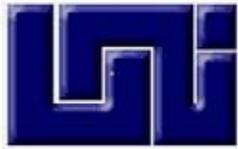


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Química



**Estudio de la cinética del secado de semillas de nim en
un lecho empacado**

TRABAJO DE DIPLOMA PRESENTADO POR:

Br. Ivana Victoria Velásquez Piccinini

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

Ingeniero Químico

TUTOR:

Rafael Gamero, LicEng

Managua, Nicaragua

Junio, 2010

*"Las pruebas pueden ser más duras de lo que esperamos.
Pero son necesarias para el aprendizaje.
Y cada una de ellas nos aproxima más a nuestros sueños"*
Paulo Coelho

Dedico esta tesis a:

Dios, por llenar mi corazón de esperanza y ayudarme a convertir todos los obstáculos que surgieron a lo largo de la carrera en grandes lecciones de vida.

La memoria de mi tío, Giovanni Piccinini; antes que todo un gran amigo, quien siempre guió mis pasos y estuvo a mi lado brindándome su ayuda incondicional. La persona que me motivó continuamente a perseguir mi sueño, al darse cuenta de mis intenciones de estudiar Ingeniería Química.

Mi mamá, Lilly Piccinini; por su amor incondicional, por aconsejarme y darme palabras de aliento en todos los momentos en que he enfrentado los mayores obstáculos de mi vida; por estar siempre conmigo durante tantas horas de desvelo que en este momento están dando frutos.

Mi abuelita, la memé Delfa; mi segunda madre, por convertirme en la mujer que soy.

A mi tío, Pietro Piccinini; por sus sabios consejos y por todo el apoyo que me brindó a lo largo de la carrera, sin el cual hubiera sido simplemente imposible conseguir todos los logros que actualmente tengo.

Agradecimientos

A mi tutor, Rafael Gamero, le agradezco profundamente el presentarme de forma continua nuevos retos durante la realización de este estudio, que me permitieron elaborar un trabajo de calidad y que me mostraron que todo es posible con paciencia y perseverancia. Estoy segura que todo lo que aprendí a su lado será muy útil para mí durante mi desempeño profesional.

Al Programa UNI-Asdi/SAREC-FIQ por brindar el financiamiento para la realización de este estudio.

A todos mis amigos de la carrera, por compartir conmigo muchos momentos inolvidables, por sus consejos y por sus enseñanzas, todo esto quedará grabado por siempre en mi mente y mi corazón.

Quiero agradecer especialmente a mis amigos Bertha Escobar, Meyling Sánchez y Juan Alonso por brindarme su soporte durante el desarrollo de la fase experimental de esta tesis. Gracias a mis amigas por sus palabras de aliento y por motivarme a nunca desistir.

Carta del catedrático guía

En el marco del Programa de Investigación UNI-Asdi/SAREC-FIQ, se han realizado diversos trabajos monográficos de diferentes estudios de operaciones de secado. En la actualidad, el Área de Investigación de Ingeniería de Procesos Energéticos y de los Alimentos, continúa expandiendo y diversificando los temas de estudio en los cuales la operación de secado representa una etapa crítica en los procesos industriales.

El trabajo titulado **“Estudio de la Cinética del Secado de Semillas de Nim en un Lecho Empacado”**, realizado por la Br. Ivana Victoria Velásquez Piccinini aborda el proceso de secado de semillas de nim en un lecho fijo, el cual es una etapa posterior a la extracción sólido-líquido del aceite y el insecticida de dichas semillas. El proceso de lixiviación de las semillas de nim ha sido una temática ampliamente estudiada por varios años en el Programa UNI-Asdi/SAREC-FIQ, lo cual ha conducido a la necesidad de examinar la cinética de secado en lecho fijo utilizando la misma columna de extracción como secador de lecho empacado.

La Br. Velásquez Piccinini ha realizado un exhaustivo trabajo experimental utilizando una columna como secador de lecho fijo y tres diferentes solventes contenidos en el lecho de semillas de nim sobre base a un diseño experimental previo. La base de datos creada es de un gran valor tomando en consideración los diferentes resultados que se han obtenido para entender los complejos patrones de comportamiento de los solventes durante este tipo de proceso de secado. De estos resultados, se ha realizado un análisis de la influencia de la temperatura, la velocidad lineal del aire de secado, el tamaño y forma de las partículas de nim y la masa del lecho.

El trabajo de la Br. Velásquez Piccinini incluye aspectos muy importantes de la Ingeniería de Procesos, como la operación y montaje del aparato experimental y el sistema de control automático de temperatura; la elaboración de un sistema de higrometría para analizar la concentración de solventes diferentes al agua en el flujo de aire; la adquisición automática de datos utilizando el sistema computarizado LabView®; el procesamiento de datos y cálculos mediante programación en Matlab®; y el análisis estadístico de datos utilizando el software Statgraphics®

Sin duda alguna, la Br. Velásquez Piccinini se ha desempeñado con las cualidades propias de un investigador científico, con lo cual ha desarrollado amplias competencias propias del profesional de la Ingeniería Química. Por esa razón, solicito al honorable jurado le otorguen a la Br. Ivana Victoria Velásquez Piccinini el título de Ingeniero Químico.



Rafael Gamero

Tutor

Resumen

Las semillas de nim son utilizadas para obtener un insecticida botánico ampliamente utilizado debido a sus atributos amigables con el medio ambiente. El insecticida es obtenido mediante dos etapas sucesivas de lixiviación, en las cuales hexano y etanol son usados para remover el aceite y el insecticida contenidos respectivamente. Luego de cada etapa de lixiviación, el secado es aplicado para remover los solventes remanentes en el sólido.

El objetivo de este trabajo es estudiar el proceso de secado de un lecho de semillas luego del proceso de lixiviación. Para lograr esto, las semillas de nim fueron humedecidas separadamente con agua, etanol y hexano y colocadas en el interior de un secador de lecho empacado, que en la práctica será la misma columna para llevar a cabo la lixiviación. El uso de la misma columna es conveniente para llevar a cabo los procesos de lixiviación y secado sin mover las partículas del sólido de un equipo a otro.

Los efectos de la velocidad del aire, temperatura del aire, tamaño de partícula y masa de material sobre la cinética de secado fueron investigados. El equipo utilizado para el trabajo experimental consistió en una columna de vidrio a través de la cual se hacía pasar una corriente de aire seco y caliente que ingresaba en la parte inferior.

El contenido de humedad del sólido fue calculado a partir de un balance de masa entre el sólido y la corriente de aire húmedo. La humedad absoluta de la corriente de aire húmedo a la salida del equipo fue medida utilizando un psicrómetro específico para cada solvente.

Los perfiles de temperatura generados a lo largo del lecho durante el proceso de secado fueron también examinados, para esto se colocaron termopares en diferentes posiciones dentro del lecho.

La distribución de temperaturas en el estado no estacionario y las curvas de secado revelaron comportamientos particulares que dependieron de las características de cada solvente y de la influencia de los parámetros estudiados. Los efectos de la velocidad del aire, temperatura del aire y masa de material fueron estadísticamente significativos sobre la velocidad de secado de las semillas humedecidas con los tres solventes; los efectos del tamaño de partícula no fueron estadísticamente significativos sobre la velocidad de secado de las semillas humedecidas con hexano y etanol.

Un modelo matemático de tipo exponencial fue ajustado a los datos experimentales. Este modelo concordó satisfactoriamente con las curvas de secado. Los coeficientes de difusión efectiva fueron calculados relacionando la expresión exponencial con una solución al modelo de difusión de Fick. La difusividad efectiva incrementó al incrementarse la velocidad del aire, temperatura del aire y masa de material.

Abstract

The neem seeds are used to obtain a botanical insecticide that has become widely consumed due to its environmentally friendly attributes. The insecticide from neem seeds is frequently acquired performing two successive leaching steps, in which hexane and ethanol are used for removing the contained oil and the insecticide respectively. After each leaching step, drying is applied to remove the remaining solvents from the solid.

The objective of this work is to study the drying process of a fixed bed of neem seeds after leaching. To achieve this, neem seeds were wetted separately with water, ethanol and hexane and placed in a fixed bed dryer that in practice would be the same leaching column. The use of the same column is suitable to perform the leaching and drying operations without moving the solid particles from one equipment to another.

The effects of air velocity, air temperature, particle size and wet material load on the through- drying kinetics were investigated. The setup used for the experimental work was a glass column with a hot and dry gas stream flowing from the bottom throughout the fixed bed of wet neem seeds contained inside the column.

The moisture content of the solid bed was computed from a mass balance performed between the drying solid and the wetting air stream. The absolute humidity of the out- coming air stream was measured with a psychrometer especially built and calibrated for each solvent.

The temperature profiles generated along the bed during the drying process were also examined, for which thermocouples were placed at different positions throughout the bed. All the thermocouples, including the two of the psychrometric system, were coupled to computer for data acquisition in time.

Both the non- steady state temperature distribution and drying curves reveal particular behaviors that depend on the characteristics of each solvent and the influence of the parameters studied. The effects of the air velocity, air temperature and wet material load were statistically significant on the drying rate of the seeds wetted with these solvents; the effects of the particle size were not statistically significant on the drying rate of the seeds wetted with hexane and ethanol.

A mathematical model of exponential type was fitted to the experimental data. This model agreed satisfactorily with the experimental drying curves. The effective moisture diffusion coefficients were calculated by relating the exponential expression with a solution of the Fick's diffusion approach. The effective diffusivity increased with increasing the air velocity, air temperature and particle size.

Keywords: exponential equation; through- drying; effective diffusivity; solvents

Índice de contenido

Contenido	Página
Dedicatoria	i
Agradecimientos	ii
Carta del catedrático guía	iii
Resumen	iv
Abstract	v
Índice de contenido	vi
Lista de figuras y tablas	ix
I. Introducción	1
II. Objetivos	3
2.1. Objetivo general	3
2.2. Objetivos específicos	3
III. Marco Teórico	4
3.1. Generalidades	4
3.2. Cinética de secado	4
3.2.1. Curva de secado	5
3.2.2. Curva de velocidad de secado	5
3.2.3. Períodos de secado	6
3.2.4. Curva característica de secado	8
3.2.5. Variables que afectan la cinética del secado	8
3.2.6. Relaciones básicas del secado convectivo	9
3.3. Balance de materia	11
3.3.1. Determinación de la humedad absoluta a partir de la humedad relativa y la temperatura de bulbo seco	13
3.3.2. Determinación de la humedad absoluta a partir de la temperatura de bulbo húmedo y la temperatura de bulbo seco	13
3.4. Secado de un lecho empacado	14
3.4.1. Cinética del secado de un lecho empacado	16
3.4.2. Coeficientes de transferencia de calor y masa	17
3.5. Modelo matemático para predecir las curvas teóricas de secado	17
3.6. Árbol de nim	20

3.6.1. Características generales del árbol de nim	20
3.6.2. Productos derivados	20
IV. Material y método	24
4.1. Material	24
4.1.1. Semilla y solventes	24
4.1.2. Descripción del equipo experimental	24
4.2. Método	26
4.2.1. Condiciones experimentales	26
4.2.2. Diseño experimental	27
4.2.3. Descripción de los experimentos	31
4.2.4. Evaluación de los experimentos	34
V. Presentación y discusión de resultados	37
5.1. Introducción	37
5.2. Cinética de secado	37
5.2.1. Agua	38
5.2.1.1. Influencia de la velocidad del aire	38
5.2.1.2. Influencia de la temperatura del aire	39
5.2.1.3. Influencia del tamaño de partícula	40
5.2.1.4. Influencia de la masa del material	40
5.2.1.5. Períodos de secado	41
5.2.2. Etanol	47
5.2.2.1. Influencia de la velocidad del aire	47
5.2.2.2. Influencia de la temperatura del aire	47
5.2.2.3. Influencia del tamaño de partícula	48
5.2.2.4. Influencia de la masa del material	48
5.2.2.5. Períodos de secado	49
5.2.3. Hexano	54
5.2.3.1. Influencia de la velocidad del aire	54
5.2.3.2. Influencia de la temperatura del aire	54
5.2.3.3. Influencia del tamaño de partícula	54
5.2.3.4. Influencia de la masa del material	55
5.2.3.5. Períodos de secado	55
5.2.4. Análisis estadístico de los resultados	60

5.3. Perfiles de temperatura	61
5.4. Curvas de secado teóricas a partir del modelo exponencial	87
VI. Conclusiones	105
VII. Recomendaciones	107
VIII. Nomenclatura	108
IX. Referencias	113
Apéndices	117

Lista de figuras y tablas

Figura	Página
Figura 3.1. Curva de secado	5
Figura 3.2. Curva de velocidad de secado	6
Figura 3.3. Balance de materia	12
Figura 3.4. Secado de un lecho empacado	15
Figura 3.5. Esquema de procesamiento de nim IOSA	22
Figura 3.6. Esquema de producción de formulaciones comerciales	23
Figura 4.1. Equipo Experimental	26
Figura 4.2. Ubicación de dispositivos de medición de las propiedades del aire exhausto	33
Figura 5.1. Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de semillas de nim humedecidas con agua a temperatura $T=60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m=0.40\text{ Kg}$	43
Figura 5.2. Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de semillas de nim humedecidas con agua a temperatura $T=60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m=0.80\text{ Kg}$	43
Figura 5.3. Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con agua a temperatura $T=60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m=0.40\text{ Kg}$	44
Figura 5.4. Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con agua a temperatura $T=60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m=0.80\text{ Kg}$	44
Figura 5.5. Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de semillas de nim humedecidas con agua a temperatura $T=110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m=0.40\text{ Kg}$	45
Figura 5.6. Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de semillas de nim humedecidas con agua a temperatura $T=110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m=0.80\text{ Kg}$	45
Figura 5.7. Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con agua a temperatura $T=110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m=0.40\text{ Kg}$	46
Figura 5.8. Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con agua a temperatura $T=110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m=0.80\text{ Kg}$	46
Figura 5.9. Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de semillas de nim humedecidas con etanol a temperatura $T=$	50

60oC y una masa $m= 0.40$ Kg	
Figura 5.10. Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de semillas de nim humedecidas con etanol a temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80$ Kg	50
Figura 5.11. Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con etanol a temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40$ Kg	51
Figura 5.12. Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con etanol a temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80$ Kg	51
Figura 5.13. Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de semillas de nim humedecidas con etanol a temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40$ Kg	52
Figura 5.14. Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de semillas de nim humedecidas con etanol a temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80$ Kg	52
Figura 5.15. Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con etanol a temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40$ Kg	53
Figura 5.16. Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con etanol a temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80$ Kg	53
Figura 5.17. Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de semillas de nim humedecidas con hexano a temperatura $T= 60\text{oC}$ y una masa $m= 0.40$ Kg	56
Figura 5.18. Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de semillas de nim humedecidas con hexano a temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80$ Kg	57
Figura 5.19. Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con hexano a temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40$ Kg	57
Figura 5.20. Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con hexano a temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80$ Kg	58
Figura 5.21. Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de semillas de nim humedecidas con hexano a temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40$ Kg	58
Figura 5.22. Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de semillas de nim humedecidas con hexano a temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80$ Kg	59
Figura 5.23. Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado	59

de hojuelas de nim humedecidas con hexano a temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40\text{ Kg}$

- Figura 5.24. Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con hexano a temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80\text{ Kg}$ 60
- Figura 5.25. Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con agua a velocidad $v= 0.80\text{ m/s}$, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40\text{ Kg}$ 64
- Figura 5.26. Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con agua a velocidad $v= 0.80\text{ m/s}$, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80\text{ Kg}$ 64
- Figura 5.27. Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con agua a velocidad $v= 0.80\text{ m/s}$, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40\text{ Kg}$ 65
- Figura 5.28. Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con agua a velocidad $v= 0.80\text{ m/s}$, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80\text{ Kg}$ 65
- Figura 5.29. Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con agua a velocidad $v= 0.80\text{ m/s}$, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40\text{ Kg}$ 66
- Figura 5.30. Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con agua a velocidad $v= 0.80\text{ m/s}$, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80\text{ Kg}$ 66
- Figura 5.31. Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con agua a velocidad $v= 0.80\text{ m/s}$, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40\text{ Kg}$ 67
- Figura 5.32. Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con agua a velocidad $v= 0.80\text{ m/s}$, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80\text{ Kg}$ 67
- Figura 5.33. Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con agua a velocidad $v= 1.40\text{ m/s}$, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40\text{ Kg}$ 68
- Figura 5.34. Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con agua a velocidad $v= 1.40\text{ m/s}$, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80\text{ Kg}$ 68
- Figura 5.35. Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con agua a velocidad $v= 1.40\text{ m/s}$, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40\text{ Kg}$ 69
- Figura 5.36. Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con agua a velocidad $v= 1.40\text{ m/s}$, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80\text{ Kg}$ 69

Figura 5.37. Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con agua a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40$ Kg	70
Figura 5.38. Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con agua a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80$ Kg	70
Figura 5.39. Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con agua a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40$ Kg	71
Figura 5.40. Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con agua a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80$ Kg	71
Figura 5.41. Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40$ Kg	72
Figura 5.42. Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80$ Kg	72
Figura 5.43. Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40$ Kg	73
Figura 5.44. Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80$ Kg	73
Figura 5.45. Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40$ Kg	74
Figura 5.46. Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80$ Kg	74
Figura 5.47. Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40$ Kg	75
Figura 5.48. Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80$ Kg	75
Figura 5.49. Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40$ Kg	76
Figura 5.50. Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v= 1.40$ m/s,	76

temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80\text{ Kg}$	
Figura 5.51. Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v= 1.40\text{ m/s}$, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40\text{ Kg}$	77
Figura 5.52. Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v= 1.40\text{ m/s}$, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80\text{ Kg}$	77
Figura 5.53. Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v= 1.40\text{ m/s}$, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40\text{ Kg}$	78
Figura 5.54. Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v= 1.40\text{ m/s}$, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80\text{ Kg}$	78
Figura 5.55. Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v= 1.40\text{ m/s}$, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40\text{ Kg}$	79
Figura 5.56. Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v= 1.40\text{ m/s}$, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80\text{ Kg}$	79
Figura 5.57. Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 0.80\text{ m/s}$, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40\text{ Kg}$	80
Figura 5.58. Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 0.80\text{ m/s}$, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80\text{ Kg}$	80
Figura 5.59. Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 0.80\text{ m/s}$, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40\text{ Kg}$	81
Figura 5.60. Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 0.80\text{ m/s}$, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80\text{ Kg}$	81
Figura 5.61. Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 0.80\text{ m/s}$, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40\text{ Kg}$	82
Figura 5.62. Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 0.80\text{ m/s}$, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80\text{ Kg}$	82
Figura 5.63. Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 0.80\text{ m/s}$, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40\text{ Kg}$	83
Figura 5.64. Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de	83

nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80$ Kg	
Figura 5.65. Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40$ Kg	84
Figura 5.66. Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80$ Kg	84
Figura 5.67. Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40$ Kg	85
Figura 5.68. Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80$ Kg	85
Figura 5.69. Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40$ Kg	86
Figura 5.70. Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80$ Kg	86
Figura 5.71. Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40$ Kg	87
Figura 5.72. Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80$ Kg	87
Figura 5.73. Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de hojuelas de nim humedecidas con agua a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.40$ Kg	89
Figura 5.74. Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de semillas de nim humedecidas con agua a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.40$ Kg	89
Figura 5.75. Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de semillas de nim humedecidas con agua a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.80$ Kg	90
Figura 5.76. Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de hojuelas de nim humedecidas con agua a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.40$ Kg	90

Figura 5.77. Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de hojuelas de nim humedecidas con agua a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.40$ Kg	91
Figura 5.78. Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de semillas de nim humedecidas con agua a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.40$ Kg	91
Figura 5.79. Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de semillas de nim humedecidas con agua a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.80$ Kg	92
Figura 5.80. Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de hojuelas de nim humedecidas con agua a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.40$ Kg	92
Figura 5.81. Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de hojuelas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.40$ Kg	93
Figura 5.82. Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de semillas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.40$ Kg	93
Figura 5.83. Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de semillas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.80$ Kg	94
Figura 5.84. Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de hojuelas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.40$ Kg	94
Figura 5.85. Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de hojuelas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.40$ Kg	95
Figura 5.86. Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de semillas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.40$ Kg	95
Figura 5.87. Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de semillas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y masa $m=$	96

0.80 Kg

- Figura 5.88. Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de hojuelas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.40$ Kg 96
- Figura 5.89. Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de hojuelas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.40$ Kg 97
- Figura 5.90. Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de semillas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.40$ Kg 97
- Figura 5.91. Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de semillas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.80$ Kg 98
- Figura 5.92. Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de hojuelas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.40$ Kg 98
- Figura 5.93. Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de hojuelas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.40$ Kg 99
- Figura 5.94. Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de semillas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.40$ Kg 99
- Figura 5.95. Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de semillas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.80$ Kg 100
- Figura 5.96. Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de hojuelas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.40$ Kg 100
- Figura 5.97. Efecto de la velocidad y la temperatura del aire sobre la difusividad efectiva de un lecho de 0.40 Kg de hojuelas de nim humedecidas con agua 103
- Figura 5.98. Efecto de la velocidad y la temperatura del aire sobre la difusividad efectiva de un lecho de 0.40 Kg de hojuelas de nim humedecidas con etanol 103

Figura 5.99. Efecto de la velocidad y la temperatura del aire sobre la difusividad efectiva de un lecho de 0.40 Kg de hojuelas de nim humedecidas con hexano	104
Figura A.1. Esquema del secado en un lecho empacado	118
Figura C.1. Curva de calibración de la velocidad promedio del aire	122
Figura E.1. Gráfico de valores individuales de velocidad de secado para cada solvente	128
Figura E.2. Gráfico de caja y bigotes para velocidad de secado correspondiente a cada solvente	128
Figura F.1. Gráfico de valores individuales de humedad relativa correspondiente a cada experimento	129
Figura F.2. Gráfico de caja y bigotes de humedad relativa correspondiente a cada experimento	129
Figura G.1. Árbol de nim	130
Figura G.2. Frutos del árbol de nim	130
Figura G.3. Semillas de nim con endocarpio	131
Figura G.4. Semillas de nim sin endocarpio	131
Figura H.1. Semillas de nim	132
Figura H.2. Hojuelas de nim	132
Figura H.3. Equipo experimental	133
Figura H.4. Lecho empacado de semillas de nim en la columna de vidrio del equipo experimental	133
Figura H.5. Ubicación de los termopares a diversas profundidades en el interior de la columna de vidrio	134
Figura H.6. Controlador de temperatura Eurotherm	134
Figura H.7. Muestras para determinar la humedad inicial dentro de un horno	135
 Tabla	
Tabla 3.1. Resumen de ecuaciones para el cálculo de coeficientes de transferencia de calor y masa	17
Tabla 4.1. Factores independientes	28
Tabla 4.2. Factor dependiente	28
Tabla 4.3 Diseño experimental para el solvente agua	29
Tabla 4.4. Diseño experimental para el solvente etanol	30
Tabla 4.5. Diseño experimental para el solvente hexano	31

Tabla 5.1. Difusividad efectiva	102
Tabla C.1. Datos de la tubería y del aire	122
Tabla C.2. Relación de la frecuencia de rotación del ventilador con la velocidad máxima y promedio del aire	122
Tabla D.1. Densidad aparente promedio	124
Tabla D.2. Volumen del lecho	124
Tabla D.3. Porosidad promedio del lecho	124
Tabla E.1. Análisis de varianza para el solvente agua	125
Tabla E.2. Análisis de varianza para el solvente etanol	126
Tabla E.3. Análisis de varianza para el solvente hexano	127

I. Introducción

La agricultura moderna se ha caracterizado por el conocimiento profundo de las características del suelo, la mejora constante de las plantas por selección, la mecanización de las faenas y por el uso de abonos y de productos químicos destinados a proteger las cosechas contra los insectos y las malas hierbas. Desgraciadamente, esta última característica se ha relacionado con graves problemas, tales como la reducción de especies benéficas en las plantas, así como la contaminación del suelo y de las fuentes hídricas, siendo esto la causa fundamental de severas enfermedades que se han venido desarrollando, en los últimos años, sobre todo en los seres humanos que residen en zonas rurales.

