en la muestra migra hacia la corriente de aire.

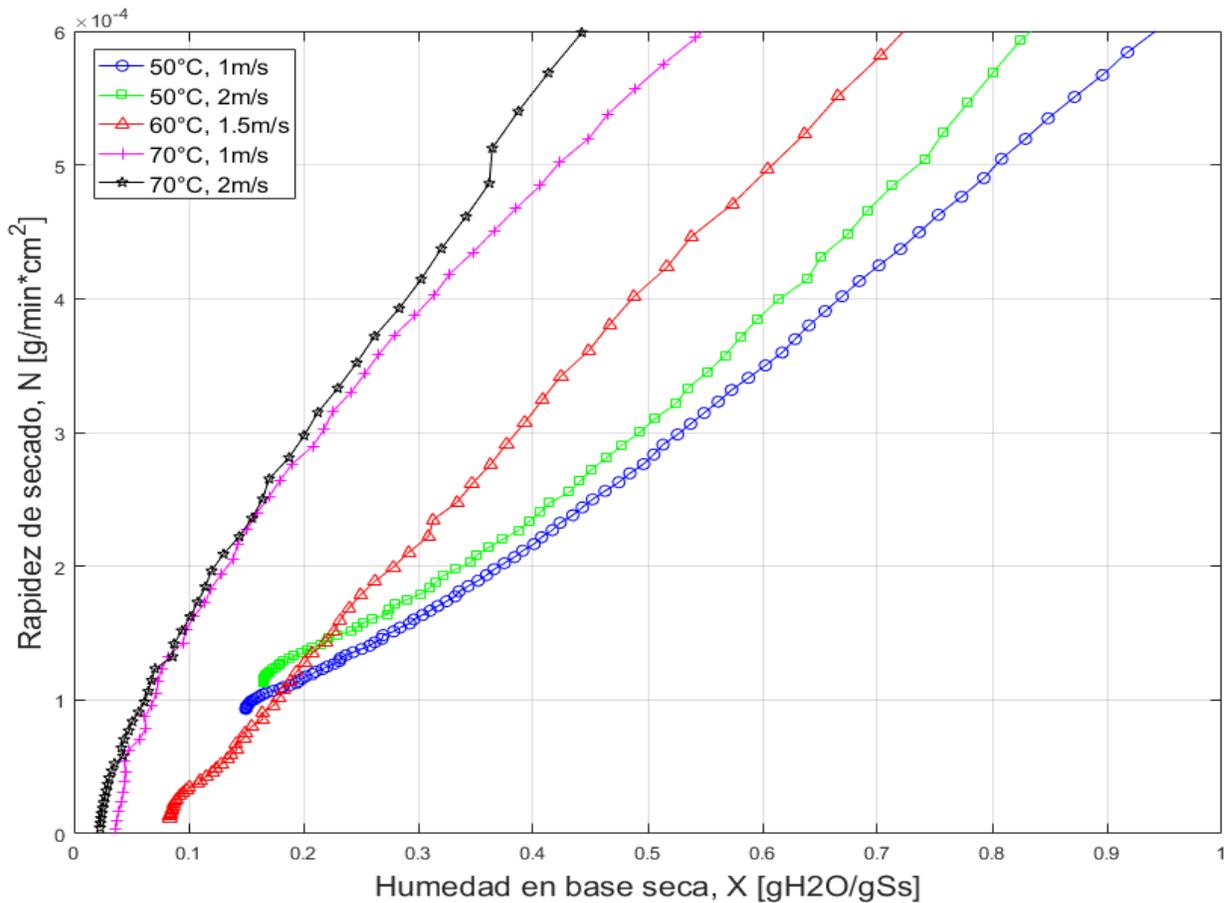


Figura 10.1 Curvas de velocidad de secado banano

## Curvas de Velocidad de Secado de Noni

En la figura 10.2, se muestran las curvas de velocidad de secado del noni generadas de cada una de las curvas de secado obtenidas de manera experimental.

Se puede observar el comportamiento propio del noni, el inicio de las curvas se da en la etapa de velocidad decreciente, pero en comparación con el caso del banano las curvas en general son menos pronunciadas, existe una diferencia significativa respecto a la rapidez entre las curvas generadas a partir de los niveles más bajos de temperatura y las curvas generadas a partir de los niveles intermedios y altos de temperatura.

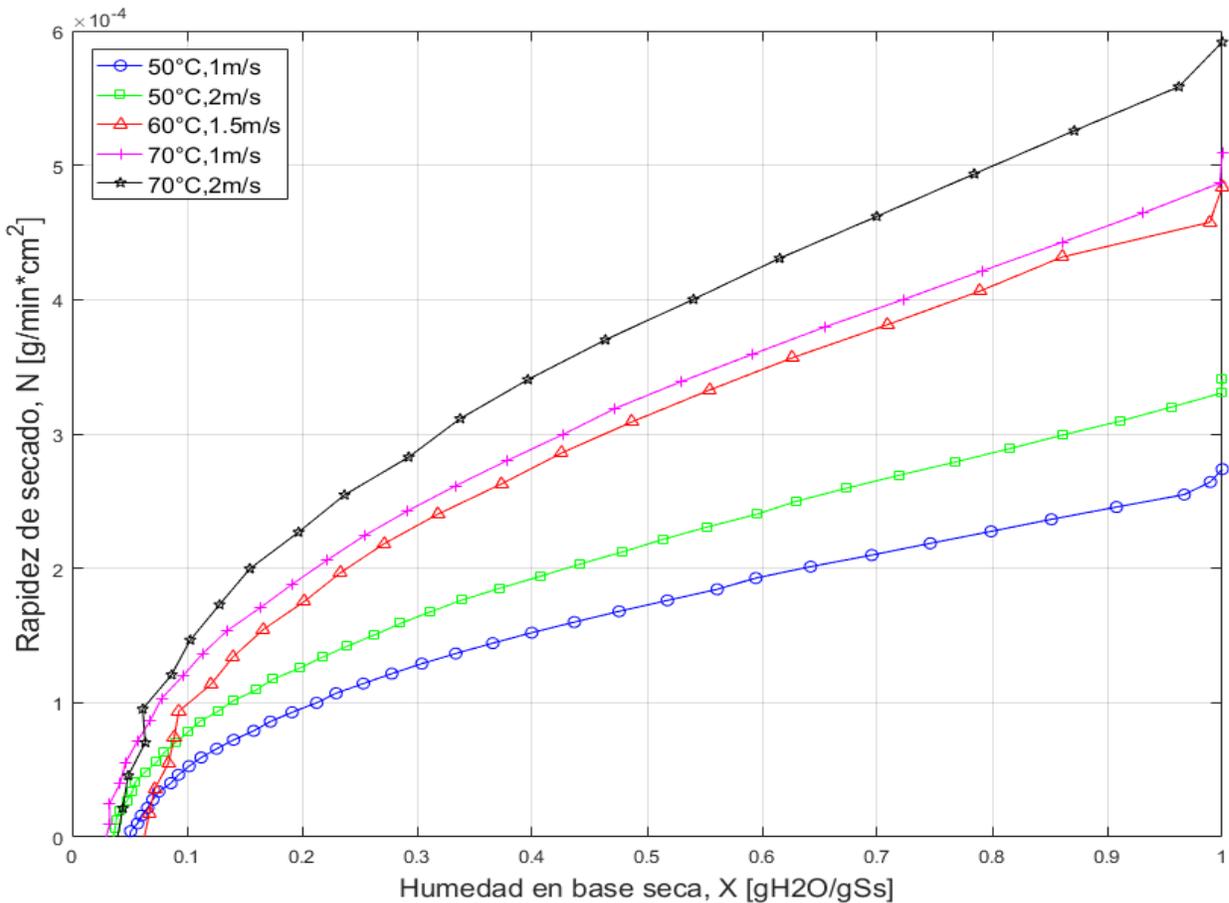


Figura 10.2 Curvas de velocidad de secado noni

## Curvas de Velocidad de Secado de Papaya

En la figura 10.3 se muestran las curvas de velocidad de secado generadas a partir de las curvas de secado obtenidas de manera experimental.

Al igual que en los casos anteriores cada una de las curvas empieza en etapa de velocidad decreciente, pero en este caso en particular se presentan las curvas menos pronunciadas lo cual describe el comportamiento de la migración de la humedad en la muestra hacia la corriente de aire.