Debido a la gran cantidad de inconvenientes causados por estos insecticidas artificiales, se ha volcado el interés de los investigadores hacia la producción de insecticidas botánicos, los cuales se caracterizan por ser biodegradables, por lo que no simbolizan focos de acumulación de residuos tóxicos en el suelo, ni en las fuentes hídricas.

Nicaragua es un país eminentemente agrícola, por lo que, no han tardado en evidenciarse los estragos causados por el uso de estas sustancias. A causa de esto, a partir de la década de los ochenta se empezó a implementar una serie de proyectos cuyo principal objetivo ha sido la producción de insecticidas botánicos. Adquirió particular importancia la producción de insecticida a partir de las semillas del árbol de nim, *Azadirachta indica* A. Juss, originario de la India y cuyas plantaciones se empezaron a introducir en el país durante dicha década (Espinosa, 2000)

Con el objetivo de extraer a escala semi-industrial el insecticida biodegradable se empezaron a realizar estudios relacionados a las etapas de lixiviación y secado involucradas en el proceso. Destacan dentro de los estudios relacionados a la lixiviación aquellos realizados por Espinosa (1993), Ramírez (1996), Vallecillo (1998) y Nyberg (2005).

Los estudios relacionados con el proceso de secado fueron enfocados tanto a la remoción de agua como a la remoción de los solventes, para llevar a cabo las dos etapas de lixiviación.

El estudio de Carrillo (1996) estuvo orientado al proceso de secado en un secador de lecho deslizante para remover la humedad de las semillas luego de su cosecha, con el objetivo de alargar su vida útil evitando la proliferación de hongos. Un aporte importante de este estudio fue el valor máximo de la temperatura a la cual puede ser sometido el nim para evitar degradar su principio activo, siendo ésta 60°C.

Los estudios de Cubillo (1998) y García (1999) se centraron en el análisis de la cinética de secado de semillas de nim molidas, resultantes de las dos etapas sucesivas de lixiviación, en un secador de túnel. El estudio de Espinosa et al. (2002) también estuvo enfocado en el análisis de la cinética de secado de semillas de nim

molidas resultantes de las dos etapas de lixiviación, salvo que en este caso se utilizó un secador de lecho fluidizado.

En la actualidad, el proyecto UNI-Asdi/SAREC-FIQ está desarrollando estudios sobre la remoción de solventes a partir de los sólidos exhaustos producidos durante la lixiviación semi-continua del aceite y del insecticida de nim, utilizando para este fin lechos empacados en columnas. Esto constituye una alternativa al proceso por lotes que se ha venido implementando, en el cual se utilizan tanques agitados y enchaquetados para obtener una solución etanólica del insecticida del nim.

La ventaja de la lixiviación semi-continua se centra en evitar las pérdidas de solventes debido a que la columna no presenta partes móviles, tales como los agitadores en los tanques. Otra ventaja de contar con un lecho empacado, es que se puede llevar a cabo en el mismo equipo el proceso de secado, mediante el paso de forma transversal de una corriente de aire caliente, con el objetivo de remover los solventes remanentes y poderlos reutilizar. Las semillas exhaustas podrían ser destinadas como alimento animal o bien como abono natural, debido a que el proceso de secado garantiza la remoción de estos solventes eficientemente.

Los estudios de Nyberg (2005) y Cassirer y Rosengren (2008) fueron los primeros en los cuales se analizó la cinética de secado de semillas y hojuelas de nim empacadas en una columna de vidrio a la cual se introducía una corriente transversal de aire. El primero fue un estudio incipiente del secado multicomponente de las hojuelas de nim humedecidas con los dos solventes requeridos para llevar a cabo la lixiviación del aceite y el insecticida paralelamente. El segundo implicó el estudio de la influencia de la velocidad del aire, temperatura del aire y tamaño de partícula en la cinética del secado de semillas de nim humedecidas separadamente con agua y etanol.

La presente investigación comprende el estudio de la influencia de la velocidad del aire, temperatura del aire, tamaño de partícula y masa de material dentro de la columna, sobre la velocidad de secado de semillas de nim humedecidas separadamente con hexano y etanol. Asimismo comprende el estudio del comportamiento de la cinética del secado de semillas de nim humedecidas con agua para analizar la viabilidad de remover humedad en un secador de este tipo.

Esta investigación también involucra el análisis del comportamiento de los perfiles de temperatura generados a lo largo del lecho durante el proceso de secado. Además se muestra una comparación entre las curvas de secado obtenidas experimentalmente y las curvas de secado originadas mediante un modelo matemático de tipo exponencial basado en la difusión efectiva.

II. Objetivos

2.1. Objetivo General

Estudiar teórica y experimentalmente la cinética del secado de semillas de nim humedecidas con diversos solventes al utilizar un secador de lecho empacado.

2.2. Objetivos Especificos

1. Analizar el comportamiento de la cinética del secado de las semillas de nim humedecidas con agua.
2. Analizar el comportamiento de la cinética del secado de las semillas de nim humedecidas con hexano y etanol.
3. Analizar la influencia de la velocidad del aire, temperatura del aire, tamaño de partícula y masa de material sobre la cinética del secado.
4. Analizar el perfil de temperatura originado a lo largo del lecho durante el proceso de secado.
5. Predecir las curvas de secado teóricas mediante un modelo matemático basado en la difusión efectiva y compararlas con las curvas experimentales.

III. Marco Teórico

3.1. Generalidades

El proceso de secado describe la remoción térmica de sustancias volátiles por adición de su calor latente de evaporación. El principal objetivo es obtener un producto seco y en algunas ocasiones recuperar un solvente costoso, inflamable o tóxico, aplicando luego un proceso de condensación. De esta forma se logra reducir costos de producción, se disminuyen los riesgos de accidentes durante la manipulación de este material y se evita la contaminación ambiental.

El secado de sólidos involucra dos procesos fundamentales y simultáneos:

- La transferencia de energía, comúnmente en forma de calor, del medio circundante hacia el sólido para evaporar la humedad superficial. La evaporación es controlada por la difusión del vapor desde la superficie del sólido hacia los alrededores mediante una película fina de aire en contacto con la superficie (Mujumdar, 1995)
- La transferencia de la humedad interna, ya sea en forma líquida o en forma de vapor, hacia la superficie del sólido y su subsecuente evaporación debido al primer proceso. El movimiento a través del sólido resulta debido a un gradiente de concentración que depende de las características del mismo (Perry y Green, 1997)

La transferencia de energía hacia el sólido húmedo puede ocurrir como resultado de un proceso de convección, conducción o radiación. El método más común de secado es el convectivo, el cual consiste en exponer el material húmedo a una corriente de aire seco a una temperatura dada, el cual suministrará la energía necesaria para evaporar la humedad del sólido.

Durante el transcurso en que el aire se mantiene en contacto con la superficie del sólido, ocurrirá la transferencia de vapor hasta que la presión parcial del vapor en el aire iguale la presión de vapor de la humedad del sólido, alcanzándose el equilibrio y finalizando de esta forma el proceso de secado.

3.2. Cinética de secado

La cinética de secado involucra el estudio del cambio en el contenido promedio de la humedad y la temperatura promedio del sólido con respecto al tiempo. La intensidad del secado que refleja la relación entre la variación del contenido de humedad y el tiempo se encuentra principalmente influida por los parámetros de proceso, tales como la temperatura, la humedad, la velocidad del aire y la presión total (Strumillo y Kudra, 1986)

Los datos son obtenidos en el laboratorio, generalmente bajo condiciones constantes. Según el estudio de Belhamri et al. (2006) el secado es un fenómeno que presenta inercia y responde con cierto retraso a cualquier variación en las

condiciones externas, lo cual se ve reflejado en las curvas de velocidad de secado generadas en un proceso en el cual se utilizan dos temperaturas diferentes.

3.2.1. Curva de secado

Cuando un sólido es secado experimentalmente, datos relacionados al contenido de humedad con respecto al tiempo son obtenidos. Estos datos son graficados para originar una curva de secado similar a la mostrada en la Figura 3.1.

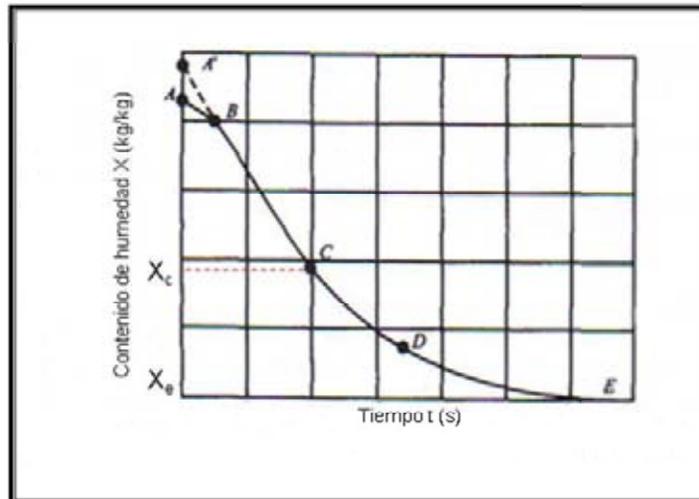


Figura 3.1. Curva de secado

Esta curva representa el caso general en que un sólido pierde humedad primero por evaporación a partir de una superficie saturada, seguido por un período de evaporación a partir de una superficie saturada de área gradualmente decreciente y finalmente, el período de evaporación de la humedad interna del sólido (Perry y Green, 1997)

3.2.2. Curva de velocidad de secado

El objetivo de trazar la curva de secado es determinar la velocidad de secado definida por la disminución de la humedad del material en un intervalo de tiempo.

La variación de la velocidad de secado con respecto al contenido de humedad y el tiempo es obtenida por diferenciación.

Los valores de velocidad de secado como una función del tiempo se calculan de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$N_v = -\frac{m_s}{A_{\text{sup}}} \frac{dX}{dt} \quad (3.1)$$

Donde m_s es la masa de sólido seco utilizada y A_{sup} es el área superficial expuesta al secado.

Cuando se lleva a cabo un proceso de secado de partículas empacadas en una columna, resulta complicado determinar el valor del área superficial debido a que sería necesario conocer la magnitud de las áreas superficiales individuales y realizar la sumatoria de éstas para calcular el área superficial total. En estos casos, se sustituye el área superficial por el volumen del lecho y se calcula la velocidad de secado volumétrica de acuerdo a la ecuación:

$$N_v = -\frac{m_s}{V} \frac{dX}{dt} \quad (3.2)$$

La curva de velocidad de secado se obtiene graficando N_v en función del contenido de humedad X , según se muestra en la Figura 3.2.

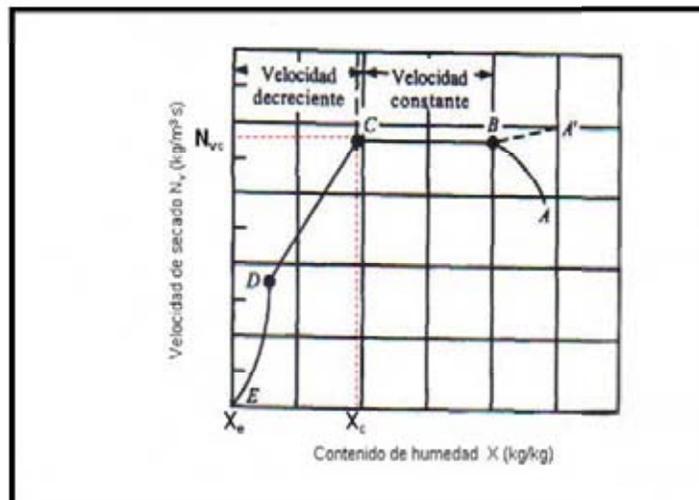


Figura 3.2. Curva de velocidad de secado

La curva de velocidad de secado ilustra que el proceso de secado no es un proceso continuo en el cual un mecanismo simple lo controla todo, sino que éste ocurre según una serie de etapas individuales. Además esta gráfica presenta la ventaja de mostrar la duración de cada una de estas etapas (Perry y Green, 1997)

3.2.3. Periodos de secado

- **Período de calentamiento**

La sección AB de ambas curvas representa el período de calentamiento, durante el cual es suministrado calor sensible al sólido y a la humedad contenida hasta que son alcanzadas las condiciones de proceso. La velocidad de evaporación

incrementa dramáticamente durante este período, lográndose remover la mayor cantidad de humedad superficial.

- **Período de velocidad constante**

La sección BC de ambas curvas representa el período de velocidad constante. El movimiento de la humedad dentro del sólido es lo suficientemente rápido para mantener la superficie del sólido en condiciones saturadas y la velocidad de secado es controlada por la velocidad de transferencia de calor a la superficie.

El secado procede por la difusión de vapor a través de la película fina de líquido que rodea a la superficie del sólido y luego hacia el medio circundante. La velocidad de transferencia de masa balancea la velocidad de transferencia de calor y la temperatura de la superficie saturada permanece constante, siendo muchas veces igual a la temperatura de bulbo húmedo, es por esta razón que durante este período de secado se puede utilizar aire a temperaturas más altas.

Además, durante esta etapa se alcanza la máxima velocidad de secado de todo el proceso N_{max} .

El mecanismo de remoción de humedad es equivalente a la evaporación que ocurriría a partir de un cuerpo de agua y es esencialmente independiente de la naturaleza del sólido, siendo las únicas variables que lo afectan el coeficiente de transferencia de calor y masa, el área expuesta al agente secante y la diferencia en la temperatura o humedad entre la corriente de aire y la superficie húmeda del sólido (Perry y Green, 1997)

El período de velocidad constante desaparece cuando se secan sólidos higroscópicos o bien cuando el secado es controlado internamente por el sólido (Strumillo y Kudra, 1986)

- **Período de velocidad decreciente**

Las secciones CD y DE representan el período de velocidad decreciente, el cual inicia cuando se alcanza el contenido de humedad crítico X_c en el punto C.

La sección CD se conoce como período de secado superficial no saturado, en el cual la superficie ya no está totalmente mojada, y la porción mojada comienza a disminuir durante el período de velocidad decreciente hasta que la superficie queda seca en su totalidad en el punto D. Generalmente la velocidad de secado depende de factores que afectan la difusión de la humedad a partir de la superficie del sólido y de aquellos que afectan la velocidad de movimiento de la humedad interna.

La sección DE se conoce como período de movimiento de humedad interna, en el cual la velocidad de secado es gobernada por la velocidad de movimiento de humedad interna y la influencia de las variables externas decrece. Este período

determina el tiempo total de secado necesario para lograr disminuir el contenido de humedad (Perry y Green, 1997)

El punto E corresponde al contenido de humedad en el equilibrio X_{eq} , momento en el cual el proceso de secado se detiene.

Debido a que el efecto de enfriamiento causado por la evaporación cesa, la temperatura de la superficie del material gradualmente incrementa hasta casi alcanzar la temperatura del aire (Strumillo y Kudra, 1986)

3.2.4. Curva característica de secado

Cuando las curvas de velocidad de secado son determinadas para un sólido dado a las mismas condiciones, las curvas parecen ser geoméricamente similares y son simplemente una función del grado en que ocurre el secado.

El método propuesto por Van Meel establece que una sola curva de secado característica puede ser originada para un material que es secado. Esta curva será obtenida graficando la velocidad relativa contra el contenido de humedad característico. La velocidad relativa describe la velocidad de secado en relación a la velocidad de secado máxima obtenida durante el período de velocidad constante; y el contenido de humedad característico describe el grado de humedad de un cuerpo en relación al contenido de humedad crítico (Keey, 1992)

La velocidad relativa es independiente de las condiciones externas de secado y depende únicamente del contenido de humedad característico (Valentas et al., 1997). Es por esto que, si se logra establecer la curva característica de secado a determinadas condiciones, es posible estimar las velocidades de secado entre los niveles de humedad especificados para cualquier conjunto de condiciones de proceso.

3.2.5. Variables que afectan la cinética del secado

Existen diversas variables que juegan un papel muy importante durante los procesos de secado. La cinética del secado es influenciada notablemente tanto por condiciones internas como por condiciones externas.

Dentro de las condiciones externas, las principales variables son la temperatura, la humedad, la velocidad y la dirección del flujo de aire, la forma física del sólido, el grado de agitación deseado y el método para soportar el sólido durante el proceso de secado.

Las condiciones externas son básicamente importantes durante la etapa inicial del proceso, en la cual la humedad superficial es removida.

El efecto de estos parámetros sobre la velocidad de secado puede ser reflejado en un modelo simplificado. Asumiendo que todo el calor suministrado a una partícula

esférica del material es consumido para evaporar la humedad y que la partícula es suficientemente pequeña para despreciar gradientes de temperatura o humedad, el modelo resultante se expresa en la siguiente ecuación (Strumillo y Kudra, 1986)

$$N = \frac{6h\psi(T_g - T_s)}{\rho_s d_p \lambda} \quad (3.3)$$

Donde, N es la intensidad del secado, h es el coeficiente de transferencia de calor, ψ es un factor de forma, T_g es la temperatura del aire, T_s es la temperatura superficial del sólido, ρ_s es la densidad del sólido, d_p es el tamaño de partícula y λ es el calor latente de evaporación.

Según la ecuación (3.3) se puede establecer que la intensidad del secado incrementa si se disminuye el tamaño de partícula. De igual forma, se incrementa si se produce un aumento en la temperatura del aire así como en la velocidad de transferencia de calor, determinada por el coeficiente de transferencia de calor.

También la velocidad del aire v influye sobre la intensidad del secado según se muestra en la ecuación sucesiva (Strumillo y Kudra, 1986)

$$N \approx T_g \frac{v^{0.5}}{d_p^{1.5}} \quad (3.4)$$

La ecuación (3.4) deja perfectamente claro que la intensidad del secado es afectada principalmente por el tamaño de partícula.

La intensidad de secado es equivalente a la velocidad de secado descrita por las ecuaciones (3.1) y (3.2), refiriéndose en este caso a una relación entre la masa de sólido seco con respecto a la masa húmeda, por lo que su unidad de medición es s^{-1} .

3.2.6. Relaciones básicas del secado convectivo

La ecuación de transferencia de masa para un compuesto volátil a partir de la superficie de un material en un medio gaseoso se define matemáticamente según la ecuación:

$$N_v = M_v f K_y (y_s - y_g) \quad (3.5)$$

Donde M_v es la masa molecular del compuesto volátil, f es la velocidad relativa, y_s es la fracción molar del compuesto volátil en la superficie de evaporación, y_g es la fracción molar del compuesto volátil en la masa de aire y K_y es el coeficiente convectivo de transferencia de masa.

La fracción y_g está relacionada con la presión de vapor por la expresión:

$$y_g = \frac{P_v}{P} \quad (3.6)$$

Donde P_v es la presión de vapor del componente volátil en el sólido y P es la presión total del sistema.

La humedad en la superficie de evaporación depende de si el cuerpo es higroscópico o no higroscópico.

Cuando el material está saturado, se comporta como no higroscópico. La presión de vapor es igual a la presión de saturación del vapor P_{vo} , la cual es función de la temperatura de saturación T_{sat} según se muestra en la ecuación:

$$P_{vo} = P_v T_{sat} \quad (3.7)$$

La fracción molar y_s se calcula de acuerdo a la ecuación:

$$y_s = \frac{P_{vo}}{P} \quad (3.8)$$

Si el material es higroscópico, la presión de vapor se calcula de acuerdo a la ecuación:

$$P_v = H_r P_{vo} \quad (3.9)$$

Donde H_r es la humedad relativa determinada por la isoterma de equilibrio, es decir, es función de la humedad de equilibrio del sólido, según se define en la ecuación siguiente:

$$H_r = H_r(X_{eq}) \quad (3.10)$$

De tal forma que, la fracción molar y_s se calcula de acuerdo a la ecuación:

$$y_s = \frac{H_r P_{vo}}{P} \quad (3.11)$$

De la ecuación (3.6) se puede definir una expresión de fracción másica para el contenido de compuesto volátil:

$$y_g = \frac{P_v}{P} \left(\frac{M_v}{M_a} \right) \quad (3.12)$$

Donde M_v y M_a son las masas moleculares del compuesto volátil y del aire respectivamente, y_g es la humedad sobre base húmeda.

Si se toma en cuenta que la presión total del sistema es la suma de las presiones parciales del aire y la humedad contenida, como $P=P_a+P_v$, de donde $P_a=P-P_v$, se puede expresar el contenido de humedad por unidad de masa de aire seco de acuerdo a la ecuación:

$$Y = \frac{P_v}{P - P_v} \left(\frac{M_v}{M_a} \right) \quad (3.13)$$

Con respecto a la transferencia de energía durante el proceso de secado, el flujo de calor que alcanza la superficie del sólido, tomando en consideración que el proceso de secado ocurre por convección pura, obviando las formas secundarias de transferencia de calor, se calcula de acuerdo a la ecuación siguiente:

$$q_c = h (T_g - T_s) \quad (3.14)$$

Donde q_c es el flujo de calor convectivo por unidad de superficie, h es el coeficiente de transferencia de calor por convección, T_g es la temperatura de la masa de aire y T_s es la temperatura en la superficie de evaporación del sólido.

El calor requerido para evaporar la humedad, despreciando el calor sensible de la humedad evaporada, se calcula de acuerdo a la ecuación:

$$Q = N_v \lambda \quad (3.15)$$

3.3. Balance de materia

La variación de la humedad de un material, que es sometido a un proceso de secado, en algunas ocasiones no puede determinarse directamente de forma experimental, tal es el caso de lo que ocurre al secar un material particulado dentro de una columna de vidrio a través de la cual se hace pasar una corriente transversal de aire, lo cual ha sido ilustrado en la Figura 3.3.

Si se tomara una muestra de material, la medición no sería representativa, ya que la humedad varía con respecto a la profundidad. En estos casos se debe medir alguna propiedad del aire a la salida de la columna que permita llevar a cabo el cálculo de la variación de la humedad absoluta con respecto al tiempo y luego aplicar el balance de materia correspondiente para realizar el cálculo de la variación de la humedad del sólido también con respecto al tiempo.

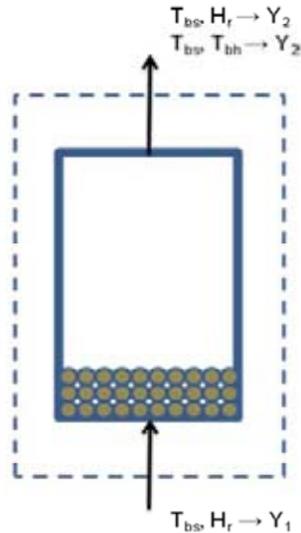


Figura 3.3. Balance de materia

La siguiente ecuación muestra el balance másico aplicado a un proceso de secado:

$$m_a(Y_2 - Y_1) = m_s \frac{dX}{dt} \quad (3.16)$$

Donde m_a es el flujo másico de aire seco, m_s es la masa de sólido seco, Y_1 y Y_2 son las humedades absolutas del aire a la entrada y salida del secador respectivamente y dX/dt es la variación del contenido de humedad del sólido con respecto al tiempo.

El valor de la humedad del aire a la salida del secador varía con respecto al tiempo, es decir, $Y_2=Y(t)$. Si también se considera que la humedad absoluta del aire a la entrada es igual a cero durante todo el proceso, la ecuación (3.16) puede escribirse de la siguiente manera:

$$m_a Y(t) dt = m_s dX \quad (3.17)$$

Si se toma en cuenta que debido a la humidificación progresiva de la sílica dentro de la torre de adsorción, la humedad Y_1 aumentará un poco con respecto al tiempo, la humedad removida al sólido será la diferencia entre el contenido de humedad de entrada y salida, según se muestra en la ecuación:

$$X_2 = X_1 - \int_1^2 \frac{m_a}{m_s} [Y_2(t) - Y_1(t)] dt \quad (3.18)$$

La integración de la ecuación (3.18) origina la siguiente ecuación:

$$X_2 = X_1 - \frac{m_a}{m_s} \Delta t \sum_{i=0}^i [Y_2 - Y_1]_i \quad (3.19)$$

Donde X_1 es el contenido de humedad inicial del sólido. Cuando se utiliza esta ecuación se debe tener en cuenta que el valor X_2 será el nuevo valor X_1 cuando $i=2$ y así sucesivamente (Gamero, 1993)

3.3.1. Determinación de la humedad absoluta a partir de la humedad relativa y la temperatura de bulbo seco

Durante la fase experimental se pueden recopilar datos de humedad relativa con respecto al tiempo utilizando un sensor apropiado. La humedad absoluta es calculada utilizando la ecuación:

$$Y_2 = \frac{P_v}{P - P_v} \frac{M_v}{M_a} \quad (3.20)$$

Donde P_v es la presión parcial del vapor en la corriente de aire, la cual es calculada de acuerdo a la ecuación (3.9)

La presión de saturación del vapor P_{vo} se puede calcular mediante la ecuación empírica (Reids et al., 1987):

$$P_{vo} = 2.18 \exp \left[\frac{1}{1-B} (aB + bB^{1.5} + cB^3 + dB^6) \right] \quad (3.21)$$

Donde los valores de a, b, c y d son constantes empíricas: $a=7.76451$, $b=1.45838$, $c=-2.77580$ y $d=-1.23303$. B se calcula de la siguiente forma:

$$B = 1 - T_r \quad (3.22)$$

Donde T_r es la temperatura reducida de operación que se calcula dividiendo la temperatura de bulbo húmedo entre la temperatura crítica.

3.3.2. Determinación de la humedad absoluta a partir de la temperatura de bulbo húmedo y la temperatura de bulbo seco

Las temperaturas de bulbo húmedo y seco son propiedades de medición directa durante la fase experimental. La humedad absoluta del aire se puede medir de forma indirecta como función de las temperaturas de bulbo húmedo y seco, de acuerdo a la ecuación:

$$Y_2 = Y_w - \frac{(T_{bs} - T_{bh})}{\lambda} \left(\frac{h}{h_D \rho} \right) \quad (3.23)$$

Donde Y_w es la humedad de saturación, es decir, la humedad en la superficie de la masa sólida a la temperatura T_{bh} , λ es el calor latente de vaporización a la temperatura T_{bh} y el factor $h/h_D\rho$ es una relación de coeficientes convectivos de transferencia de calor y la densidad.

El factor $h/h_D\rho$ es aproximadamente igual a 1 kJ/kg K para los sistemas agua- aire. Para muchos sistemas que involucran aire y líquidos orgánicos, esta relación toma valores alrededor de 1.5 a 2.0 kJ/kg K. Sin embargo, cuando los números de Schmidt y Prandtl para una mezcla vapor- gas son aproximadamente iguales a la unidad, se aplica la relación de Lewis definida según la siguiente ecuación (Coulson y Richardson, 1999)

$$h_D = \frac{h}{C_p \rho_M} \quad (3.24)$$

Donde C_p y ρ_M son el calor específico promedio y la densidad de la fase vapor respectivamente. De tal forma, este factor podrá ser definido de acuerdo a la ecuación:

$$\frac{h}{h_D \rho} = \frac{C_p \rho_M}{\rho} \quad (3.25)$$

El calor de vaporización puede calcularse mediante la ecuación de Watson:

$$\lambda = \left(\frac{B}{1 - T_m} \right)^{0.38} \quad (3.26)$$

Donde T_m es la temperatura reducida normal de ebullición, la cual se calcula dividiendo la temperatura normal de ebullición entre la temperatura crítica, y B se calcula de acuerdo a la ecuación (3.22)

En el estado de saturación, la presión de vapor es igual a la presión de vapor de saturación, realizando esta sustitución en la ecuación (3.20) se puede calcular la humedad de saturación de la siguiente manera:

$$Y_w = \frac{P_{vo}}{P - P_{vo}} \frac{M_v}{M_a} \quad (3.27)$$

La presión de vapor de saturación se calcula de acuerdo a la ecuación (3.21).

3.4. Secado de un lecho empacado

El secado de un lecho empacado es un proceso en el cual aire caliente e insaturado es forzado a atravesar transversalmente un material húmedo y poroso gracias a que

existe una diferencia de presión en el lecho. Con frecuencia, los sólidos granulares se colocan sobre un tamiz, de manera que el gas pase a través del mismo y de los espacios o poros abiertos entre las partículas sólidas.

Se trata de un secado de tipo convectivo, en el cual a medida que el gas pasa a través del lecho poroso, la transferencia de calor tiene lugar, lo cual provee la energía necesaria para evaporar el agua.

La evaporación de la humedad superficial hacia el aire ocurre en una zona relativamente estrecha que se mueve lentamente a través del lecho; a menos que el lecho se caliente internamente, el gas que sale de esta zona está saturado a la temperatura de saturación adiabática del gas entrante. Esta temperatura también es la temperatura superficial de las partículas húmedas. La velocidad de secado es constante mientras la zona esté completamente dentro del lecho. Cuando la zona alcanza al principio o al final del lecho, la velocidad de secado empieza a decaer debido a que el gas ya no sale saturado.

En el caso de lechos delgados compuestos de partículas grandes, desde el principio el aire sale insaturado del lecho, sin embargo, mientras cada una de las superficies de las partículas permanezca completamente húmeda, se tendrá un período de velocidad constante (Treybal, 1988)

La figura 3.4 muestra las zonas que se originan durante el secado de un lecho empacado.

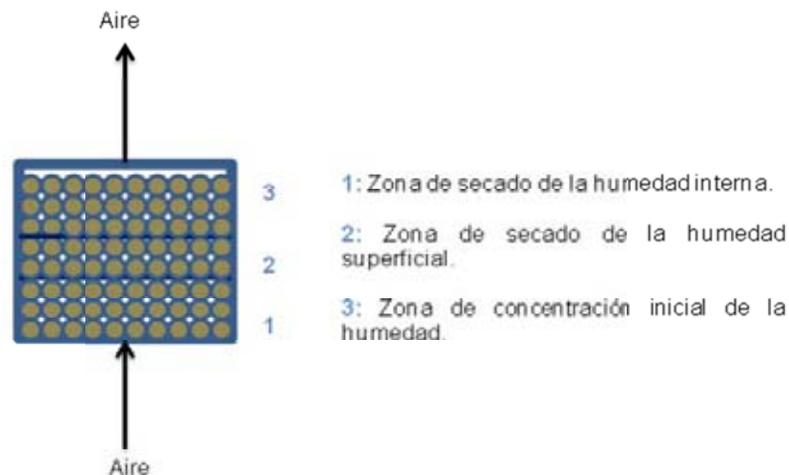


Figura 3.4. Secado de un lecho empacado

Los fenómenos de transporte que ocurren durante el secado de un lecho empacado son complejos, debido a la combinación de los fenómenos de transporte de momento, calor y masa. La presión decrece debido a la fricción entre el aire y paredes, así como las pérdidas de momento debido a las colisiones con las partículas. Las temperaturas del aire y del lecho son afectadas por la transferencia

de calor entre el aire y las partículas y la transferencia de calor con la pared, mientras que el contenido de humedad de las partículas y el aire es afectado por la transferencia de masa entre ellos. El comportamiento del secado puede ser influido por numerosos parámetros tales como, la densidad del sólido, permeabilidad, porosidad e higroscopicidad.

El secado no ocurre de forma uniforme en todo el lecho, pero muy poco varía a lo largo de la dirección de flujo. Esto conduce a concluir que el secado en un lecho empacado no será conveniente para materiales que requieran un grado uniforme de secado (Khan et al., 1988)

Las mediciones de la velocidad del aire dentro del lecho empacado no podrían realizarse sin causar grandes perturbaciones en la estructura. Debido a esta restricción, el método más fácil para medir la distribución de velocidad es a la salida del lecho, considerando luego estas mediciones como representativas del interior del mismo (Negrini et al., 1999)

3.4.1. Cinética del secado de un lecho empacado

Cuando un lecho de partículas húmedas es secado por una corriente transversal de aire, los espacios vacíos entre las partículas usualmente almacenan la mayor parte de la humedad, por lo que los procesos de transporte que ocurren en estos controlan el secado. A pesar que la falta de homogeneidad en el lecho de partículas puede conducir a perfiles de contenido de humedad complejos, la velocidad de secado no es afectada por esas variaciones (Cunningham y Kelly, 1978)

La variación en el tamaño de partícula del lecho, y por tanto de su porosidad, afecta la cinética del secado, provocando la aparición o no de un período de velocidad constante (Belhamri et al., 1992)

Keey (1972) propuso que dos períodos de velocidad decreciente pueden aparecer durante el secado de un medio poroso. Inicialmente, la humedad almacenada en los espacios vacíos será trasladada hacia la superficie por capilaridad, a partir de donde se dará la evaporación. Si este período es lo suficientemente largo, la velocidad de secado alcanzará un valor asintótico menor a la velocidad de evaporación a partir de una superficie líquida libre bajo las mismas condiciones externas de secado. Eventualmente, cuando la humedad de estos espacios prácticamente se haya acabado, este estado no podrá ser conservado y se iniciará el segundo período de velocidad decreciente, en el cual se asume que el vapor de agua se mueve por difusión.

El grosor del lecho incide sobre el valor del punto crítico en las curvas de velocidad de secado. Cuando se tienen velocidades de secado bastante altas o lechos gruesos, el contenido de humedad crítico alcanza un valor constante alto. Por el contrario, el contenido de humedad crítico es bajo cuando el lecho es delgado, manteniéndose una velocidad de secado constante hasta que el material prácticamente se seca (Keey, 1992)

3.4.2. Coeficientes de transferencia de calor y masa

Strumillo y Kudra (1986) establecieron las correlaciones para realizar el cálculo de los factores de transferencia de calor y masa cuando se lleva a cabo el secado de un lecho empacado. En la tabla 3.1 se resumen las ecuaciones que están involucradas en el cálculo de estas correlaciones.

Tabla 3.1. Resumen de ecuaciones para el cálculo de coeficientes de transferencia de calor y masa

Descripción	Ecuación
Correlaciones para realizar el cálculo de los factores de transferencia de calor y masa	$Re < 350, j_H = j_M = 1.82 Re^{-0.51}$ $Re > 350, j_H = j_M = 0.989 Re^{-0.41}$
Número de Reynolds	$Re = \frac{vd_p \rho}{\mu}$
Factor de transferencia de calor	$j_H = \frac{h}{cw} Pr^{\frac{2}{3}}$
Número de Prandtl	$Pr = \frac{c\mu}{k}$
Factor de transferencia de masa	$j_M = \frac{K_y \rho}{w} Sc^{\frac{2}{3}}$
Número de Schmidt	$Sc = \frac{\nu}{D}$

3.5. Modelo matemático para predecir las curvas teóricas de secado

La humedad de un cuerpo sólido puede ser transferida tanto en fase líquida como en fase gaseosa. La difusión es uno de los mecanismos según el cual ocurre esta transferencia, y puede ser descrito como un fenómeno mediante el cual la materia es transportada de una parte a otra del sistema como resultado de movimientos moleculares aleatorios.

La velocidad de difusión es gobernada por la Ley de Fick, la cual fue creada a partir de la analogía existente entre la transferencia de calor por conducción y la transferencia de masa por difusión. Fick estableció las bases cuantitativas de la difusión adoptando la ecuación matemática de la conducción de calor derivada años antes por Fourier. La teoría matemática de la difusión en sustancias isotrópicas está basada en la hipótesis de que la velocidad de transferencia de la sustancia que se difunde a través del área de una sección es proporcional al gradiente de concentración, lo cual está definido de acuerdo con la siguiente ecuación (Crank, 1975)

$$N_v = -D \frac{\partial C}{\partial z} \quad (3.28)$$

Donde N_v es la velocidad de transferencia por unidad de área, C es la concentración de la sustancia sometida a difusión, z es el eje coordenado paralelo a la dirección de transferencia y D es el coeficiente de difusión. En algunos casos, por ejemplo la difusión en soluciones diluidas, el coeficiente de difusión puede ser tomado razonablemente como una constante, sin embargo, en la mayor parte de las sustancias líquidas la difusividad depende fuertemente de la concentración. El signo negativo en la ecuación (3.28) se debe a que la difusión ocurre en la dirección opuesta a la del incremento de la concentración.

Cuando se trata de una placa plana de un sólido humedecido sobre el cual se hace circular de forma paralela una corriente de aire y tomando en consideración una sola dimensión se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{ef} \frac{\partial X}{\partial z} \right) \quad (3.29)$$

Donde z representa la longitud de la coordenada, D_{ef} , en analogía con la ley de difusión de Fick, es el coeficiente de difusividad efectiva.

Las condiciones límites correspondientes a este sistema que sirven para dar solución a la ecuación (3.29) son las siguientes:

$$X = X_0 \quad 0 \leq z \leq H \quad t = 0$$

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

$$X = X_{eq} \quad z = H \quad t > 0$$

Donde X_0 es la humedad inicial, X_{eq} es la humedad en el equilibrio y H es la longitud de la placa plana.

Si se toma la difusividad efectiva como constante y se aplican las condiciones límites, que fueron estipuladas, una solución analítica a la ecuación (3.29) planteada por Crank (1975) es la siguiente:

$$\frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-(2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{ef} t}{H^2} \right] \quad (3.30)$$

Según Hassini et al. (2004) al tomar el primer término de la serie y si se asume que la humedad en el equilibrio es igual a cero, más del 70% de la ecuación queda resuelta, por lo que se puede escribir de la siguiente manera:

$$\frac{X}{X_0} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\pi^2 \frac{D_{ef} t}{H^2}\right) \quad (3.31)$$

Cuando se trata del secado de un lecho de partículas a través del cual se hace pasar una corriente de aire, las condiciones límite no pueden ser definidas de la misma manera, ya que se debe tomar en consideración la difusión que ocurre dentro de los microporos y macroporos.

Nyberg (2005) estableció un modelo matemático en el cual se involucran de forma conjunta los procesos de transferencia de calor y transferencia de masa, estableciendo las condiciones límites tanto para el lecho como para cada partícula individual, esto es mostrado en el apéndice A. Las ecuaciones diferenciales que comprenden este modelo únicamente pueden ser resueltas al aplicar un método numérico.

Sin embargo, los modelos disponibles para simular el secado de un lecho particulado profundo se basan en las ecuaciones utilizadas para describir el secado en capa fina, logrando de esta forma mostrar la variación en el contenido de humedad como una función del tiempo. Los estudios del secado en capa fina están basados en la premisa que el secado por ventilación de un material particulado es controlado por la difusión a través de la partícula en lugar de la velocidad de transferencia de masa en su superficie (Freire et al., 2004)

Según Hassini et al. (2004), un modelo simplificado para predecir la cinética del secado ha sido introducido por (Lewis, 1921) al utilizar la llamada ecuación de capa fina, la cual es similar a la solución analítica de Crank, según se muestra en la ecuación:

$$\frac{X}{X_0} = \exp(-Kt) \quad (3.32)$$

Donde K es una constante empírica conocida como constante de secado, la cual es expresada en s^{-1} . Tomando en consideración las ecuaciones (3.31) y (3.32), esta constante puede ser definida de acuerdo a la ecuación:

$$K = \pi^2 \frac{D_{ef}}{H^2} \quad (3.33)$$

La ecuación (3.33) relaciona la constante de secado empírica K con la difusividad efectiva teórica D_{ef} .

3.6. Árbol de nim

3.6.1. Características generales del árbol de nim

El árbol de nim originario de la India, miembro de la familia de las meliáceas, es conocido por su nombre botánico *Azadirachta indica* A. Juss (National Research Council, 1992)

Contiene una amplia variedad de compuestos activos biológicamente en las ramas, el tronco, las raíces, las hojas, los frutos y las semillas, siendo estas últimas las que presentan las mayores concentraciones de estos componentes (Koul et al., 1990).

La principal sustancia activa en el nim es la azadirachtina, la cual ha sido identificada como el principal agente defensor del árbol contra los insectos y algunos nematodos. Esta sustancia no los mata, al menos no inmediatamente. En cambio, los repele e interfiere en su crecimiento y reproducción. De hecho, estudios han demostrado que es el agente más potente para disuadir la alimentación y regular el crecimiento, aún estando presente en pequeñas trazas, por lo que las plagas no llegan ni siquiera a tocar a las plantas. La azadirachtina también bloquea a la hormona que se encarga de controlar el proceso de metamorfosis de la larva de los insectos, evitando que se desarrollen en crisálidas, y por tanto, mueren sin producir una nueva generación (National Research Council, 1992).

La azadirachtina presenta además la ventaja de no actuar sobre los insectos benéficos, gracias a que su principal efecto es sobre la alimentación en lugar de actuar por contacto (Schmutterer, 1990)

La azadirachtina ha sido aprobada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos como un agente regulador del crecimiento de los insectos en cultivos alimenticios, debido a que no es tóxica para los mamíferos (EPA, 2002)

Las semillas de nim contienen alrededor de 30-40% en peso de aceite no comestible y de 10-15% de una mezcla insecticida, la cual contiene alrededor de 0.1-0.3% de azadirachtina (Holla, 1996)

Las semillas libres de aceite están constituidas de alrededor de 13-35% de proteína cruda (National Research Council, 1992), lo cual las convierte en un excelente recurso como alimento animal. Además constituyen un excelente fertilizante, muchas veces más rico en nutrientes que el estiércol (Michel-Kim y Brandt, 1981)

3.6.2. Productos derivados

Los productos derivados de las semillas de nim pueden clasificarse como productos simples y formulaciones comerciales. Los productos simples son principalmente manufacturados mediante métodos mecánicos, mientras que las formulaciones requieren operaciones complejas, tales como la extracción de los componentes de las semillas con solventes y el uso de aditivos (Espinosa, 2000)

La empresa Investigaciones Orgánicas S.A. (IOSA) se encarga de procesar en la actualidad los frutos frescos del árbol de nim para obtener productos simples: semilla molida, aceite puro líquido, fracción pastosa y torta molida (semillas sin aceite). El acopio de las semillas se realiza en cuatro lugares diferentes: Nandaime, Malpaisillo, Casares y Sébaco; siendo Casares el sitio donde se obtienen las semillas que producen los mejores rendimientos promedios: 30% de aceite puro, 10% de fracción pastosa y 60% de torta molida.

La manufactura y aplicación de estos productos simples son económicamente atractivas. Sin embargo, estos presentan desventajas tales como la falta de estandarización; la posible contaminación con aflatoxinas, debido al crecimiento de hongos; y la baja estabilidad. Presentan una vida de anaquel de aproximadamente un año. Por otro lado, las formulaciones comerciales son más costosas de producir, pero presentan la ventaja de haber superado algunos de estos problemas (Espinosa, 2000)

En la Figura 3.5 se muestra el esquema del procesamiento del nim que la empresa Investigaciones Orgánicas S.A. lleva a cabo.

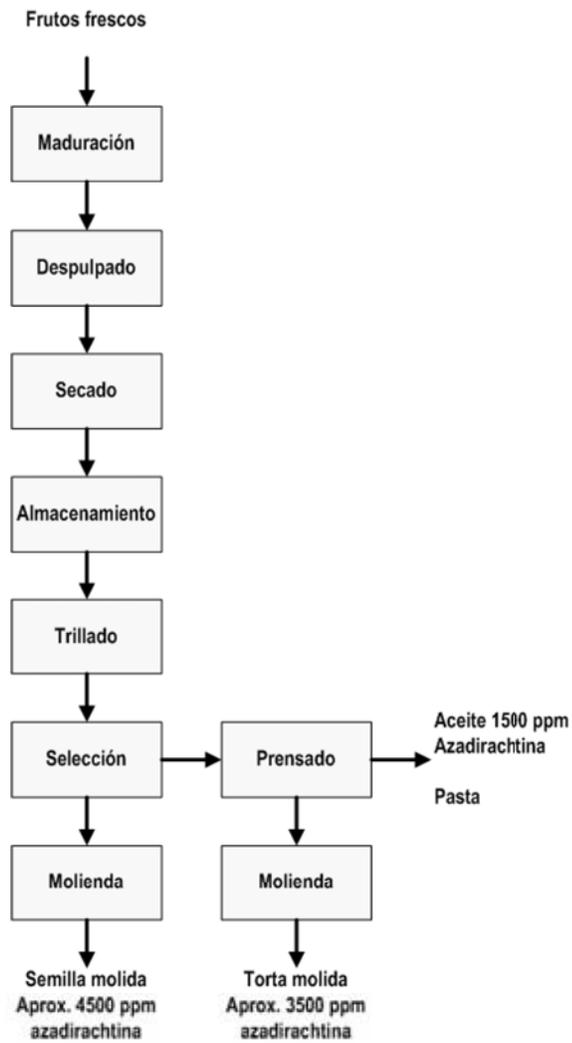


Figura 3.5. Esquema de procesamiento de nim IOSA

Las formulaciones comerciales se producen utilizando como materia prima la semilla de nim molida obtenida durante el procesamiento de los productos simples.