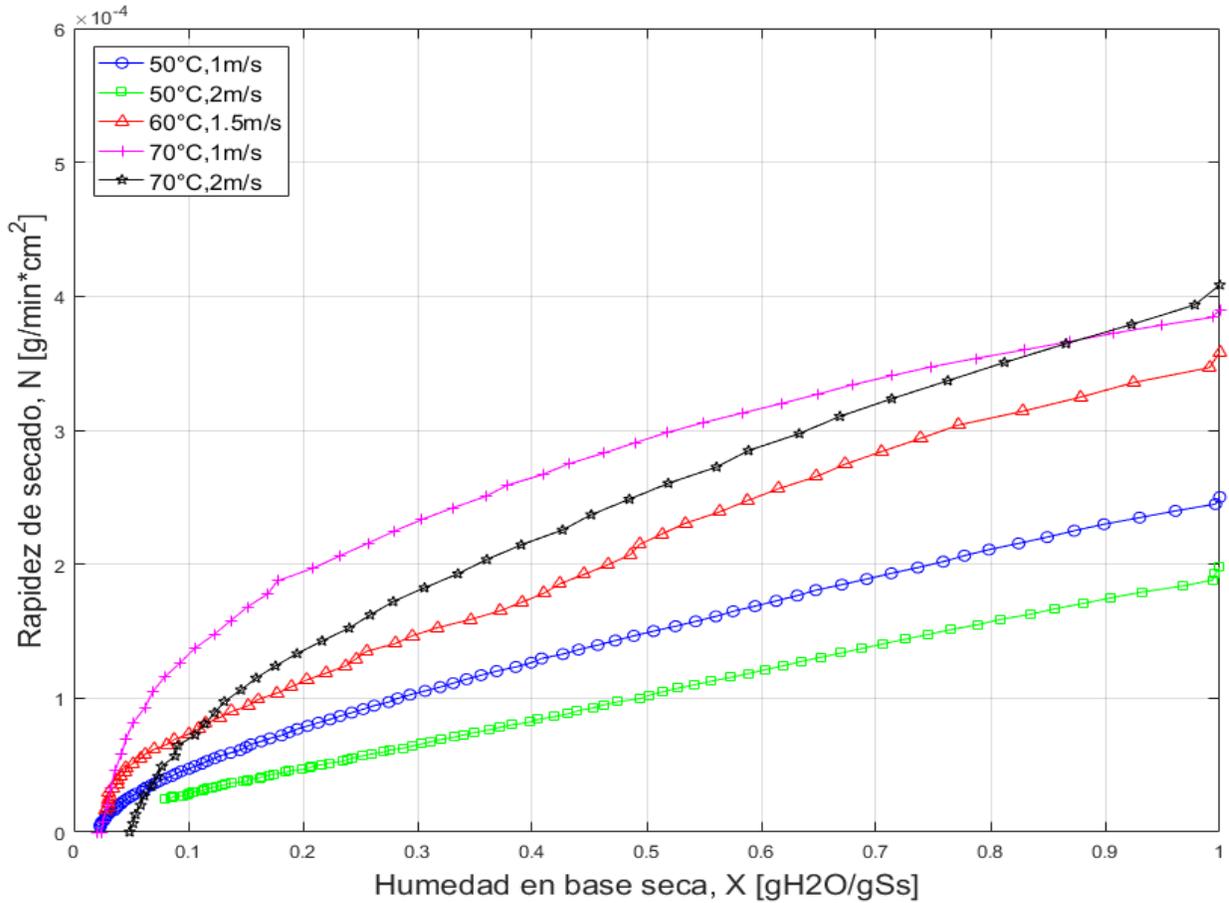


Figura 10.3 Curvas de velocidad de secado papaya

## 10.5 Anexo E

### Programa utilizado para obtener las curvas de secado, modelos de ajuste de modelo de capa fina y curvas características de secado

A continuación, se presenta la rutina elaborada en MATLAB para el cálculo de las curvas de secado, valoración y cálculos de correspondientes para determinar el modelo de capa fina de Midilli, el valor de las constantes empíricas, curva de velocidad de secado y curva característica de secado para el caso del banano, cabe mencionar que la rutina aplicada es la misma para las demás frutas.

```
% Este programa calcula la curva de velocidad de secado
% a partir de datos de peso vs tiempo version mejorada
% 17/12/2016
% By Kevin
% Limpiar variables y ventanas
clc
clear

%% cargando datos desde excel
cd 'C:\Users\UNI\Dropbox\Monografia Kevin'
data=xlsread ('noni.xlsx');

%% Asignando valores especificos y Eliminado datos inconsistentes
t=data(:,1);
t(1:2)=[];
m1 = data(:,2);    m1(1:2)=[];
m2 = data(:,3);    m2(1:2)=[];
m3 = data(:,4);    m3(1:2)=[];
m4 = data(:,5);    m4(1:2)=[];
m5 = data(:,6);    m5(1:2)=[];

%% Eliminando datos NaN al final de los vectores peso
m1(isnan(m1))=[];
m2(isnan(m2))=[];
m3(isnan(m3))=[];
m4(isnan(m4))=[];
m5(isnan(m5))=[];

%% Asignando peso inicial
mi1 = m1(1);
mi2 = m2(1);
mi3 = m3(1);
mi4 = m4(1);
mi5 = m5(1);
```

```
% Asignando humedad de las muestras
hi1 = data(1,2);
hi2 = data(1,3);
hi3 = data(1,4);
hi4 = data(1,5);
hi5 = data(1,6);

% Cálculo de las masas de sólido seco
ms1=mi1*(1-hi1);
ms2=mi2*(1-hi2);
ms3=mi3*(1-hi3);
ms4=mi4*(1-hi4);
ms5=mi5*(1-hi5);

%% Realizando cálculos
% Cálculo de contenido de Humedad en base seca
X1=(m1-ms1)./ms1; % Calculos de contenido de humedad en base seca
X2=(m2-ms2)./ms2;
X3=(m3-ms3)./ms3;
X4=(m4-ms4)./ms4;
X5=(m5-ms5)./ms5;

%% Normalizando la Humedad
Xn1=X1./X1(1); % Calculo de humedad normalizada
Xn2=X2./X2(1);
Xn3=X3./X3(1);
Xn4=X4./X4(1);
Xn5=X5./X5(1);

% Calculando la cantidad de datos en cada experimento
n1=length (m1);
n2=length (m2);
n3=length (m3);
n4=length (m4);
n5=length (m5);

%% Asignando el vector tiempo al tamaño de cada experimento
t1=t(1:n1);
t2=t(1:n2);
t3=t(1:n3);
t4=t(1:n4);
t5=t(1:n5);

%% Grafico: Humedad vs Tiempo
figure(1)
plot(t1,Xn1,'ko',t2,Xn2,'ks',t3,Xn3,'k^',t4,Xn4,'k+',t5,Xn5,'kp')
title('Grafico de contenido de humedad (X) vs tiempo (t)', 'FontSize',16)
xlabel('Tiempo, t [min]', 'FontSize',14)
```

```
ylabel('Humedad normalizada en base seca, X [gH2O/gSs]','FontSize',14)
grid
legend('50°C,1m/s','50°C,2m/s','60°C,1.5m/s','70°C,1m/s','70°C,2m/s','FontSize',12)
ylim([0 1.05])

%% Rapidez de secado
%Se uso curve fitting tool para ajustar las 5 curvas al modelo de
Midilli et al
% Modelo de secado aplicar:
%  $a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot t + c$ 