En la Figura 3.6 se muestra el esquema de producción de estas formulaciones.

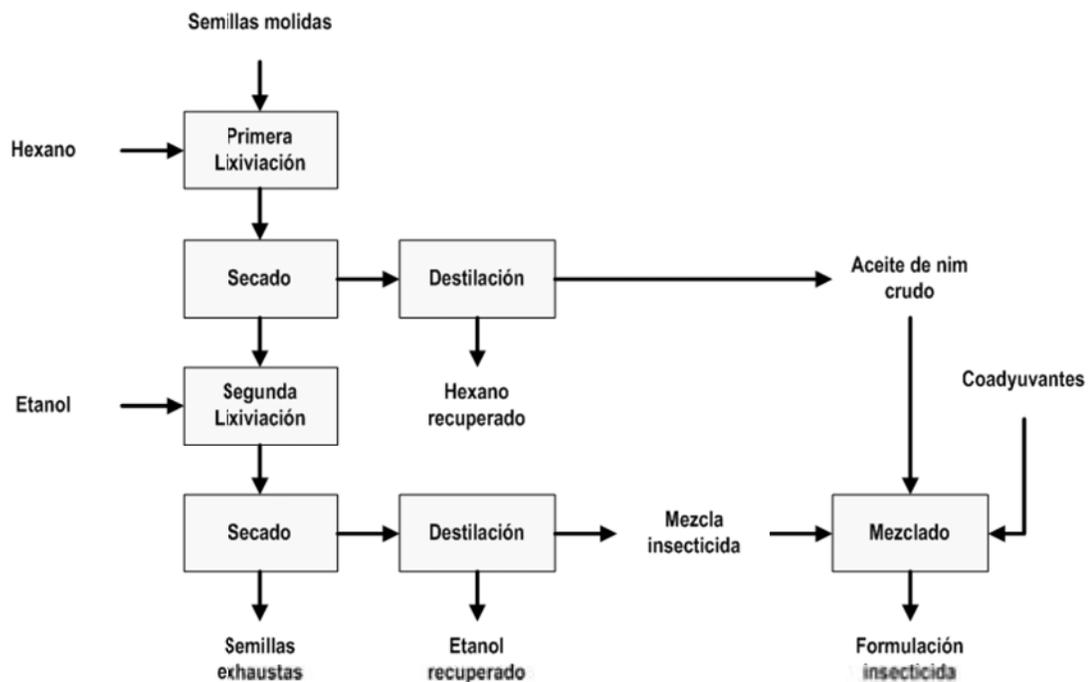


Figura 3.6. Esquema de producción de formulaciones comerciales

El hexano y el etanol recuperados pueden ser reutilizados en el proceso. Las semillas exhaustas pueden ser utilizadas como fertilizante o alimento animal.

IV. Material y método

En este capítulo se describen el equipo, materiales y métodos, tanto experimentales como de cálculo, que fueron utilizados para realizar el estudio de la cinética de secado de semillas de nim en un secador de lecho empacado.

4.1. Material

4.1.1. Semilla y Solventes

Las semillas de nim, utilizadas como modelo experimental de secado, se caracterizan por presentar una forma alargada, cuyo espesor promedio es de 3 mm.

El agua que fue utilizada como solvente se tomó directamente de una de las llaves de suministro al laboratorio.

El etanol y el hexano que fueron utilizados como solventes, se caracterizaron por ser de grado no reactivo.

4.1.2. Descripción del equipo experimental

En la Figura 4.1 se muestra la columna CS que fue utilizada para determinar de forma experimental la cinética del secado de un lecho empacado de semillas de nim.

La columna es de vidrio y presenta en la parte inferior una base metálica a la que se encuentra unida la tubería mediante la cual se alimenta el aire. Las semillas fueron depositadas sobre una rejilla metálica, lo cual permitió contar con la separación necesaria entre la base metálica y el lecho que permitió garantizar que el aire fuera distribuido de manera uniforme.

El aire fue incorporado al sistema mediante un ventilador centrífugo B, el cual se encontraba acoplado a un inversor que permitía controlar las frecuencias de rotación, las cuales a su vez correspondían a valores de velocidades.

Durante el proceso de secado, las válvulas V1 y V4 estaban abiertas y únicamente la resistencia eléctrica R1 se encontraba funcionando, ésta tiene una potencia de 2.5 KW.

La resistencia eléctrica R1 estaba conectada a un relé que se encontraba acoplado al controlador de temperatura Eurotherm CT, de tal forma que cuando los valores de temperatura del aire se encontraban por encima o por debajo del punto de control, el circuito eléctrico se cerraba o abría y la resistencia eléctrica detenía o activaba su funcionamiento hasta que se lograba restablecer nuevamente el punto de control. El Eurotherm a su vez tenía acoplado un termopar que era utilizado para medir continuamente los valores de temperatura del aire y de esta forma garantizar que el controlador enviara las señales correspondientes al relé; éste fue colocado en el interior de la base metálica de la columna.

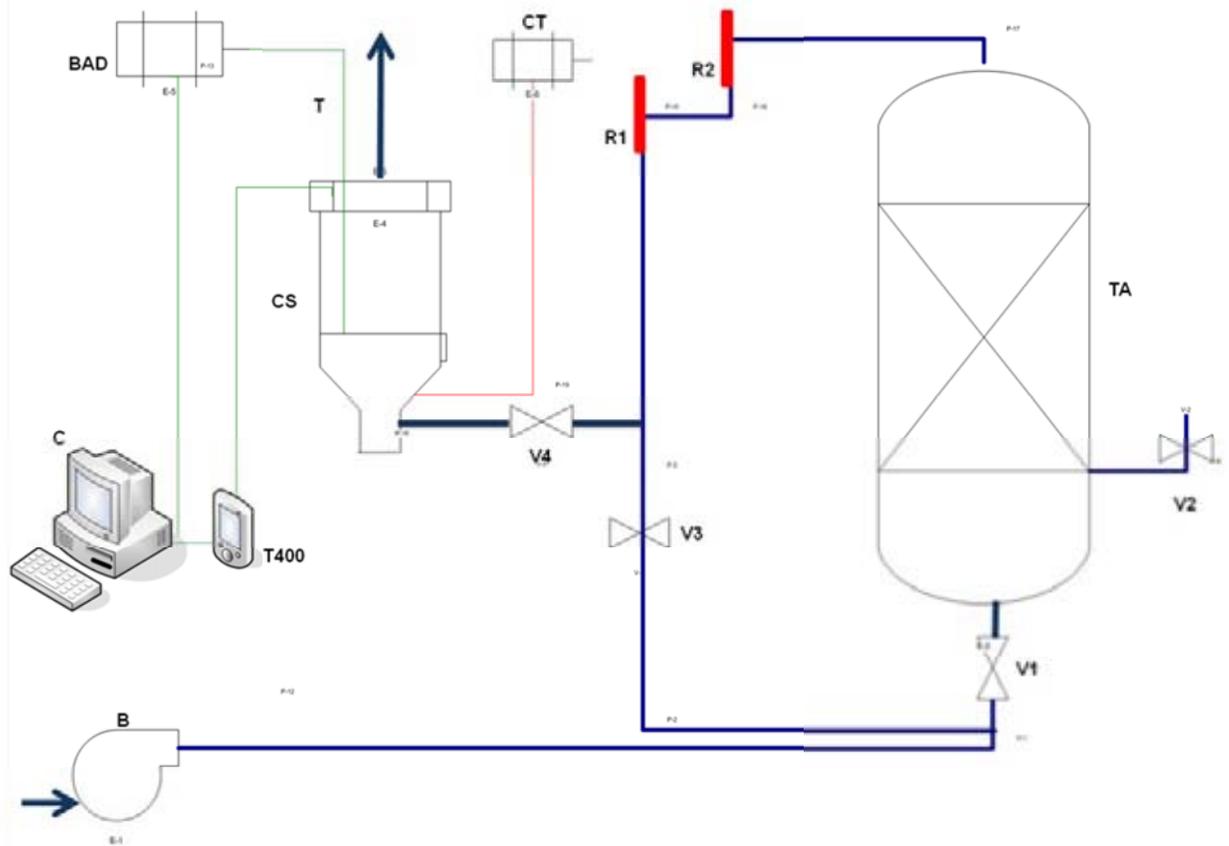
El aire circulaba a través de la torre de adsorción TA, rellena de sílica gel, con el objetivo de remover la humedad que pudiera contener, en seguida, era calentado por medio de la resistencia eléctrica R1 y conducido por el sistema de tuberías hacia la columna de vidrio.

La sílica gel contenida en la torre de adsorción TA se regeneraba diariamente por un tiempo mínimo de tres horas. Durante este proceso se apagaba la resistencia eléctrica R1 y se activaba la resistencia eléctrica R2, la cual también tiene una potencia de 2.5 KW. Este proceso se llevaba a cabo utilizando una frecuencia de rotación de 50 Hz. Las válvulas V1 y V4 eran cerradas y se abrían las válvulas V2 y V3, con el objetivo de garantizar la circulación del aire en sentido contrario, es decir, el aire era primero calentado y después era alimentado a la torre por la parte superior hasta que era liberado por la parte inferior a través de la válvula V2.

En la parte superior, la columna cuenta con una tapa metálica que presenta tres orificios a través de los cuales se introducían los dispositivos de medición.

Todos los termopares T que eran utilizados para realizar las mediciones de temperatura estaban conectados a un bloque de adquisición de datos BAD, el cual permitía conducir las señales analógicas hacia la computadora C. Dichas señales eran convertidas en datos de temperatura mediante el uso de un instrumento virtual creado con el software LabView.

Las velocidades y humedades relativas eran determinadas utilizando sensores que estaban acoplados al equipo Testo T400. Éste a su vez era conectado a la computadora C con el objetivo de recopilar los datos experimentales utilizando el software correspondiente.



B: Ventilador
 BAD: Bloque de adquisición de datos
 C: Computadora para adquisición de datos
 CS: Columna de vidrio
 CT: Controlador de temperatura Eurotherm

R1 y R2: Resistencias eléctricas
 T: Termopares
 TA: Torre de adsorción rellena de sílica gel
 T400: Testo 400
 V1, V2, V3 y V4: Válvulas

Figura 4.1. Equipo Experimental

4.2. Método

4.2.1. Condiciones experimentales

El tipo de solvente era una de las variables seleccionadas para realizar el estudio de la cinética del secado de semillas de nim empacadas en una columna. El procesamiento de las semillas para la obtención del aceite y del insecticida implica la utilización de hexano y etanol como solventes, por lo que estos fueron seleccionados para realizar este estudio. Se utilizó agua como un solvente adicional,

de tal forma que se pudiera contar con una colección de datos experimentales que involucraran también la remoción de humedad en forma de vapor de agua.

El tamaño de partícula es la única característica del material que fue incluida como variable dentro de este estudio. Se utilizaron semillas de nim enteras y hojuelas de nim cuyo espesor promedio es de 1 mm. Se realizaron experimentos preliminares que demostraron que al utilizar tamaños de partícula inferiores provocaba que se formara una masa de material combinada con solvente, lo cual impedía que éste se pudiera secar de forma efectiva utilizando este método.

La temperatura del aire era una de las variables involucradas en este estudio. La temperatura promedio del laboratorio es de 30°C, por lo que cualquier valor elegido debía estar por encima de éste. Se evaluó el efecto de utilizar una temperatura inferior y una superior a las temperaturas de ebullición de los solventes. El hexano presenta una temperatura de ebullición de 68°C; el etanol, 78°C; y el agua, 100°C a condiciones atmosféricas normales. De ahí que fueron utilizados 60°C y 110°C como las temperaturas del aire.

La velocidad del aire fue otra de las variables estudiadas. Ésta no podía ser fijada directamente, sino que era función de la frecuencia de rotación del ventilador. Fueron utilizadas dos frecuencias, 25 Hz y 40 Hz. Inicialmente se pretendía utilizar como valor superior, la frecuencia máxima de rotación del ventilador, 50 Hz, sin embargo, experimentos preliminares demostraron que se originaba mucho ruido en los datos recopilados con los termopares.

La masa de material introducido en la columna fue otra de las variables estudiadas, de la cual dependía también el valor del volumen del lecho. Se secaron 0.40 Kg de semillas de nim y se evaluó el efecto de duplicar esta cantidad, es decir, se secaron también 0.80 Kg de semillas.

4.2.2. Diseño experimental

Durante la realización de esta tesis se evaluó el efecto de tres tipos de solventes diferentes, por lo que se debió crear un diseño experimental independiente para cada uno de ellos. Estos fueron elaborados utilizando el software Statgraphics Plus 4.1. El programa permite elegir el tipo de diseño experimental que será utilizado tomando en consideración la cantidad de variables o factores que serán estudiados.

El diseño multi-factor categórico está indicado para la creación de diseños experimentales cuando se pretende estudiar el efecto de varios factores al mismo tiempo. Se deben introducir los factores independientes y sus niveles y los factores dependientes o respuestas, según se muestra en las Tablas 4.1 y 4.2

Tabla 4.1. Factores independientes

Factores	Niveles	Unidades
Tamaño de partícula	2	mm
Temperatura del aire	2	°C
Velocidad del aire	2	m/s
Masa de material	2	Kg

Tabla 4.2. Factor dependiente

Variable respuesta	Unidad
Velocidad de secado N_v	Kg/m ³ s

Luego de haber introducido estos datos al software, éste brindó la siguiente información:

- Número de factores experimentales: 4
- Número de respuestas: 1
- Número de corridas (sin replicación): 16
- Grados de libertad para el error: 5

Las Tablas 4.3, 4.4 y 4.5 muestran la combinación de los factores que originaron cada una de las corridas experimentales que debieron realizarse.

Tabla 4.3. Diseño experimental para el solvente agua

Corrida	Tamaño de partícula promedio [mm]	Temperatura del Aire [°C]	Frecuencia de rotación del ventilador [Hz]	Velocidad del aire [m/s]	Masa de material [Kg]
1	3	60	25	0.80	0.40
2	3	60	25	0.80	0.80
3	1	60	25	0.80	0.40
4	1	60	25	0.80	0.80
5	3	110	25	0.80	0.40
6	3	110	25	0.80	0.80
7	1	110	25	0.80	0.40
8	1	110	25	0.80	0.80
9	3	60	40	1.40	0.40
10	3	60	40	1.40	0.80
11	1	60	40	1.40	0.40
12	1	60	40	1.40	0.80
13	3	110	40	1.40	0.40
14	3	110	40	1.40	0.80
15	1	110	40	1.40	0.40
16	1	110	40	1.40	0.80

Tabla 4.4. Diseño experimental para el solvente etanol

Corrida	Tamaño de partícula promedio [mm]	Temperatura del Aire [°C]	Frecuencia de rotación del ventilador [Hz]	Velocidad del aire [m/s]	Masa de material [Kg]
1	3	60	25	0.80	0.40
2	3	60	25	0.80	0.80
3	1	60	25	0.80	0.40
4	1	60	25	0.80	0.80
5	3	110	25	0.80	0.40
6	3	110	25	0.80	0.80
7	1	110	25	0.80	0.40
8	1	110	25	0.80	0.80
9	3	60	40	1.40	0.40
10	3	60	40	1.40	0.80
11	1	60	40	1.40	0.40
12	1	60	40	1.40	0.80
13	3	110	40	1.40	0.40
14	3	110	40	1.40	0.80
15	1	110	40	1.40	0.40
16	1	110	40	1.40	0.80

Tabla 4.5. Diseño experimental para el solvente hexano

Corrida	Tamaño de partícula promedio [mm]	Temperatura del Aire [°C]	Frecuencia de rotación del ventilador [Hz]	Velocidad del aire [m/s]	Masa de material [Kg]
1	3	60	25	0.80	0.40
2	3	60	25	0.80	0.80
3	1	60	25	0.80	0.40
4	1	60	25	0.80	0.80
5	3	110	25	0.80	0.40
6	3	110	25	0.80	0.80
7	1	110	25	0.80	0.40
8	1	110	25	0.80	0.80
9	3	60	40	1.40	0.40
10	3	60	40	1.40	0.80
11	1	60	40	1.40	0.40
12	1	60	40	1.40	0.80
13	3	110	40	1.40	0.40
14	3	110	40	1.40	0.80
15	1	110	40	1.40	0.40
16	1	110	40	1.40	0.80

Los experimentos fueron realizados siguiendo un orden aleatorio para evitar posibles interferencias.

La relación entre los valores de frecuencia de rotación del ventilador con respecto a los valores de velocidad del aire se muestra detalladamente en el apéndice C.

4.2.3. Descripción de los experimentos

El primer paso durante la realización de los experimentos era encender el ventilador y la resistencia eléctrica. Se debía esperar un tiempo prudencial para que el controlador de temperatura se estabilizara. Se observó que se requerían aproximadamente 30 minutos para lograr esto.

La humedad relativa del medio ambiente se medía antes de realizar los experimentos, de tal forma que se contara con una colección de datos de esta variable no controlable que permitiesen justificar cualquier anomalía en el comportamiento de los resultados experimentales.

Cuando se utilizaban semillas enteras, los experimentos eran iniciados con la adición del solvente y el reposo durante un período de tiempo determinado. La cantidad utilizada dependía del tipo de solvente y de la cantidad de semillas que se iba a procesar.

El agua es el solvente menos volátil, por lo que las semillas podían permanecer húmedas durante más tiempo, es por esto que únicamente se debían añadir 0.10 L de agua cuando se procesaban 0.40 Kg de semillas y 0.20 L cuando se procesaban 0.80 Kg de semillas. Las semillas se dejaban reposar durante 15 minutos para favorecer la absorción del solvente, en seguida, se depositaban sobre un tamiz durante 10 minutos para eliminar el exceso de humedad superficial que provocaría la saturación temprana del aire en el interior de la columna.

Contrariamente, el etanol y el hexano son bastante volátiles, por lo que para conseguir que las semillas los absorbieran y dejarlas reposar durante 15 minutos, se debía añadir una mayor cantidad, de tal manera que siempre se conservara humedad superficial. Se realizaron experimentos preliminares que permitieron definir estas cantidades, de ahí que, cuando se procesaban 0.40 Kg de semillas, se añadían 0.20 L de solvente y cuando se procesaban 0.80 Kg se añadían 0.40 L de solvente.

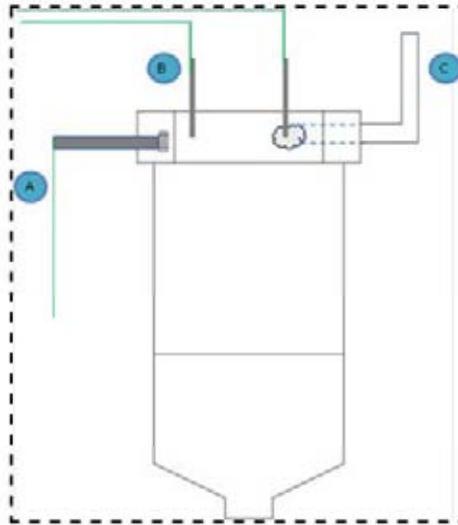
El método estándar para la determinación de la humedad de las semillas se basa en tomar muestras antes del proceso de secado y colocarlas en el interior de un horno a una temperatura lo suficientemente alta para garantizar que se eliminará todo el solvente en un día. Se tomaban tres muestras de 20 g de semillas, antes de introducirlas dentro de la columna, y se colocaban en el interior del horno. La temperatura fijada en el equipo dependía del tipo de solvente que sería removido, y por tanto de su volatilidad e inflamabilidad, de ahí que, cuando se trataba de agua se utilizaba 120°C; para etanol, 80°C; y para hexano, 60°C.

La masa húmeda era pesada y en seguida introducida en el interior de la columna, sobre la rejilla metálica, a medida que el flujo de aire circulaba de forma transversal. Se introdujeron cuatro termopares que eran ubicados a diferentes profundidades dentro del lecho, de tal forma que se pudieran construir luego los perfiles de temperatura correspondientes.

Al realizar los experimentos en los cuales se utilizaba agua como solvente, eran recopilados datos de temperatura de bulbo seco y humedad relativa del aire exhausto a la salida de la columna, utilizando el sensor respectivo.

Cuando se realizaban los experimentos en los cuales se utilizaban etanol y hexano como solventes, se usaba un dispositivo que permitía medir la temperatura de bulbo húmedo del aire exhausto. Se diseñó un tubo de vidrio en forma de L que tenía en uno de sus extremos un trozo sobresaliente de tela en el cual se enrollaba un termopar. Se alimentaba continuamente solvente dentro del tubo, con el objetivo de mantener humedecido el trozo de tela. También se introdujo otro termopar que permitía recopilar datos de temperatura de bulbo seco del aire exhausto.

La Figura 4.2 muestra un esquema de la ubicación de los dispositivos de medición de las propiedades del aire exhausto a la salida de la columna.



- A. Higrómetro Testo para medir temperatura de bulbo seco y humedad relativa.
- B. Termopar para medir temperatura de bulbo seco.
- C. Sistema (termopar más dispositivo de alimentación continua de solvente) para medir temperatura de bulbo húmedo.

Figura 4.2. Ubicación de dispositivos de medición de las propiedades del aire exhausto

La recopilación de datos se hacía cada 30 segundos y debía iniciarse antes de introducir la masa húmeda dentro del secador, esto permitía que los perfiles de temperatura partieran de un valor común. Además, se debió tener en cuenta que se midiera la temperatura ambiental, antes de iniciar cada experimento, y actualizar este valor en el software de reconocimiento de los termopares llamado Measurement and Instrumentation de LabView.

Los experimentos finalizaban cuando la humedad relativa y las temperaturas permanecían constantes durante un lapso de tiempo, en este momento se concluía que se había alcanzado el estado estacionario y no se podría remover más humedad de las semillas. En seguida, se retiraban las semillas del secador y se recopilaba el dato de masa seca.

Al realizar los experimentos en los cuales se utilizaban hojuelas de nim se añadía un paso adicional, previo a la humidificación con los solventes, que era la reducción de tamaño, para este fin se utilizó un molino de rodillos.

Se determinaron los valores de velocidad que corresponden a las frecuencias de rotación del ventilador utilizadas en los experimentos. Se introdujo el sensor de velocidad en la tubería de entrada a la torre de adsorción, éste se desplazaba de forma perpendicular, de tal forma que se lograra visualizar el valor máximo y poder aplicar posteriormente la relación necesaria para determinar la velocidad promedio en la tubería. Los resultados del cálculo de las velocidades promedios para cada una de las frecuencias de rotación del ventilador se muestran en el apéndice C.

La densidad aparente de los lechos de semillas y hojuelas fue determinada. Para este fin, se tomó una muestra de cada uno, se introdujo en el interior de un recipiente de 1 L de capacidad y se recopilaron los datos de peso. En seguida, se pesó el recipiente vacío para determinar el peso real de las muestras.

Para determinar la porosidad del lecho de semillas y del lecho de hojuelas se aplicó el método de la porosidad efectiva dada por la relación entre el volumen vacío y el volumen aparente. Se colocó dentro de un recipiente una cantidad determinada de material (volumen aparente), en seguida se llenó con agua hasta que el lecho quedara completamente cubierto, de tal forma que el volumen final fuera mayor al volumen aparente (Gamero, 2004)

4.2.4. Evaluación de los experimentos

La humedad inicial sobre base seca de las semillas fue calcula utilizando la siguiente ecuación Para este fin, se utilizaron los datos recopilados al utilizar el horno.

$$X_o = \frac{m_h - m_s}{m_s} \quad (4.1)$$

La masa seca se calculó mediante una relación entre la masa húmeda introducida al horno, la masa seca obtenida al utilizar el horno, y la masa húmeda introducida al secador según se muestra en la ecuación:

$$m_s = \frac{(m_h)(m_{sH})}{m_{hH}} \quad (4.2)$$

El flujo másico de aire seco se calculó mediante la ecuación:

$$m_a = \rho v_{ave} A_T \quad (4.3)$$

Donde ρ es la densidad del aire a la temperatura determinada al utilizar el sensor, la cual fue leída de una tabla de propiedades termodinámicas; v_{ave} es la velocidad promedio en la tubería y A_T es el área transversal de la tubería.

El sensor de velocidad únicamente permite medir valores puntuales de velocidad, debido a esto se debió determinar el valor máximo de velocidad y luego aplicar las ecuaciones siguientes, establecidas por Bird et al. (2002)

Para flujo laminar ($Re < 2100$):

$$\frac{v_{ave}}{v_{max}} = \frac{1}{2} \quad (4.4)$$

Para flujo turbulento ($10^4 < Re < 10^5$):

$$\frac{v_{ave}}{v_{max}} \approx \frac{4}{5} \quad (4.5)$$

Las humedades absolutas del aire a la salida fueron determinadas introduciendo los datos de humedad relativa, temperatura de bulbo seco y temperatura de bulbo húmedo, recopilados en cada experimento, en una serie de programas creados en Matlab. Se asumió que la humedad absoluta a la entrada de la columna era igual a cero.

La variación de la humedad del sólido con respecto al tiempo fue determinada mediante la ecuación (3.22) Las curvas de secado fueron construidas utilizando un programa creado en Matlab.

La velocidad de secado fue determinada con respecto al volumen del lecho. El volumen del lecho fue calculado de acuerdo a la ecuación:

$$V = \frac{m}{\rho_{ap}} \quad (4.6)$$

Donde m es la masa de material utilizado en cada experimento y ρ_{ap} es la densidad aparente.

La densidad aparente fue calculada de acuerdo a la ecuación:

$$\rho_{ap} = \frac{m_m}{V_R} \quad (4.7)$$

Donde m_m es la masa de la muestra y V_R es el volumen del recipiente.

La porosidad fue calculada de acuerdo a la ecuación:

$$\varepsilon = \frac{V_{ap} + V_w - V_f}{V_{ap}} \quad (4.8)$$

Donde V_{ap} es el volumen aparente del sólido, V_w es el volumen añadido de agua y V_f es el volumen final.

La velocidad de secado fue determinada de acuerdo a la ecuación (3.2) y las curvas de velocidad de secado fueron construidas utilizando un programa creado en Matlab. Asimismo, las curvas teóricas fueron construidas utilizando un programa creado en Matlab que incluye la ecuación (3.32)

Los perfiles de temperatura en el lecho con respecto al tiempo fueron construidos utilizando un programa creado en Matlab.

V. Presentación y discusión de resultados

5.1. Introducción

Para llevar a cabo el análisis de la cinética de secado de las semillas y hojuelas de nim humedecidas separadamente con agua, etanol y hexano en un lecho empacado, se realizaron experimentos utilizando el equipo descrito en la sección IV. Los datos experimentales obtenidos fueron procesados para desarrollar las curvas de secado y velocidad de secado, las cuales fueron agrupadas convenientemente para analizar la influencia de la velocidad del aire, temperatura del aire, tamaño de partícula y masa de material sobre la cinética del secado.

El presente estudio también incluye los perfiles de temperatura desarrollados a lo largo del lecho durante el proceso de secado, los cuales junto a las curvas de secado y velocidad de secado permiten analizar y entender en su totalidad el proceso de secado desarrollado en cada caso.

Además, se incluye un ajuste teórico de las curvas de secado al utilizar un modelo exponencial, el cual fue resuelto por medio de prueba y error. Este modelo está basado en la ecuación de difusión de Fick y por tanto permite determinar los valores de difusividad efectiva para los casos que fueron seleccionados y determinar la influencia de las variables en estudio sobre este parámetro.

5.2. Cinética de secado

Durante este estudio se realizaron un total de 48 experimentos, correspondiendo 16 al solvente agua, 16 al solvente etanol y 16 al solvente hexano. En cada uno se modificaron los valores de la velocidad del aire, temperatura del aire, tamaño de partícula y masa de material para analizar su influencia sobre la cinética del secado, según se muestra en las Tablas 4.1, 4.2 y 4.3.

Al realizar los experimentos en los cuales se utilizó agua como solvente, se recopilaron datos de humedad relativa utilizando un sensor acoplado al equipo Testo, según fue descrito en la sección IV. En cambio, al realizar los experimentos en los cuales se utilizaron etanol y hexano como solventes, se recopilaron datos de temperaturas de bulbo húmedo y bulbo seco que fueron registrados mediante el sistema de adquisición de datos de LabView, lo cual también fue descrito en la sección IV.

Las humedades absolutas del aire fueron calculadas a partir de las ecuaciones 3.20 y 3.23, utilizando un programa creado en Matlab.

La variación en el contenido de humedad del sólido sobre base seca como una función del tiempo fue calculada a partir de la ecuación 3.19 utilizando también un programa creado en Matlab. Los datos de contenido de humedad con respecto al tiempo son utilizados para construir las curvas de secado.

Las curvas de velocidad de secado fueron construidas a partir de la ecuación 3.2, utilizando los datos que constituyen a las curvas de secado.

Los valores de volumen de lecho fueron calculados a partir de la ecuación 4.6. La densidad aparente del lecho fue calculada a partir de la ecuación 4.7. Los resultados de estos cálculos se muestran en el Apéndice D.

Si se analizan de forma simultánea la curva de secado y la curva de velocidad de secado, la cinética del secado puede ser definida de forma más precisa. Las figuras 5.1 a 5.24 muestran los pares de curvas que presentan de forma comparativa a la variable velocidad. El efecto de las otras tres variables es analizado comparando los pares de curvas entre sí. En la curva de secado, inciso (a), se observa el cambio del contenido de humedad del sólido con respecto al tiempo y en la curva de velocidad de secado, inciso (b), se puede apreciar con claridad la definición de los periodos de secado.

5.2.1. Agua

Las velocidades de secado originadas al utilizar agua como solvente son las más bajas debido a su baja volatilidad relacionada a su alto punto de ebullición normal (100°C), siendo éste superior al de los otros dos solventes.

Los experimentos fueron finalizados al alcanzarse el estado estacionario en los perfiles de temperatura, es decir, el momento en el cual no ocurrió más cambio en la temperatura con respecto al tiempo. La humedad superficial es la responsable del descenso en la temperatura inicial del sólido, debido a que para evaporarse toma energía de éste y los alrededores; cuando la evaporación cesa, la temperatura del sólido empieza a incrementarse hasta que se alcanza un valor constante.

Sin embargo, según se logra apreciar en las curvas de secado, Figuras 5.1 (a) a 5.8 (a), la remoción de agua aún no había finalizado, muy probablemente debido a la existencia de una alta cantidad de humedad interna en las semillas y hojuelas, la cual al migrar del interior del sólido hacia la superficie no provocaba grandes variaciones en la temperatura, debido a que la resistencia que opone éste impide que las cantidades sean considerables. Esto demuestra la dificultad que implica la remoción de una sustancia que presenta una baja volatilidad en un secador de este tipo.

Además las semillas originalmente presentan agua en su composición, por tanto, podría ser que se alcanzara un equilibrio, de tal forma que ya no se lograra remover más agua, debido a que se trata de la constitución normal del grano.

5.2.1.1. Influencia de la velocidad del aire

Según la ecuación 3.4, la intensidad del secado es directamente proporcional a la velocidad del aire. Durante la realización de estos experimentos se logró apreciar que al incrementarse la velocidad del aire, también se incrementaba la velocidad de

secado, lo cual a su vez provocaba que el tiempo de secado se redujera. En las figuras 5.1 a 5.8 se logra apreciar dicho comportamiento.

La velocidad a la cual ocurre el proceso de transferencia de masa depende de la fuerza impulsora, es decir, la diferencia de concentración del solvente en el material sólido y en el aire, así como de la resistencia a la transferencia de masa. Al utilizar una velocidad del aire mayor se favorece que la migración de la humedad del sólido hacia el aire ocurra más rápido debido a que existe una mayor diferencia de concentración que a su vez provoca que la velocidad de evaporación sea mucho mayor, favoreciéndose el proceso de secado. Este hecho es mostrado en las ecuaciones 3.2 y 3.5, en las cuales se presenta el efecto de la variación en la concentración del componente volátil con respecto a la variación en el contenido de humedad del sólido y la variación en la fracción molar de dicho componente en el aire respectivamente.

La velocidad del aire incide sobre el número de Reynolds, el cual a su vez se utiliza para calcular el factor de transferencia de masa j_M , según se muestra en la Tabla 3.1. El factor j_M se utiliza para calcular el coeficiente convectivo de transferencia de masa, K_y , y por tanto un incremento en la velocidad del aire, provocará un incremento en el número de Reynolds que a su vez favorecerá un incremento en dicho coeficiente, lo cual según se observa en la ecuación 3.5 provocará un aumento de la velocidad de evaporación. Si se aumenta la velocidad del aire, se podría originar turbulencia en los alrededores de las partículas que conforman el lecho, favoreciéndose el proceso de transferencia de masa, debido a la agitación, y aumentándose de esta forma la velocidad de evaporación.

Cuantitativamente, el aumento de la velocidad del aire en 75% también provoca una marcada diferencia en las curvas de velocidad de secado que corresponden a ambas velocidades y el efecto tiende a ser más notorio al utilizar las semillas enteras, la temperatura más alta y la menor masa de material, según se muestra en la Figura 5.5.

5.2.1.2. Influencia de la temperatura del aire

Según la ecuación 3.4, la intensidad del secado es directamente proporcional a la temperatura del aire. Durante la realización de estos experimentos se logró apreciar que al incrementarse la temperatura del aire, también se incrementaba la velocidad de secado, lo cual también implicaba una reducción en el tiempo de secado. Al compararse las Figuras 5.1 a 5.4 que fueron obtenidas al utilizar una temperatura $T=60^{\circ}\text{C}$ con las Figuras 5.5 a 5.8, obtenidas a una temperatura $T=110^{\circ}\text{C}$, se logra apreciar el efecto de esta variable sobre la velocidad de secado.

Cuantitativamente, el aumento de la temperatura del aire en aproximadamente 83% provoca una marcada diferencia en las curvas de velocidad de secado, lo cual se hace más evidente al utilizar la velocidad del aire más alta, según se muestra en las Figuras 5.5 a 5.8.

Este fenómeno se debe a que al utilizar una mayor temperatura, la diferencia de temperatura existente entre el material sólido y el aire es mayor, por lo que la transferencia de energía se incrementa lo cual agiliza la evaporación de la humedad superficial, esto puede ser visualizado en la ecuación 3.14. La reducción drástica de la humedad superficial se observa en las Figuras 5.5 a 5.7, en las cuales no se aprecia la existencia de un período de velocidad constante al utilizar una temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$, en cambio, se aprecia que al utilizar la temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$, debido a que el proceso de secado es mucho más lento, el período de velocidad constante se empezaba a notar.

5.2.1.3. Influencia del tamaño de partícula

Según la ecuación 3.4. la intensidad de secado es inversamente proporcional al tamaño de partícula, sin embargo, durante la realización de estos experimentos se logró apreciar que la velocidad de secado era superior al utilizar las semillas, cuyo grosor promedio era 3 mm, siendo mayor al de las hojuelas, cuyo grosor promedio era 1 mm, según se muestra en las Figuras 5.1 a 5.8.

Cuando un lecho de partículas húmedas es secado por una corriente transversal de aire, los espacios vacíos entre las partículas usualmente almacenan la mayor parte de la humedad, por lo que los procesos de transporte que ocurren en estos controlan el secado (Cunningham y Kelly, 1978) Esto, asociado a las diferencias en los valores de porosidad de los lechos de semillas y hojuelas podría ser la razón para explicar este fenómeno. En el Apéndice D se muestran los valores de porosidad promedio para un lecho de semillas de nim y un lecho de hojuelas de nim.

Un lecho de semillas presenta una porosidad de 0.50, siendo superior a la de un lecho de hojuelas, la cual es de 0.35. Esto provoca en el primer caso que el aire tenga menos resistencia a fluir a través del lecho y pueda tener más contacto con las superficies de las semillas, lo cual ocasiona que el proceso de difusión de la humedad hacia el aire ocurra de forma más rápida, agilizándose el proceso de secado. En cambio, al tener un lecho de hojuelas el aire presenta más resistencia a fluir a través del lecho y por tanto el contacto con todas las partículas es menor, la difusión no ocurre con igual eficiencia y esto provoca que la velocidad de secado se haga más pequeña.

Sin embargo, y a pesar de que existan diferencias en las velocidades de secado, cuantitativamente las discrepancias no son tan marcadas, sobre todo al utilizar las condiciones de secado menos favorables, es decir, la velocidad y temperatura más bajas, así como la masa de material más grande, esto debido al incremento de la resistencia a la transferencia de masa, según se logra apreciar en las Figuras 5.1 a 5.4.

5.2.1.4. Influencia de la masa de material

En el estudio de Martinello et al. (2003) se muestra que la altura del lecho presenta una influencia considerable sobre la velocidad de secado, ya que a medida que la

altura del lecho se incrementa la velocidad de secado es menor y el tiempo requerido para alcanzar la humedad final deseada en el sólido aumenta. La altura del lecho está relacionada con la masa del material mediante el volumen del lecho.

El secado procede por la difusión de vapor a través de la película fina de líquido que rodea a la superficie del sólido y luego hacia el medio circundante. Cuando se lleva a cabo el proceso de secado de una masa de material más grande, la cantidad de humedad que debe ser removida es mayor, por lo que el tiempo requerido para finalizar esta etapa se incrementa.

Cuando se ha logrado remover toda la humedad superficial, inicia la etapa en la cual ocurre la migración de la humedad interna hacia la superficie del sólido. En esta etapa, la velocidad de secado es gobernada por la velocidad de movimiento de humedad interna y la influencia de las variables externas decrece. Este período determina el tiempo total de secado necesario para lograr disminuir el contenido de humedad (Perry y Green, 1997). Cuando se utiliza una masa de material mayor, se incrementa la resistencia a la transferencia de masa en el lecho, debido a que se requiere que una mayor cantidad de humedad interna migre hacia el exterior, por lo que la velocidad de secado decrece y el tiempo total de secado se incrementa.

El efecto de la masa del material, y por tanto de la altura del lecho, se hace más evidente al utilizar la temperatura, velocidad y tamaño de partícula mayores, es decir, las condiciones de secado más favorables, según se observa en las Figuras 5.5 y 5.6.

5.2.1.5. Períodos de secado

Prácticamente en todas las curvas se logra apreciar el mismo patrón: al utilizar hojuelas de nim se observa un período inicial creciente muy corto, seguido de un período decreciente que finaliza en una etapa constante, cuando se utiliza una velocidad $v = 1.40$ m/s y una temperatura $T = 60^{\circ}\text{C}$; en cambio al utilizar una velocidad $v = 0.80$ m/s el período inicial se caracteriza por ser decreciente, seguido de un período constante, según se muestra en las Figuras 5.3 y 5.4. En las Figuras 5.7 y 5.8, se aprecia el mismo patrón, un período inicial creciente, seguido de un período decreciente al utilizar la velocidad $v = 1.40$ m/s; en cambio, al utilizar la velocidad $v = 0.80$ m/s se logra apreciar la existencia de un período de velocidad constante que tiende a desaparecer al utilizar la menor masa de material.

En el caso de las semillas de nim se observa un período decreciente seguido de un período constante cuando se utiliza la temperatura $T = 60^{\circ}\text{C}$, sin notarse diferencias con respecto a la velocidad del aire o la masa de material, según se muestra en las Figuras 5.1 y 5.2. Sin embargo, al utilizar una temperatura $T = 110^{\circ}\text{C}$ y una velocidad $v = 1.40$ m/s se observa un período creciente seguido de un período decreciente, notándose la aparición de un corto período de velocidad constante al incrementar la masa de material, según se muestra en las Figuras 5.5 y 5.6. En estas mismas figuras se logra apreciar que al utilizar una velocidad $v = 0.80$ m/s se puede notar un

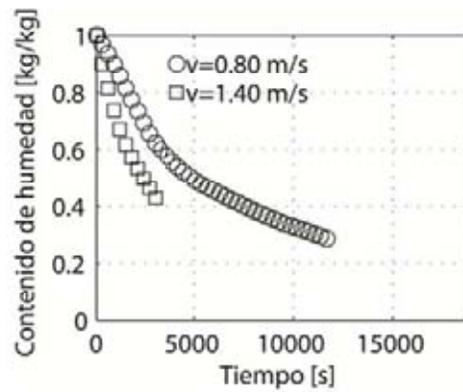
período de velocidad constante que tiende a alargarse al utilizar la masa más grande de material.

El período inicial es creciente en la mayoría de los casos, debido a que existe un contenido de humedad libre en exceso sobre la superficie, el cual al evaporarse, reduce drásticamente esa cantidad hasta alcanzar un contenido de humedad crítico. Esto es debido a que no hay resistencia externa a la transferencia de masa al inicio del proceso.

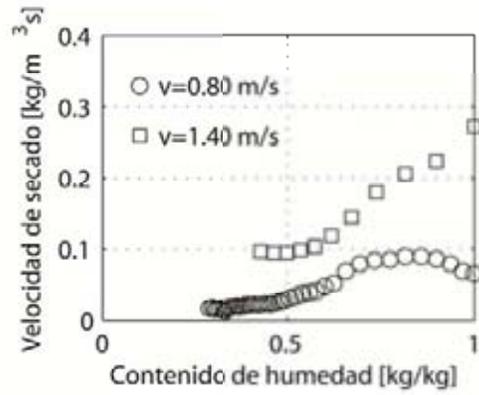
En aquellos casos en los cuales existe un período inicial decreciente, esto se debe a que en la superficie existe una gran resistencia a la transferencia de masa. Este fenómeno ocurre cuando el transporte líquido interno no ha alcanzado una velocidad tal que garantice suficiente presencia de humedad en la superficie del sólido, por lo tanto el contenido de humedad libre sobre la superficie es menor al contenido de humedad crítico que se alcanza tiempo después.

Según Langrish et al. (1991), la incertidumbre en los primeros puntos de las curvas de secado y velocidad de secado es mayor debido a que las condiciones del aire entrante fueron perturbadas momentáneamente al introducir la muestra al equipo, por lo que la existencia de un período decreciente y la consecuente resistencia a la transferencia de masa pudo haberse debido a este fenómeno.

El período de velocidad constante tiende a ser más evidente al utilizar hojuelas, debido a que toda la superficie se encuentra expuesta al contacto con el aire, por lo que existe una mayor cantidad de humedad superficial que puede ser removida a razón constante por un período prolongado.