%  $dx/dt = -a \cdot k \cdot \exp(-k \cdot t) + b$ 
% donde x es tiempo (t1,t2,t3,t4,t5); y es humedad normalizada
(Xn1,Xn2,Xn3,Xn4,Xn5)
%Realizando la regresion obtenemos

%Para 50°C,1m/s (t1,Xn1)
a1=9.954;
b1=0.01694;
c1=-8.903;
k1=0.002901;    %r^2 = 0.9982

%Para 50°C,2m/s (t2,Xn2)
a2=12.88;
b2=0.01881;
c2=-11.83;
k2=0.002321;    %r^2 = 0.9988

%Para 60°C,1.5m/s (t3,Xn3)
a3=16.76;
b3=0.04012;
c3=-15.73;
k3=0.003526;    %r^2 = 0.9977

%Para 70°C,1m/s (t4,Xn4)
a4=15.09;
b4=0.03041;
c4=-14.02;
k4=0.003088;    %r^2 = 0.9977

%Para 70°C,2m/s (t5,Xn5)
a5=20.91;
b5=0.04934;
c5=-19.86;
k5=0.003348;    %r^2 = 0.9980

X_1=a1*exp(-k1*t1)+b1*t1+c1;
dxdt1=-a1*k1*exp(-k1*t1)+b1;
```

```
X_2=a2*exp(-k2*t2)+b2*t2+c2;  
dxdt2=-a2*k2*exp(-k2*t2)+b2;
```

```
X_3=a3*exp(-k3*t3)+b3*t3+c3;  
dxdt3=-a3*k3*exp(-k3*t3)+b3;
```

```
X_4=a4*exp(-k4*t4)+b4*t4+c4;  
dxdt4=-a4*k4*exp(-k4*t4)+b4;
```

```
X_5=a5*exp(-k5*t5)+b5*t5+c5;  
dxdt5=-a5*k5*exp(-k5*t5)+b5;
```

```
%% Gráfico  
figure(2)  
subplot(2,3,1)  
plot(t1,Xn1,'ko','Linewidth',1)  
hold on  
plot(t1,X_1,'b-','Linewidth',2)  
xlabel('Tiempo de secado, t [min]')  
ylabel('Humedad en base seca, X [gH2O/gSs]')  
title('Curva de Secado X vs t [50°C, 1m/s]')  
legend('Datos experimentales','Ajuste','Location','Northeast')  
grid  
ylim([0 1])
```

```
subplot(2,3,2)  
plot(t2,Xn2,'ks','Linewidth',1)  
hold on  
plot(t2,X_2,'b-','Linewidth',2)  
xlabel('Tiempo de secado, t [min]')  
ylabel('Humedad en base seca, X [gH2O/gSs]')  
title('Curva de Secado X vs t [50°C, 2m/s]')  
legend('Datos experimentales','Ajuste','Location','Northeast')  
grid  
ylim([0 1])
```

```
subplot(2,3,3)  
plot(t3,Xn3,'k^','Linewidth',1)  
hold on  
plot(t3,X_3,'b-','Linewidth',2)  
xlabel('Tiempo de secado, t [min]')  
ylabel('Humedad en base seca, X [gH2O/gSs]')  
title('Curva de Secado X vs t [60°C, 1.5m/s]')  
legend('Datos experimentales','Ajuste','Location','Northeast')  
grid  
ylim([0 1])
```

```
subplot(2,3,4)
plot(t4,Xn4,'k*','Linewidth',1)
hold on
plot(t4,X_4,'b-','Linewidth',2)
xlabel('Tiempo de secado, t [min]')
ylabel('Humedad en base seca, X [gH2O/gSs]')
title('Curva de Secado X vs t [70°C, 1m/s]')
legend('Datos experimentales','Ajuste','Location','Northeast')
grid
ylim([0 1])

subplot(2,3,5)
plot(t5,Xn5,'kp','Linewidth',1)
hold on
plot(t5,X_5,'b-','Linewidth',2)
xlabel('Tiempo de secado, t [min]')
ylabel('Humedad en base seca, X [gH2O/gSs]')
title('Curva de Secado X vs t [70°C, 2m/s]')
legend('Datos experimentales','Ajuste','Location','Northeast')
grid
ylim([0 1])

%% Calculando N
A=7.5*4.5 %Area del portamuestra (cm^2)
N1=(-ms1/A)*dxdt1; %velocidad de secado
N2=(-ms2/A)*dxdt2;
N3=(-ms3/A)*dxdt3;
N4=(-ms4/A)*dxdt4;
N5=(-ms5/A)*dxdt5;

figure(3)
plot(Xn1,N1,'bo-',Xn2,N2,'gs-',Xn3,N3,'r^-',Xn4,N4,'m+-',Xn5,N5,'kp-')
title('Grafico de Rapidez de secado (N) vs Humedad en base seca (X)')
xlabel('Humedad en base seca, X [gH2O/gSs]')
ylabel('Rapidez de secado, N [g/min*cm^2]')
grid
legend('50°C,1m/s','50°C,2m/s','60°C,1.5m/s','70°C,1m/s','70°C,2m/s','Lo
cation','Northwest')
ylim([0 0.0006])

%%
figure(4)
subplot(2,3,1)
plot(Xn1,N1,'ko-')
xlabel('Humedad en base seca, X [gH2O/gSs]')
ylabel('Rapidez de secado, N [g/min*cm^2]')
title('N vs X [50°C,1m/s]')
grid
```

```
ylim([0 0.0003])

subplot(2,3,2)
plot(Xn2,N2,'ko-')
xlabel('Humedad en base seca, X [gH2O/gSs]')
ylabel('Rapidez de secado, N [g/min*cm^2]')
title('N vs X [50°C,2m/s]')
grid
ylim([0 0.0003])

subplot(2,3,3)
plot(Xn3,N3,'ko-')
xlabel('Humedad en base seca, X [gH2O/gSs]')
ylabel('Rapidez de secado, N [g/min*cm^2]')
title('N vs X [60°C,1.5m/s]')
grid
ylim([0 0.0006])

subplot(2,3,4)
plot(Xn4,N4,'ko-')
xlabel('Humedad en base seca, X [gH2O/gSs]')
ylabel('Rapidez de secado, N [g/min*cm^2]')
title('N vs X [70°C,1m/s]')
grid
ylim([0 0.0006])

subplot(2,3,5)
plot(Xn5,N5,'ko-')
xlabel('Humedad en base seca, X [gH2O/gSs]')
ylabel('Rapidez de secado, N [g/min*cm^2]')
title('N vs X [70°C,2m/s]')
grid
ylim([0 0.0006])

%% Curva Característica de Secado

% phi = Xn segun el comportamiento de las curvas de velocidad de secado
% phi = X/Xc pero Xc = Xmax = Xinicial, por tanto phi=X/Xc = X/X(1) = Xn
(X
% normalizada)

phi2 = X2/X2(3);
phi4 = X4/X4(3);

f1 = N1/max(N1);
f2 = N2/N2(3);
f3 = N3/max(N3);
f4 = N4/N4(3);
```

```
f5 = N5/max(N5);

figure(6)
plot(t1,Xn1,'ko',t2,Xn2,'ks',t3,Xn3,'k^',t4,Xn4,'k+',t5,Xn5,'kp')
title('Gráfico de contenido de humedad (X) vs tiempo (t)','FontSize',16)
xlabel('Tiempo, t [min]','FontSize',14)
ylabel('Humedad normalizada en base seca, X [gH2O/gSs]','FontSize',14)
grid on
hold on
plot(t_,Xn_,'b-','LineWidth',3)
legend('50°C, 1m/s','50°C, 2m/s','60°C, 1.5m/s','70°C, 1m/s','70°C, 2m/s','Ajuste','FontSize',12)

ylim([0 1])

ttt = [t1;t2;t3;t4;t5];
Xnnn = [Xn1;Xn2;Xn3;Xn4;Xn5];

%% Figura de un solo ajuste general para las 5 curvas

t_ = linspace(0,460,50);

a_ = 1.094;
b_ = -2.046E-6 ;
c_ = -0.01045;
k_ = 0.01823;

Xn_ = a_*exp(-k_*t_)+b_*t_+c_;

figure(6)
plot(t1,Xn1,'ko',t2,Xn2,'ks',t3,Xn3,'k^',t4,Xn4,'k+',t5,Xn5,'kp')
title('Gráfico de contenido de humedad (X) vs tiempo (t)','FontSize',16)
xlabel('Tiempo, t [min]','FontSize',14)
ylabel('Humedad normalizada en base seca, X [gH2O/gSs]','FontSize',14)