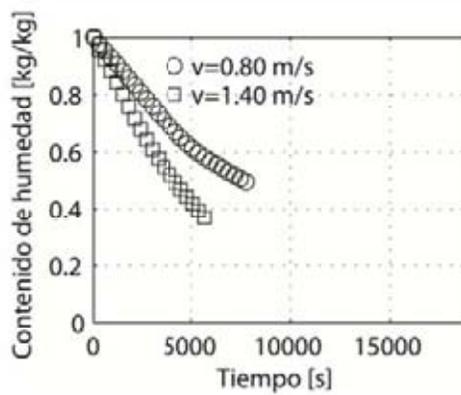


(a) Curva de secado

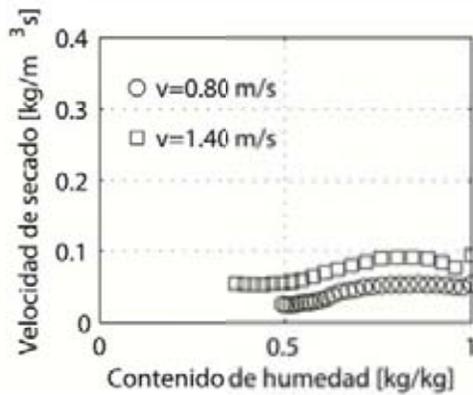


(b) Curva de velocidad de secado

Figura 5.1: Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de semillas de nim humedecidas con agua a temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40 \text{ Kg}$

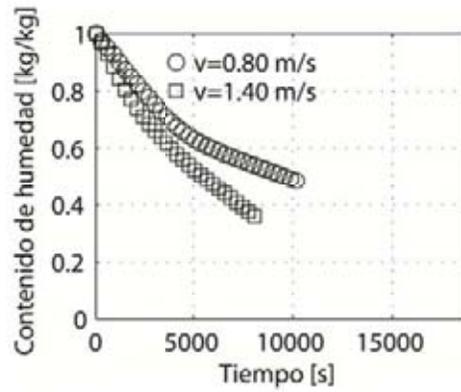


(a) Curva de secado

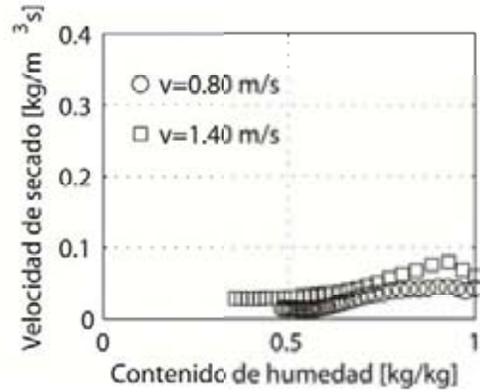


(b) Curva de velocidad de secado

Figura 5.2: Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de semillas de nim humedecidas con agua a temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.30 \text{ Kg}$

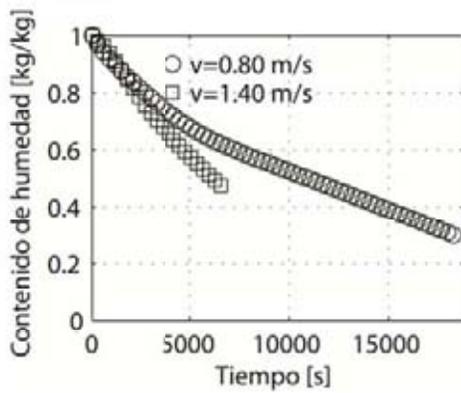


(a) Curva de secado

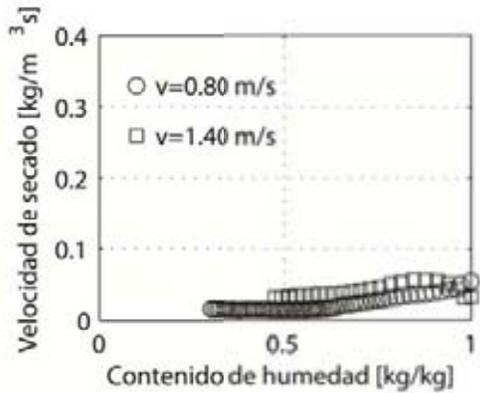


(b) Curva de velocidad de secado

Figura 5.3: Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con agua a temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40$ Kg

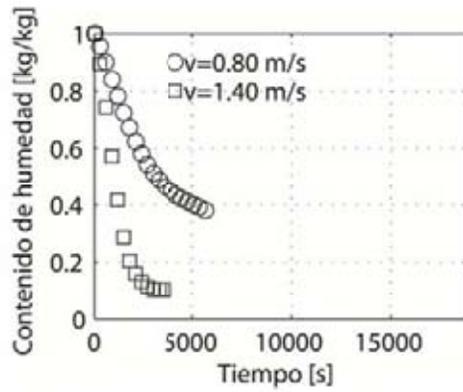


(a) Curva de secado

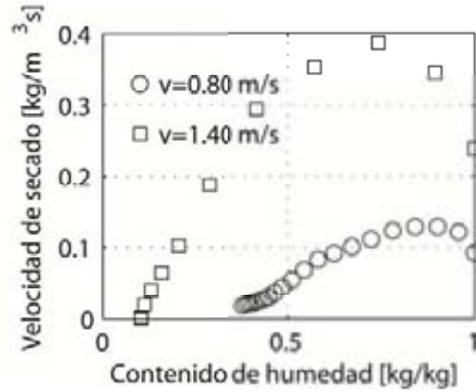


(b) Curva de velocidad de secado

Figura 5.4: Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con agua a temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.30$ Kg

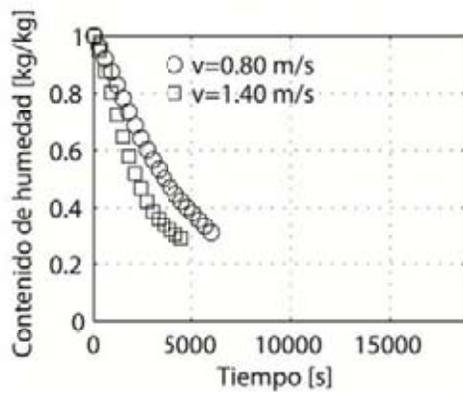


(a) Curva de secado

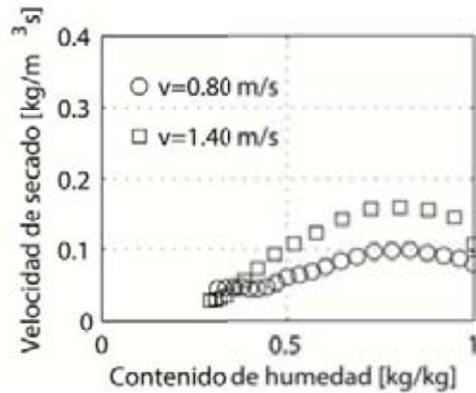


(b) Curva de velocidad de secado

Figura 5.5: Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de semillas de nim humedecidas con agua a temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40$ Kg

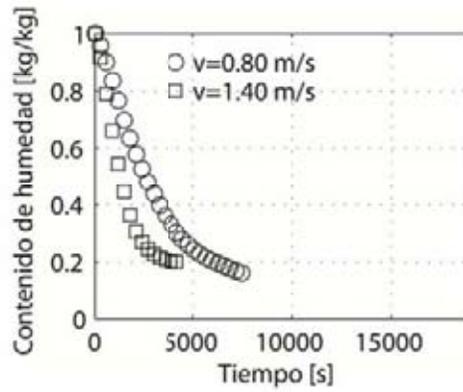


(a) Curva de secado

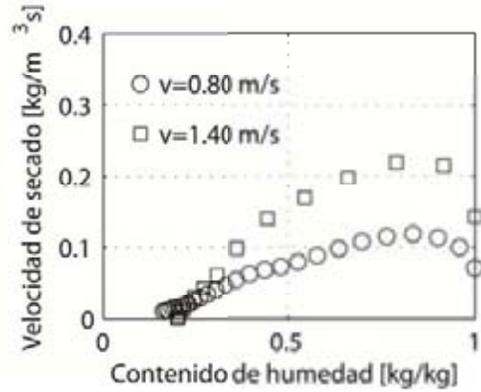


(b) Curva de velocidad de secado

Figura 5.6: Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de semillas de nim humedecidas con agua a temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80$ Kg

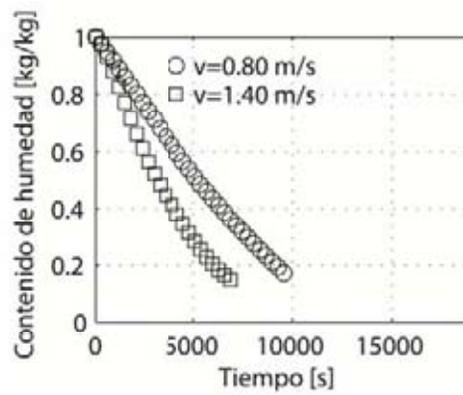


(a) Curva de secado

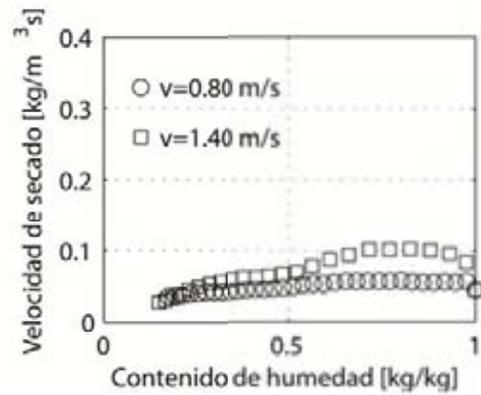


(b) Curva de velocidad de secado

Figura 5.7: Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con agua a temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40$ Kg



(a) Curva de secado



(b) Curva de velocidad de secado

Figura 5.8: Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con agua a temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80$ Kg

5.2.2. Etanol

Las velocidades de secado originadas al utilizar etanol como solvente fueron superiores a las originadas al utilizar agua, debido a que la volatilidad de éste es más alta, lo cual está relacionado a su punto de ebullición normal (78°C), según se muestra en las Figuras 5.9 a 5.16.

5.2.2.1. Influencia de la velocidad del aire

De igual manera que al utilizar agua como solvente, durante la realización de estos experimentos se logró apreciar que al incrementarse la velocidad del aire, también se incrementaba la velocidad de secado. En las figuras 5.9 a 5.16 se muestra este comportamiento.

Si se utiliza una velocidad del aire más alta se beneficia que la migración del solvente, presente en el sólido, hacia el aire ocurra más rápido debido a que existe una mayor diferencia de concentración que a su vez provoca que la velocidad de evaporación sea mucho mayor, favoreciéndose el proceso de secado. Este hecho es mostrado en las ecuaciones 3.2 y 3.5, en las cuales se presenta el efecto de la variación en la concentración del componente volátil con respecto a la variación en el contenido de humedad del sólido y la variación en la fracción molar de dicho componente en el aire respectivamente.

Según se mencionó previamente, el incremento en la velocidad del aire provoca un incremento en el número de Reynolds que incide de manera directa sobre el coeficiente convectivo de transferencia de masa K_y , agilizándose de esta forma la velocidad de evaporación y por tanto la velocidad de secado.

El efecto de la velocidad del aire tiende a ser más notorio al utilizar las semillas enteras, la temperatura más alta y la menor masa de material, según se muestra en la Figura 5.13.

5.2.1.2. Influencia de la temperatura del aire

Al igual que al utilizar agua como solvente, durante la realización de estos experimentos se logró apreciar que al incrementarse la temperatura del aire, también se incrementaba la velocidad de secado. En las figuras 5.9 a 5.16 se muestra este hecho.

El efecto de la temperatura del aire se hace más evidente al utilizar las semillas enteras, la velocidad más alta y la menor masa de material, según se muestra en la Figura 5.13.

Este fenómeno se debe a que al utilizar una mayor temperatura, la diferencia de temperatura existente entre el material sólido y el aire es mayor, por lo que la transferencia de energía se incrementa lo cual agiliza la evaporación de la humedad superficial, esto puede ser observado en la ecuación 3.14. La reducción drástica de

la humedad superficial se observa en las Figura 5.13, en la cual no se aprecia la existencia de un período de velocidad constante al utilizar ambas velocidades del aire y la temperatura más alta.

5.2.1.3. Influencia del tamaño de partícula

De igual forma que al utilizar agua como solvente, durante la realización de estos experimentos se logró apreciar que la velocidad de secado era superior al utilizar las semillas que al utilizar las hojuelas, según se muestra en las Figuras 5.9 a 5.16.

Según fue explicado previamente, este fenómeno puede ser analizado mediante los valores de porosidad del lecho que son mostrados en el Apéndice C.

La variación en las velocidades de secado está relacionada con la resistencia de un lecho menos poroso al flujo del aire y por tanto al incremento de la resistencia a la transferencia de masa, lo cual afecta la eficiencia del proceso de secado, retardando su duración.

Cuantitativamente, el efecto del tamaño de partícula es menos notorio al utilizar las condiciones de secado menos favorables, es decir, la velocidad del aire más baja, la temperatura más baja y la masa de material más alta; ya que la combinación de estos factores tiende a dificultar aún más el proceso, según es evidenciado en la Figura 5.12.

5.2.1.4. Influencia de la masa de material

Al igual que al utilizar agua como solvente, un incremento en la masa provocaba una disminución en la velocidad de secado. Este hecho fue comprobado durante la realización de estos experimentos, según se muestra en las Figuras 5.9 a 5.16.

El estudio de Martinello et al. (2003) relaciona la altura del lecho con las variaciones en las velocidades de secado. Debido a la relación entre la masa de material y la altura del lecho, a través del volumen del lecho, se comprueba que al utilizar una masa de material más grande, la velocidad de secado será menor.

Si se trabaja con lechos de mayor volumen, la cantidad de solvente que debe ser removido es mayor, lo cual se traduce en la necesidad de tiempos de secado mayores. Además la resistencia a la transferencia de masa incrementa debido a que se requiere remover una mayor cantidad de humedad interna del material.

Cuantitativamente, el efecto de la masa de material se hace más evidente al utilizar las semillas enteras, velocidades más altas y temperaturas más altas, según se observa en las Figuras 5.9, 5.10, 5.13 y 5.14.

5.2.1.5. Periodos de secado

Prácticamente en todas las curvas se logra apreciar el mismo patrón: al utilizar la temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ e independientemente de la masa de material o el tamaño de partícula, se logra apreciar un período inicial decreciente, según se puede observar en las Figuras 5.9 a 5.12. En cambio, al utilizar la temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$, se logra apreciar un período inicial creciente, según se puede observar en las Figuras 5.13, 5.15 y 5.16. En la Figura 5.14 se observa que una de las curvas tiene un período inicial decreciente que no sigue el mismo patrón que el resto a la misma temperatura, lo cual pudo deberse a alguna variación durante la captación de los datos mientras se hacía la carga del equipo.

El período inicial es creciente en la mayoría de los casos, debido a que existe un contenido de humedad libre en exceso sobre la superficie, el cual al evaporarse, reduce drásticamente esa cantidad hasta alcanzar un contenido de humedad crítico. Esto es debido a que no hay resistencia externa a la transferencia de masa al inicio del proceso. En aquellos casos en los cuales existe un período inicial decreciente, esto podría deberse a que en la superficie existe una gran resistencia a la transferencia de masa. Este fenómeno ocurre cuando el transporte líquido interno no ha alcanzado una velocidad tal que garantice suficiente presencia de humedad en la superficie del sólido, por lo tanto el contenido de humedad libre sobre la superficie es menor al contenido de humedad crítico que se alcanza tiempo después.

El período de velocidad constante se ve influido por la velocidad del aire, siendo más evidente al utilizarse semillas que hojuelas, según se puede observar en las Figuras 5.9, 5.10, 5.13 y 5.14, en las cuales se logra apreciar la desaparición de este período al utilizar una velocidad $v= 1.40$ m/s y un período muy corto al utilizar una velocidad $v= 0.80$ m/s. Al utilizar semillas, la superficie expuesta es más pequeña y por tanto el solvente es removido más rápido si la velocidad del aire es incrementada.

En ninguna de las gráficas se logra apreciar una clara evidencia de la influencia de la temperatura del aire sobre el período de velocidad constante.

El período de velocidad constante tiende a ser más largo al utilizar hojuelas porque toda el área superficial está expuesta al contacto con el aire, por tanto la humedad superficial tarda más tiempo en ser eliminada en su totalidad, según se muestra en las Figuras 5.11, 5.12, 5.15 y 5.16.

Un incremento en la masa de material produce un alargamiento del período de velocidad constante, según se puede observar en las Figuras 5.9 a 5.16, debido a que al contar con más material, la cantidad de solvente que debe removerse es mayor.

En todos los casos en los cuales se utilizaron semillas se puede observar un período final decreciente, tal y como se muestra en las Figuras 5.9, 5.10, 5.13 y 5.14. En cambio, al utilizar hojuelas se observa la prevalencia de un período de velocidad

constante, que tiende a ser más evidente al utilizar la masa de material más grande, según se observa en las Figuras 5.11, 5.12, 5.13 y 5.14, esto debido a que la cantidad de solvente que se encuentra de forma superficial es mayor al tener un área superficial más grande expuesta al contacto con el aire; y al utilizar una masa de material más grande la cantidad de solvente que debe ser removida es mayor.

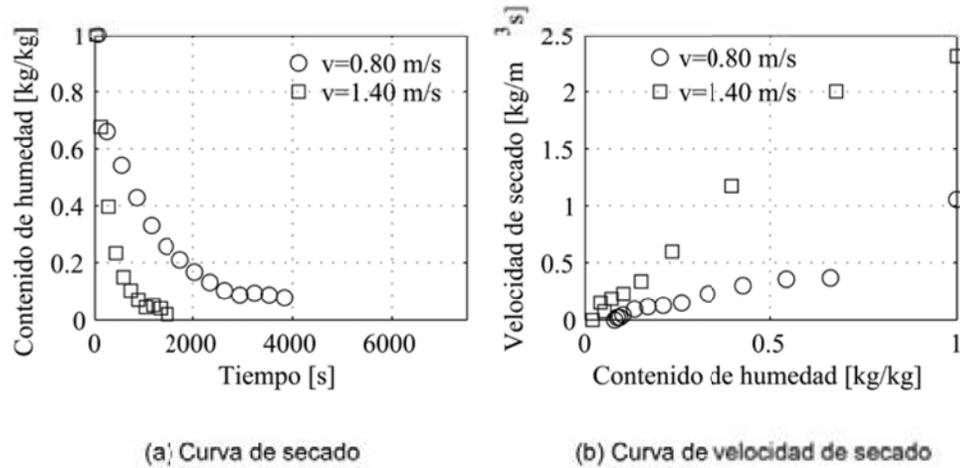


Figura 5.9: Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de semillas de nim humedecidas con etanol a temperatura $T = 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m = 0.40 \text{ Kg}$

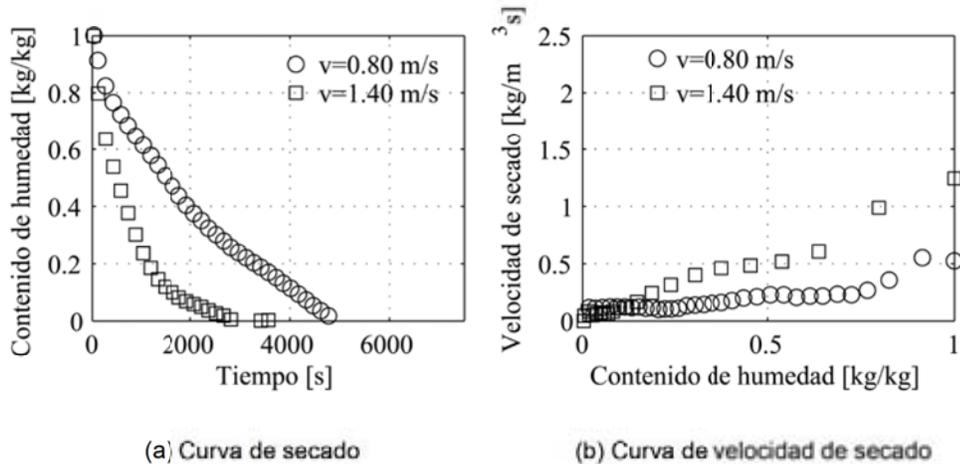


Figura 5.10: Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de semillas de nim humedecidas con etanol a temperatura $T = 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m = 0.80 \text{ Kg}$

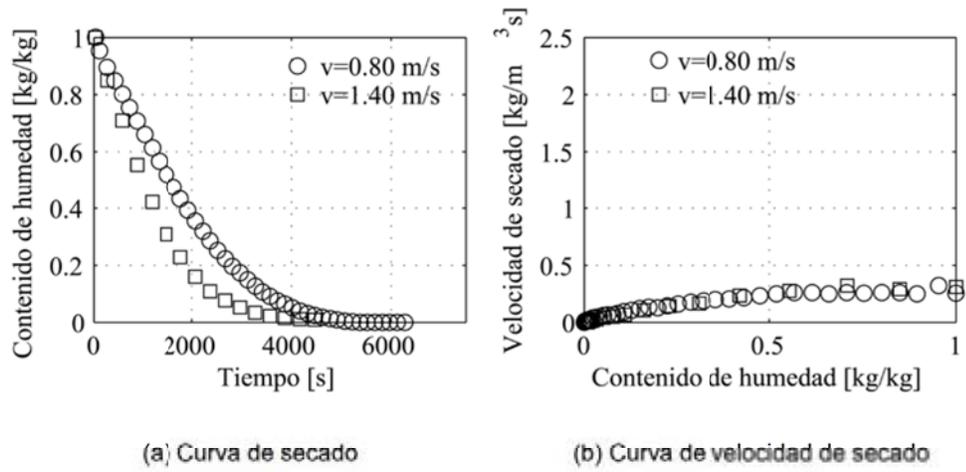


Figura 5.11: Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con etanol a temperatura $T = 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m = 0.40 \text{ Kg}$

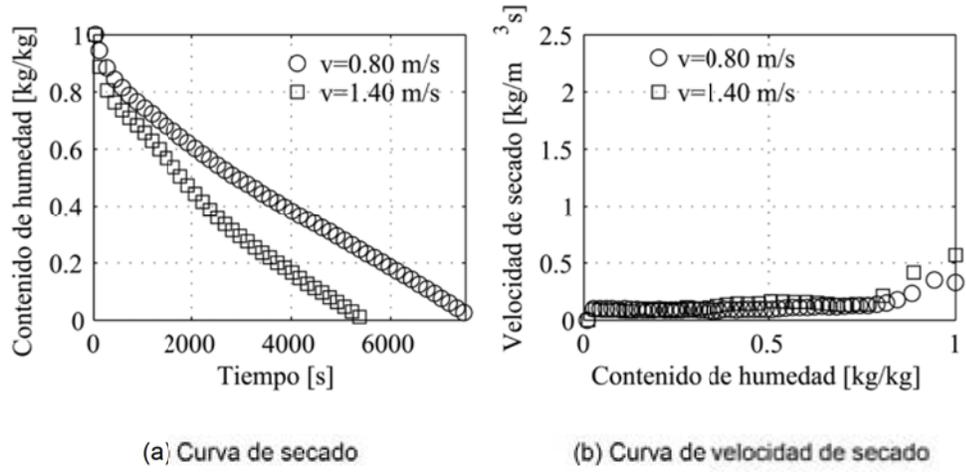
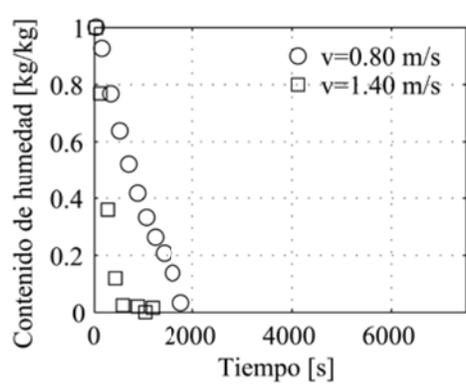
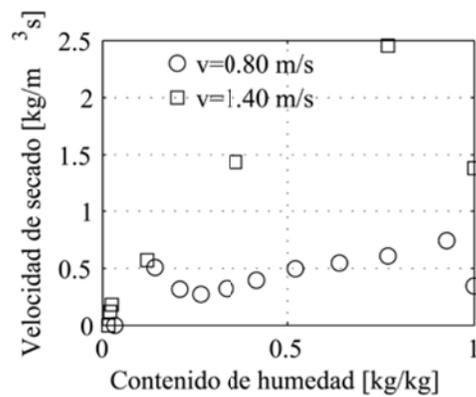


Figura 5.12: Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con etanol a temperatura $T = 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m = 0.80 \text{ Kg}$

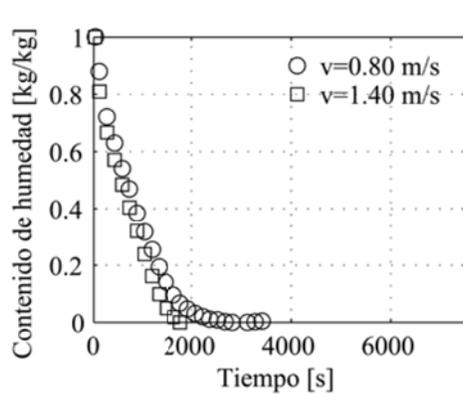


(a) Curva de secado

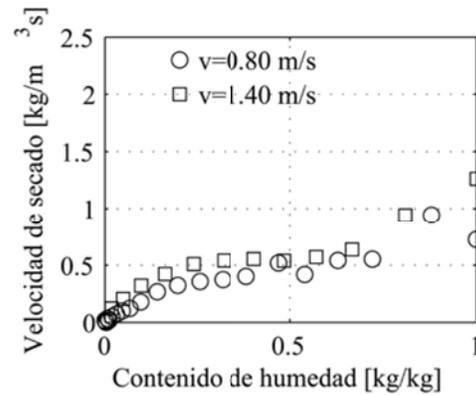


(b) Curva de velocidad de secado

Figura 5.13: Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de semillas de nim humedecidas con etanol a temperatura $T=110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m=0.40\text{ Kg}$



(a) Curva de secado



(b) Curva de velocidad de secado

Figura 5.14: Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de semillas de nim humedecidas con etanol a temperatura $T=110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m=0.80\text{ Kg}$

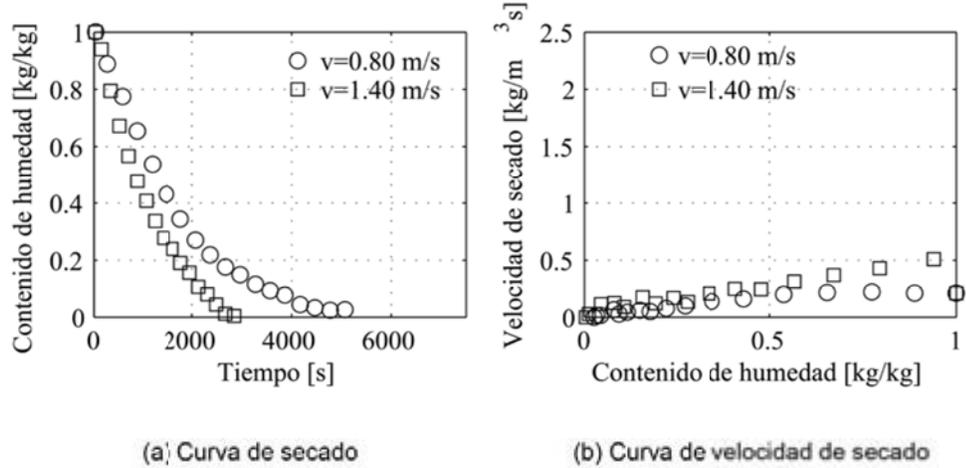


Figura 5.15: Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con etanol a temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40 \text{ Kg}$

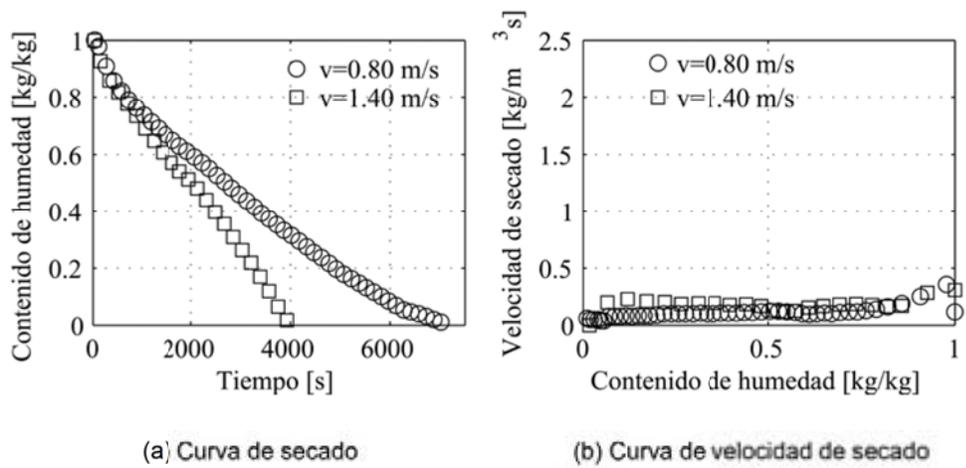


Figura 5.16: Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con etanol a temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80 \text{ Kg}$

5.2.3. Hexano

Las velocidades de secado originadas al utilizar hexano como solvente fueron superiores a las originadas al utilizar los otros dos solventes, debido a que la volatilidad de éste es la más alta, lo cual está relacionado a su menor punto de ebullición normal (68°C), según se muestra en las Figuras 5.17 a 5.24.

5.2.2.1. Influencia de la velocidad del aire

De igual forma que al utilizar agua y etanol como solventes, durante la realización de estos experimentos se logró apreciar que al incrementarse la velocidad del aire, también se incrementaba la velocidad de secado. En las figuras 5.17 a 5.24 se logra apreciar este hecho.

El incremento de la velocidad del aire favorece la transferencia de masa del solvente hacia el aire que fluye a través del lecho, por lo que la eficiencia del proceso de secado es incrementada, acortándose su duración. Al utilizarse hexano como solvente y una velocidad del aire alta se consigue la remoción de forma prácticamente instantánea, debido a su alta volatilidad.

El efecto de la velocidad del aire tiende a ser más notorio al utilizar las semillas enteras, la temperatura más alta y la menor masa de material, es decir, las condiciones de secado más favorables, según se muestra en la Figura 5.21.

5.2.1.2. Influencia de la temperatura del aire

Al igual que al utilizar agua y etanol como solventes, durante la realización de estos experimentos se logró apreciar que al incrementarse la temperatura del aire, también se incrementaba la velocidad de secado. En las figuras 5.17 a 5.24 se logra apreciar este hecho.

El efecto de la temperatura del aire se hace más evidente al utilizar las semillas enteras, la velocidad más alta y la menor masa de material, es decir, las condiciones de secado más favorables, según se muestra en la Figura 5.21.

Este fenómeno se debe a que al utilizar una mayor temperatura del aire, la transferencia de energía hacia el material se incrementa lo cual favorece la evaporación más rápida de la humedad superficial. La reducción drástica de la humedad superficial se observa también en la Figura 5.21, en la cual no se aprecia la existencia de un período de velocidad constante al utilizar la velocidad más alta.

5.2.1.3. Influencia del tamaño de partícula

De igual manera que al utilizar agua y etanol como solventes, durante la realización de estos experimentos se logró apreciar que la velocidad de secado era superior al utilizar las semillas que al utilizar las hojuelas, según se muestra en las Figuras 5.17 a 5.24.

Según ha sido explicado previamente, este fenómeno se debe a la porosidad del lecho, mostrada en el Apéndice C.

El efecto de la resistencia a la transferencia de masa de un lecho de hojuelas es observado al utilizar las condiciones de secado menos favorables, es decir, velocidad y temperatura más bajas y masa de material más grande, según se muestra en la Figura 5.20.

5.2.1.4. Influencia de la masa de material

Al utilizar agua y etanol como solventes, se observó que un incremento en la masa provocaba una disminución en la velocidad de secado. Este hecho fue comprobado también al utilizar hexano como solvente, según se muestra en las Figuras 5.17 a 5.24. Este fenómeno fue explicado por Martinello et al. (2003) y analizado previamente.

5.2.1.5. Períodos de secado

Prácticamente en todas las curvas se logra apreciar el mismo patrón, ya que al utilizar la temperatura $T = 60^{\circ}\text{C}$ e independientemente de la masa de material o el tamaño de partícula, se logra apreciar un período inicial decreciente, según se puede observar en las Figuras 5.17 a 5.20, salvo en los casos en los cuales se utilizó una masa $m = 0.80 \text{ Kg}$ y una velocidad $v = 0.80 \text{ m/s}$ en que se logra apreciar un período inicial creciente, según se muestra en las Figuras 5.18 y 5.20. En cambio, al utilizar la temperatura $T = 110^{\circ}\text{C}$, se logra apreciar un período inicial creciente, según se puede apreciar en las Figuras 5.21 a 5.24, salvo en los casos en los cuales se utilizó semillas enteras y una velocidad $v = 1.40 \text{ m/s}$ en que se logra apreciar un período inicial decreciente, según se muestra en las Figuras 5.21 y 5.22.

El período inicial es creciente en la mayoría de los casos, debido a que existe un contenido de humedad libre en exceso sobre la superficie, el cual al evaporarse, reduce drásticamente esa cantidad hasta alcanzar un contenido de humedad crítico. Esto es debido a que no hay resistencia externa a la transferencia de masa al inicio del proceso. En aquellos casos en los cuales existe un período inicial decreciente, esto podría deberse a que en la superficie existe una gran resistencia a la transferencia de masa. Este fenómeno ocurre cuando el transporte líquido interno no ha alcanzado una velocidad tal que garantice suficiente presencia de humedad en la superficie del sólido, por lo tanto el contenido de humedad libre sobre la superficie es menor al contenido de humedad crítico que se alcanza tiempo después.

El período de velocidad constante se ve influido por la velocidad del aire, siendo más evidente al utilizarse semillas que hojuelas, según se puede observar en las Figuras 5.17, 5.18, 5.21 y 5.22, en las cuales se logra apreciar la desaparición de este período al utilizar una velocidad $v = 1.40 \text{ m/s}$ y un período muy corto al utilizar una velocidad $v = 0.80 \text{ m/s}$; hecho relacionado a la desaparición casi instantánea del solvente remanente en la superficie.

En ninguna de las gráficas se logra apreciar una clara evidencia de la influencia de la temperatura del aire sobre el período de velocidad constante.

El período de velocidad constante tiende a ser más largo al utilizar hojuelas porque toda el área superficial está expuesta al contacto con el aire, por tanto la humedad superficial tarda más tiempo en ser eliminada en su totalidad, según se muestra en las Figuras 5.19, 5.20, 5.23 y 5.24.

Un incremento en la masa de material produce un alargamiento del período de velocidad constante, según se puede observar en las Figuras 5.17 a 5.24.

En todos los casos se puede apreciar un período final decreciente, lo cual muy probablemente se deba a la alta volatilidad del hexano que favorece la reducción rápida de la humedad superficial, lo cual provoca que el período de velocidad constante sea más corto aún cuando se utilicen hojuelas y el área superficial expuesta sea mayor, según se muestra en las Figuras 5.17 a 5.24.

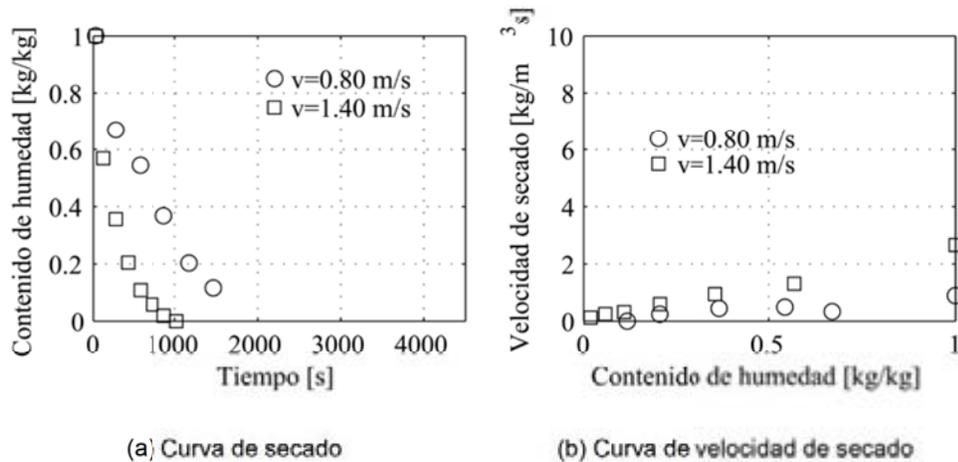


Figura 5.17: Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de semillas de nim humedecidas con hexano a temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40 \text{ Kg}$

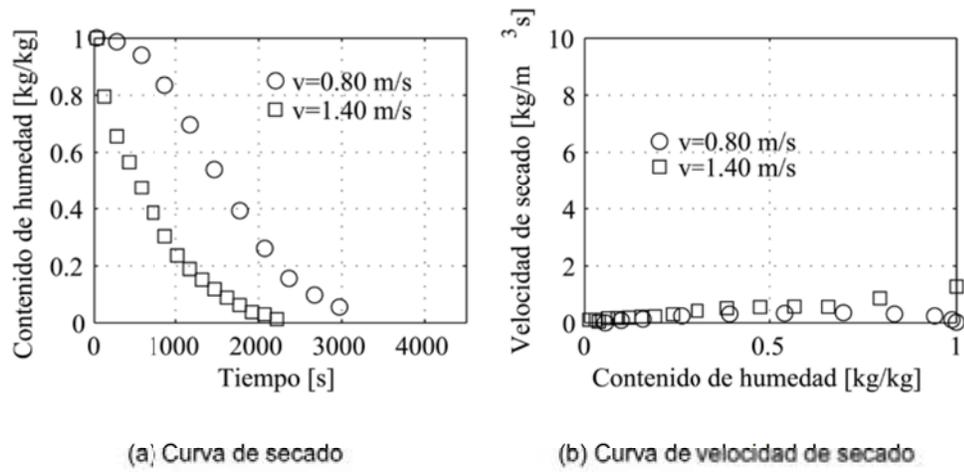


Figura 5.18: Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de semillas de nim humedecidas con hexano a temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80 \text{ Kg}$

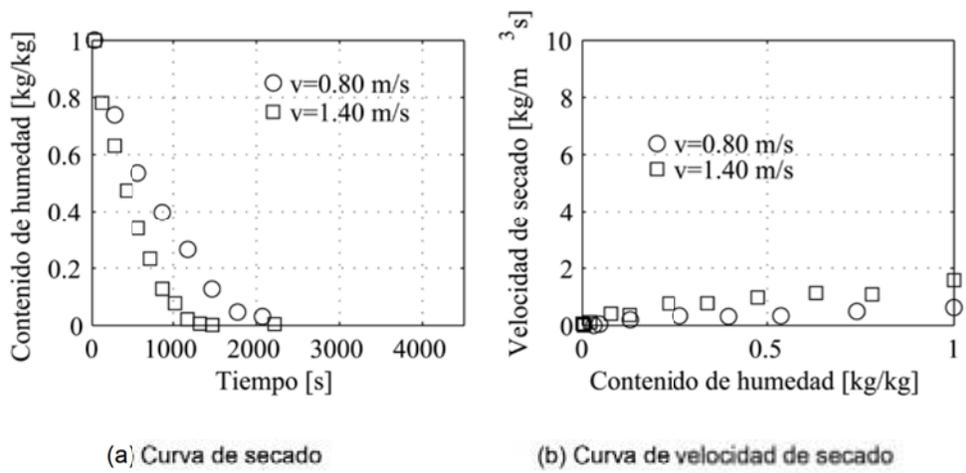


Figura 5.19: Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con hexano a temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40 \text{ Kg}$

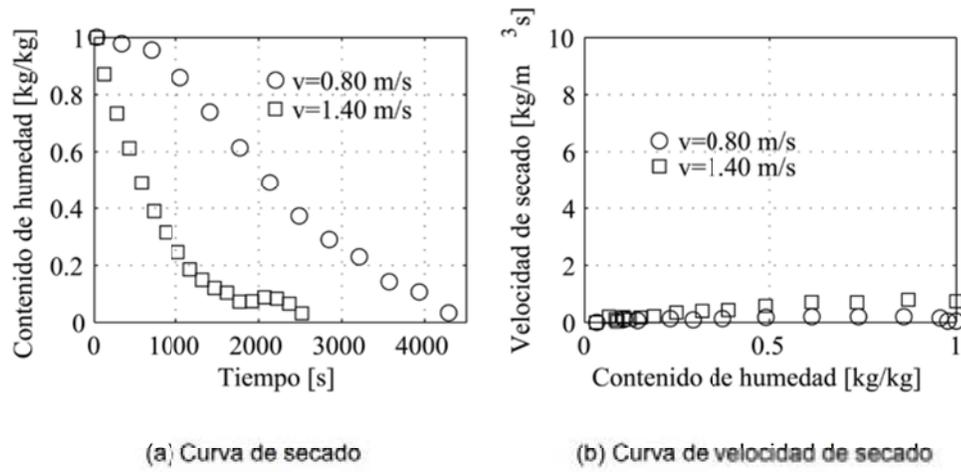


Figura 5.20: Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con hexano a temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80 \text{ Kg}$

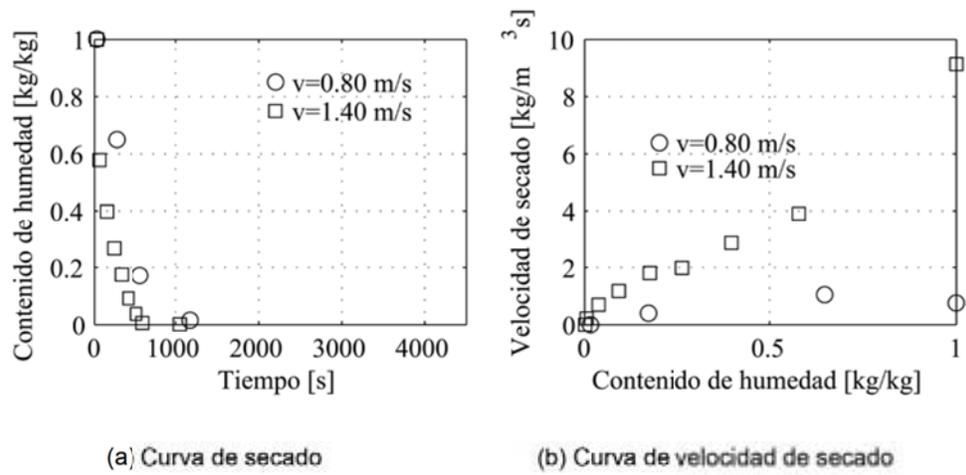
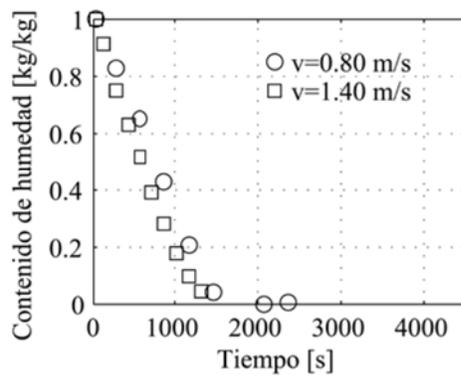
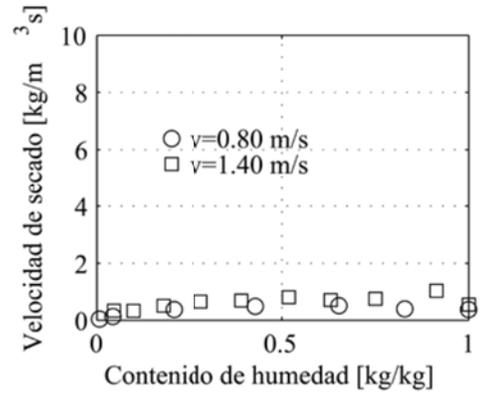


Figura 5.21: Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de semillas de nim humedecidas con hexano a temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40 \text{ Kg}$

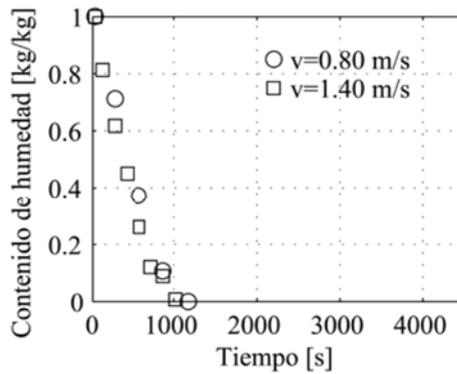


(a) Curva de secado

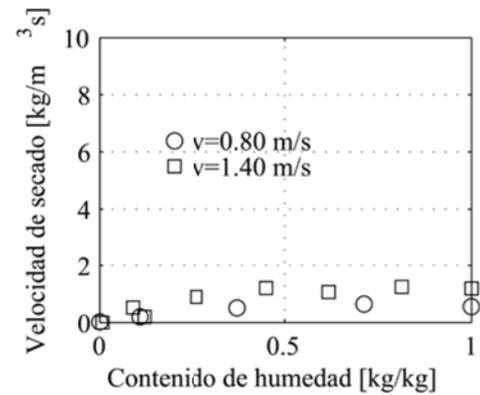


(b) Curva de velocidad de secado

Figura 5.22: Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de semillas de nim humedecidas con hexano a temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80 \text{ Kg}$



(a) Curva de secado



(b) Curva de velocidad de secado

Figura 5.23: Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con hexano a temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40 \text{ Kg}$

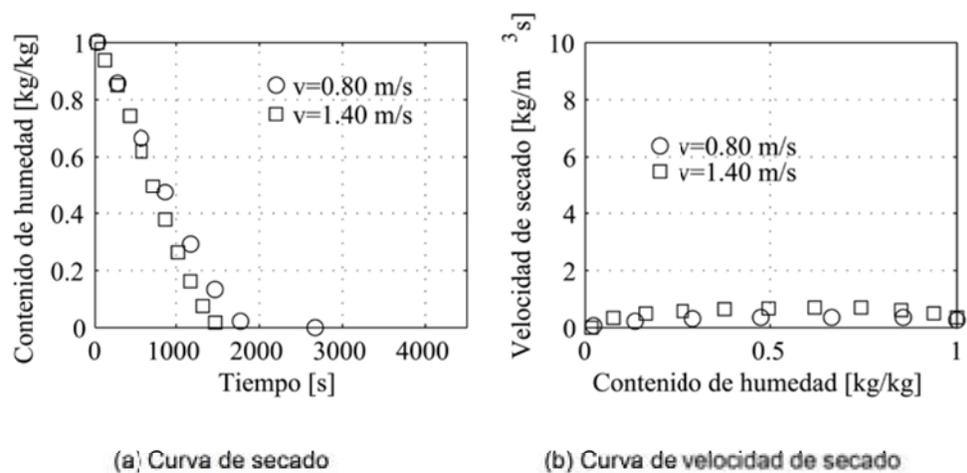


Figura 5.24: Influencia de la velocidad del aire en el proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con hexano a temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80 \text{ Kg}$

5.2.4. Análisis estadístico de los resultados

Con el objetivo de analizar la significancia estadística de las variables en estudio sobre la velocidad de secado, se llevó a cabo un análisis de varianza utilizando el software Statgraphics Plus 4.1

En el Apéndice E se muestran las tablas de análisis de varianza para cada solvente, en las cuales se presenta la descomposición de la variabilidad de la velocidad de secado de acuerdo a las contribuciones de cada variable despreciando los efectos del resto de variables. Además se muestra el efecto de las interacciones de todas las variables sobre la velocidad de secado. El valor p prueba la significancia estadística de cada factor; su valor debe ser menor a 0.05 para detectar un efecto significativo.