grid on
hold on
plot(t_,Xn_,'b-','LineWidth',3)
legend('50°C, 1m/s','50°C, 2m/s','60°C, 1.5m/s','70°C, 1m/s','70°C, 2m/s','Ajuste','FontSize',12)

ylim([0 1])

ttt = [t1;t2;t3;t4;t5];
Xnnn = [Xn1;Xn2;Xn3;Xn4;Xn5];

%% Graficos CO n un solo a,b y c y distintos ajustes de k segun el caso
a_ = 1.094;
b_ = -2.046E-6;
```

```
c_=-0.01045;

%Para 50°C,1m/s (t1,Xn1)
k_1=0.01444;    %r^2 = 0.9899

%Para 50°C,2m/s (t2,Xn2)
k_2=0.01363;    %r^2 = 0.9866

%Para 60°C,1.5m/s (t3,Xn3)
k_3=0.02398 ;    %r^2 = 0.9909

%Para 70°C,1m/s (t4,Xn4)
k_4=0.01967;    %r^2 = 0.9821

%Para 70°C,2m/s (t5,Xn5)
k_5=0.02591;    %r^2 = 0.9855

X_1=a_*exp(-k_1*t1)+b_*t1+c_;
X_2=a_*exp(-k_2*t2)+b_*t2+c_;
X_3=a_*exp(-k_3*t3)+b_*t3+c_;
X_4=a_*exp(-k_4*t4)+b_*t4+c_;
X_5=a_*exp(-k_5*t5)+b_*t5+c_;

t1_ = t1(1:2:end);
t2_ = t2(1:2:end);
t3_ = t3(1:2:end);
t4_ = t4(1:2:end);
t5_ = t5(1:2:end);

Xn1_ = Xn1(1:2:end);
Xn2_ = Xn2(1:2:end);
Xn3_ = Xn3(1:2:end);
Xn4_ = Xn4(1:2:end);
Xn5_ = Xn5(1:2:end);

%% Gráfico
figure(7)
subplot(3,2,1)
plot(t1_,Xn1_,'ro','Linewidth',1,'Color',[1 0.2 0.2])
hold on
plot(t1,X_1,'b-','Linewidth',1.5)
xlabel('Tiempo de secado, t [min]')
ylabel('Humedad en base seca, X [gH2O/gSs]')
%title('Curva de Secado X vs t [50°C, 1m/s] ')
legend(['50°C, 1m/s'],'Ajuste','Location','Northeast')
grid
ylim([0 1])
```

```
subplot(3,2,2)
plot(t2_,Xn2_,'ks','Linewidth',1,'Color',[1 0.2 0.2])
hold on
plot(t2,X_2,'b-','Linewidth',1.5)
xlabel('Tiempo de secado, t [min]')
ylabel('Humedad en base seca, X [gH2O/gSs]')
%%title('Curva de Secado X vs t [50°C, 2m/s]')
legend('[50°C, 2m/s]','Ajuste','Location','Northeast')
grid
ylim([0 1])
```

```
subplot(3,2,3)
plot(t3_,Xn3_,'k^','Linewidth',1,'Color',[1 0.2 0.2])
hold on
plot(t3,X_3,'b-','Linewidth',1.5)
xlabel('Tiempo de secado, t [min]')
ylabel('Humedad en base seca, X [gH2O/gSs]')
%%title('Curva de Secado X vs t [60°C, 1.5m/s]')
legend('[60°C, 1.5m/s]','Ajuste','Location','Northeast')
grid
ylim([0 1])
```

```
subplot(3,2,5)
plot(t4_,Xn4_,'k*','Linewidth',1,'Color',[1 0.2 0.2])
hold on
plot(t4,X_4,'b-','Linewidth',1.5)
xlabel('Tiempo de secado, t [min]')
ylabel('Humedad en base seca, X [gH2O/gSs]')
%%title('Curva de Secado X vs t [70°C, 1m/s]')
legend('[70°C, 1m/s]','Ajuste','Location','Northeast')
grid
ylim([0 1])
```

```
subplot(3,2,6)
plot(t5_,Xn5_,'kp','Linewidth',1,'Color',[1 0.2 0.2])
hold on
plot(t5,X_5,'b-','Linewidth',1.5)
xlabel('Tiempo de secado, t [min]')
ylabel('Humedad en base seca, X [gH2O/gSs]')
%%title('Curva de Secado X vs t [70°C, 2m/s]')
legend('[70°C, 2m/s]','Ajuste','Location','Northeast')
grid
ylim([0 1])
```