En el caso de los experimentos realizados utilizando agua como solvente, todas las variables presentan significancia estadística sobre la velocidad de secado. Esto muy probablemente se deba a que debido a la baja volatilidad del agua, todos los factores externos tienden a influir el proceso de secado sobremanera. Únicamente las interacciones entre la velocidad y la temperatura y entre la velocidad y la masa de material son significativas.

En el caso de los experimentos realizados utilizando etanol y hexano como solventes, las variables velocidad, temperatura y masa de material son estadísticamente significativas sobre la velocidad de secado. El tamaño de partícula resultó sin presentar significancia, a pesar de que en las curvas de secado y

velocidad de secado se logra observar una ligera diferencia entre los experimentos realizados al utilizar ambas condiciones.

La interacción entre la velocidad y la temperatura presentó significancia estadística para el etanol; en cambio, únicamente la interacción entre la velocidad y la masa de material presentó significancia estadística para el hexano.

En el apéndice E también se muestran el gráfico de valores individuales y el gráfico de caja y bigotes, que corresponden a las velocidades de secado para cada solvente. En ambos gráficos se logra apreciar la variabilidad de la velocidad de secado para cada solvente. Se puede notar que la variabilidad presenta una tendencia creciente con respecto a la volatilidad del solvente, registrándose los valores más variables cuando se utilizó hexano. Esto podría ser explicado tomando en consideración la aleatoriedad del acomodamiento de las partículas en el interior del lecho, lo cual al parecer genera resultados más variables al utilizar un solvente más volátil debido a un fenómeno de evaporación no uniforme.

Se llevaron a cabo algunas réplicas de los experimentos para verificar la repetitividad de los resultados. Los experimentos número 9 y 16 fueron replicados al utilizar el solvente agua; los experimentos 5 y 14 al utilizar el solvente etanol; y los experimentos 3 y 15 al utilizar el solvente hexano. Se verificó la misma tendencia cualitativa y cuantitativa de las curvas de secado y velocidad de secado.

Durante la realización de los experimentos se observó la existencia de ciertas variables no controlables, cuya variabilidad podría haber tenido cierta incidencia sobre los resultados obtenidos en cada experimento, entre ellas se destacan la temperatura y humedad relativa ambiental. El efecto de la temperatura puede ser despreciado, ya que gracias a la presencia del controlador de temperatura, ésta puede ser manejada a un valor predeterminado. En cambio, a pesar que al utilizar la columna de adsorción se lograba remover la humedad inicial del aire, el hecho de haber realizado experimentos en un día en el cual hubiera existido un exceso de humedad, podría haber reducido la eficiencia de la columna y esto podría haber incidido en los resultados experimentales.

En el apéndice F se presenta un gráfico de valores individuales y uno de caja y bigotes para mostrar la tendencia de los valores de humedad y su variabilidad al haber realizado los experimentos con cada solvente. Se puede observar que existió mayor variabilidad en la humedad relativa al realizarse los experimentos en los cuales se utilizó hexano como solvente, esto podría ser utilizado para suponer que de cierta forma la alta variabilidad en los resultados experimentales se debiera a esto.

5.3. Perfiles de temperatura

En todos los experimentos se recopilaron datos para elaborar los gráficos de perfiles de temperatura generados durante el proceso de secado, según se muestra en las Figuras 5.25 a 5.72.

Se colocaron cuatro termopares a diferentes profundidades dentro del lecho, según se mencionó en la sección IV. La temperatura T1 corresponde al termopar ubicado en la parte inferior del lecho, luego T2, T3 y T4 continúan en el mismo orden desde la parte inferior hacia la parte superior.

En todas las figuras se puede apreciar una etapa de enfriamiento, ésta es originada durante la evaporación de la humedad superficial, ya que los solventes toman la energía del sólido, provocando un descenso en la temperatura hasta que se alcanza un valor mínimo en el período de velocidad constante.

A medida que la humedad superficial va siendo removida, la temperatura del sólido empieza a incrementar hasta alcanzar un valor constante que nunca es igual a la temperatura del aire, debido a la transferencia de calor hacia los alrededores. Por otro lado, se observa un gradiente de temperatura a lo largo del lecho, el cual se debe a su conductividad térmica, que impide que las temperaturas se igualen.

El período inicial y el período constante de secado se corresponden con la etapa de enfriamiento de estos perfiles. El momento en el cual la temperatura empieza a incrementar se puede relacionar con la etapa decreciente en las curvas de velocidad de secado, debido a que ya no existe humedad superficial a ser evaporada y únicamente resta la migración de la humedad interna.

Sin embargo, el alcanzar el estado estacionario de las temperaturas no necesariamente significa que el proceso de secado haya finalizado, porque puede restar humedad interna por remover, tal como ocurrió en los experimentos en los cuales se utilizó agua como solvente.

En las Figuras 5.25 a 5.40 se muestran los perfiles de temperatura generados al llevar a cabo los procesos de secado en los que se utilizó agua como solvente. En todos los casos, el valor de temperatura promedio mínimo en el período de velocidad constante fue 25°C, siendo éste un valor superior al obtenido con el etanol, lo cual indica que el agua toma menos energía del medio para evaporarse.

El comportamiento esperado sería que todas las temperaturas se incrementaran de tal forma que ninguna sobrepasara a la otra. Sin embargo, en algunos casos, tales como los mostrados en las Figuras 5.28, 5.30 y 5.40, se observa que las temperaturas marcadas por los termopares ubicados en la parte superior del lecho sobrepasan a las temperaturas de la parte inferior, esto pudo haberse debido a la formación de un punto ciego en las cercanías de alguno de los termopares debido a la existencia de zonas aisladas al flujo de aire caliente que ingresa por la parte inferior de la columna, especialmente en las esquinas, donde se mantiene la temperatura en un valor constante inferior al que se podría haber obtenido en cualquier otro punto del lecho a la misma profundidad.

Otro aspecto curioso es el que se muestra en las Figuras 5.26, 5.29, 5.37 y 5.40, en las cuales se logra apreciar que la temperatura registrada por los termopares ubicados en la parte superior del lecho es aproximadamente 20°C inferior a las

temperaturas alcanzadas en el resto del lecho. La ecuación B.5 mostrada en el apéndice B, define la resistencia térmica. En esta ecuación se puede observar que ocurre una mayor resistencia a la transferencia de calor si se cuenta con una longitud más grande. Las Figuras 5.26 y 5.40 corresponden a lechos de 0.80 Kg, por tanto más altos, por lo que el hecho de alcanzarse una temperatura muy diferente con el termopar superior podría explicarse sobre base a la resistencia a la transferencia de calor. En los otros experimentos en los cuales se utilizó también una masa de 0.80 Kg, no ocurrió el mismo fenómeno, esto pudo deberse a que los termopares hayan quedado ubicados más cercanamente, por lo que aún cuando la resistencia a la transferencia de calor es mayor, las temperaturas registradas son más similares. En cuanto a las Figuras 5.29 y 5.37 que están referidas a lechos más pequeños, podría haberse originado el fenómeno de la existencia de zonas aisladas al flujo de aire caliente, por lo que las temperaturas alcanzadas difirieron considerablemente de las marcadas por el resto de los termopares.

En las Figuras 5.41 a 5.56 se muestran los perfiles de temperatura generados al llevar a cabo los procesos de secado en los que se utilizó etanol como solvente. En todos los casos, el valor de temperatura promedio mínimo en el período de velocidad constante fue 10°C , siendo éste el valor más pequeño obtenido en comparación con los otros dos solventes, lo cual indica que el etanol es el solvente que requiere más energía del medio para evaporarse.

Al igual que al utilizar agua, en las Figuras 5.41, 5.43, 5.44, 5.47, 5.48, 5.50, 5.52, 5.54, 5.55 y 5.56 se observó el fenómeno de incremento de las temperaturas, de tal forma que las registradas por termopares ubicados en la parte superior del lecho sobrepasan a las registradas por los termopares ubicados en la parte inferior.

En la Figura 5.45 se observa una diferencia de aproximadamente 20°C entre las temperaturas registradas por los dos termopares ubicados en la parte inferior y los otros dos ubicados en la parte superior, lo cual pudo deberse a que los termopares colocados en el fondo se hayan ubicado sobre las semillas que se encontraban en contacto directo con la rejilla de metal y por tanto las que alcanzaron temperaturas más cercanas a la del aire caliente que acababa de ingresar al equipo.

En las Figuras 5.57 a 5.72 se muestran los perfiles de temperatura generados al llevar a cabo los procesos de secado en los cuales se utilizó hexano como solvente. En todos los casos, el valor de temperatura promedio mínimo en el período de velocidad constante fue 30°C , siendo éste el valor más alto obtenido en comparación con los otros dos solventes, lo cual indica que el hexano es el solvente que requiere menos energía del medio para evaporarse. Este hecho también pudo deberse a la alta volatilidad del hexano, cuyo proceso de evaporación ocurre instantáneamente, por lo que a pesar de ocurrir el descenso en la temperatura del sólido, debido a que todo el solvente se ha volatilizado, ésta empieza a incrementarse casi de inmediato.

Al igual que al utilizar agua y etanol, se observó el mismo fenómeno en las temperaturas, es decir, las superiores se incrementaban más que las temperaturas

registradas por los termopares ubicados en la parte inferior, según se muestra en las Figuras 5.59, 5.61, 5.62, 5.63, 5.64, 5.66, 5.68, 5.70 y 5.72.

En las Figuras 5.55 y 5.66 se observa un fenómeno peculiar, las temperaturas registradas por los dos termopares ubicados en la parte inferior del lecho no descienden considerablemente y se mantienen muy cercanas al valor de la temperatura del aire, lo cual pudo deberse a que los termopares se hayan ubicado justo sobre las semillas que hicieron contacto directo con la rejilla de metal y por tanto aquellas cuya temperatura empezó a incrementar casi instantáneamente debido a la alta volatilidad del hexano.

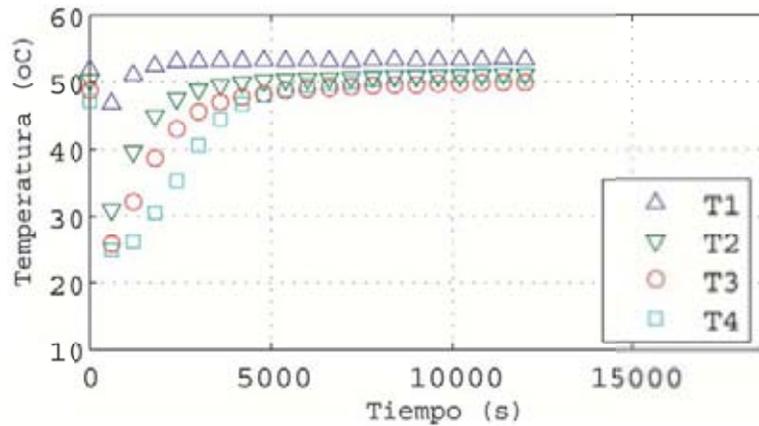


Figura 5.25: Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con agua a velocidad $v = 0.80 \text{ m/s}$, temperatura $T = 60^\circ\text{C}$ y una masa $m = 0.40 \text{ Kg}$

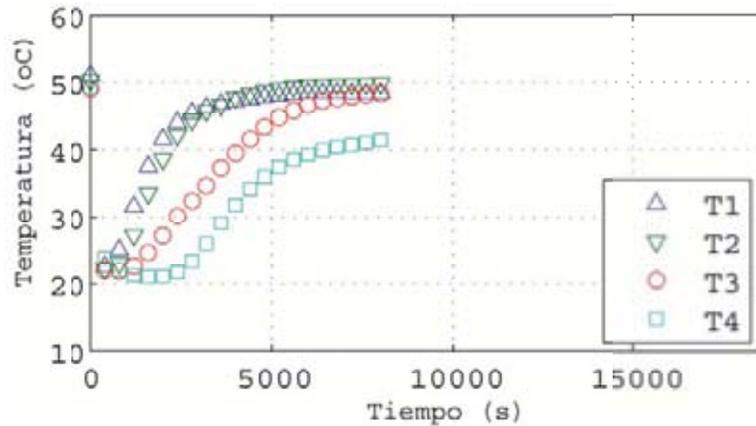


Figura 5.26: Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con agua a velocidad $v = 0.80 \text{ m/s}$, temperatura $T = 60^\circ\text{C}$ y una masa $m = 0.80 \text{ Kg}$

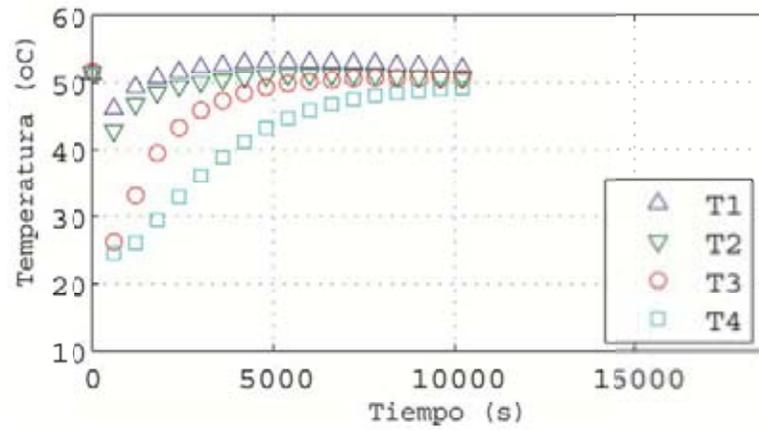


Figura 5.27: Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con agua a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40$ Kg

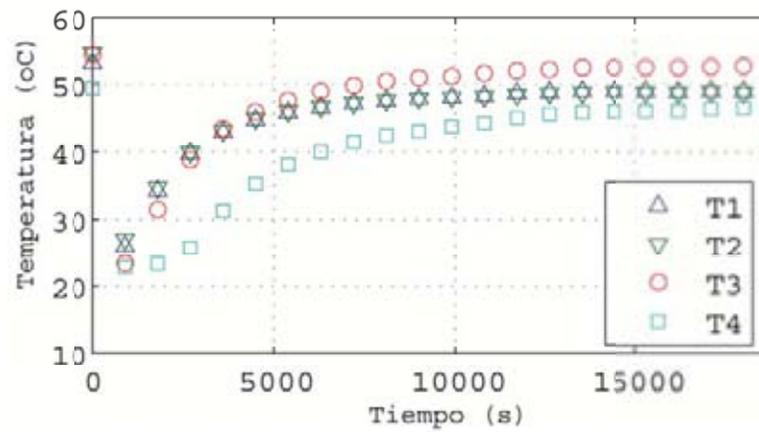


Figura 5.28: Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con agua a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80$ Kg

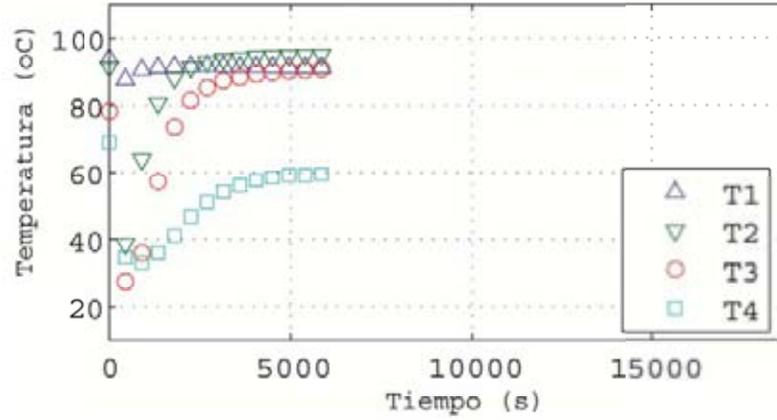


Figura 5.29: Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con agua a velocidad $v = 0.80$ m/s, temperatura $T = 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m = 0.40$ Kg

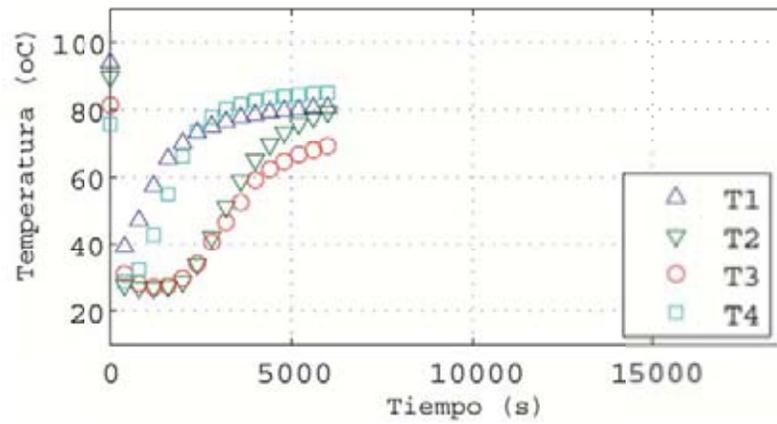


Figura 5.30: Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con agua a velocidad $v = 0.80$ m/s, temperatura $T = 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m = 0.60$ Kg

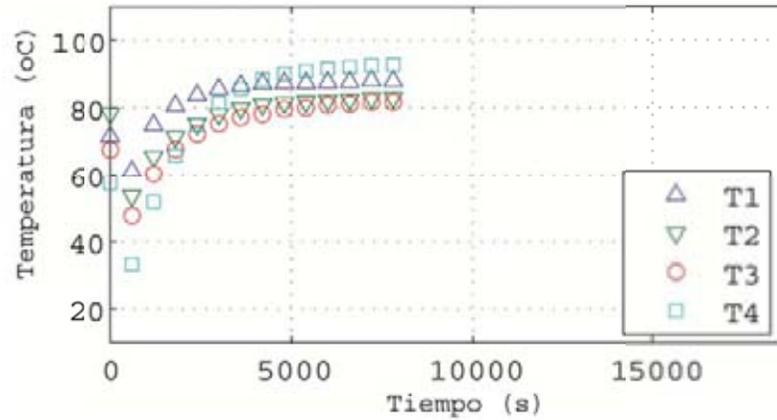


Figura 5.31: Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con agua a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40$ Kg

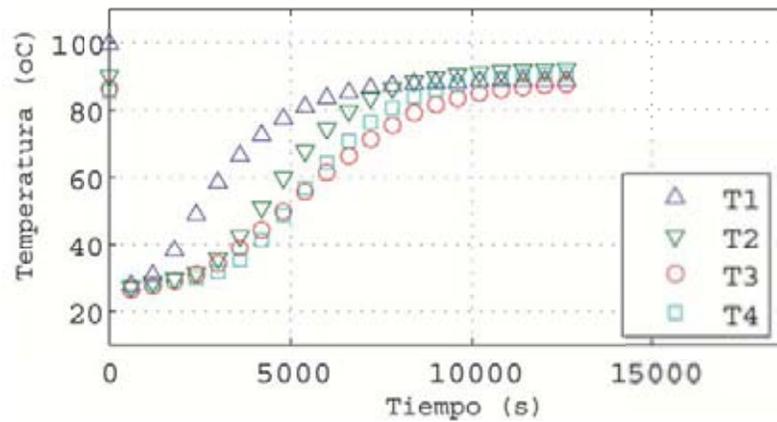


Figura 5.32: Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con agua a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80$ Kg

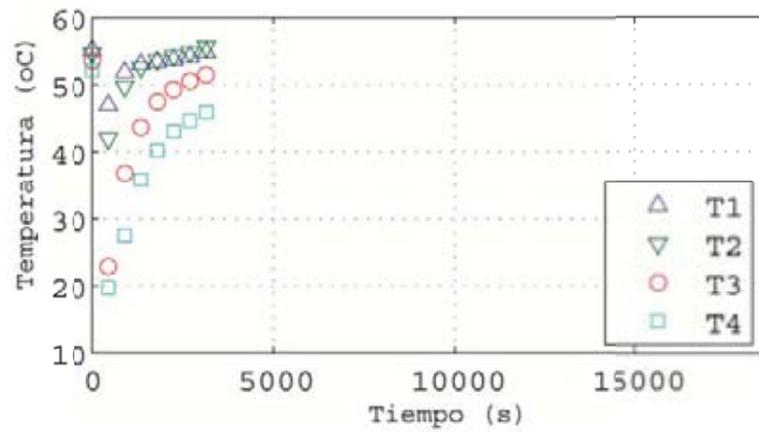


Figura 5.33: Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con agua a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40$ Kg

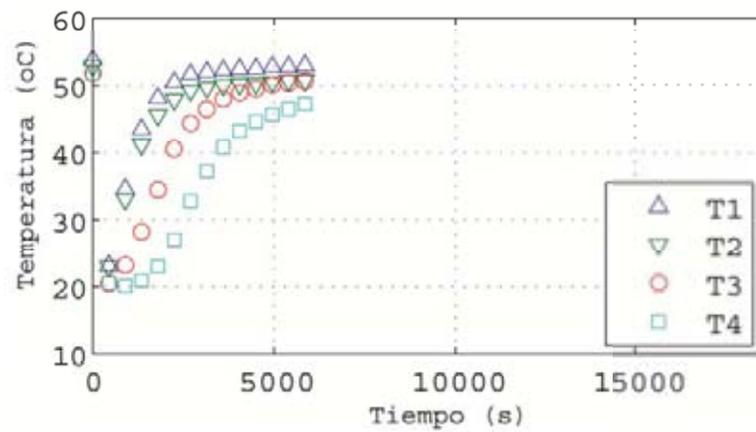


Figura 5.34: Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con agua a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80$ Kg

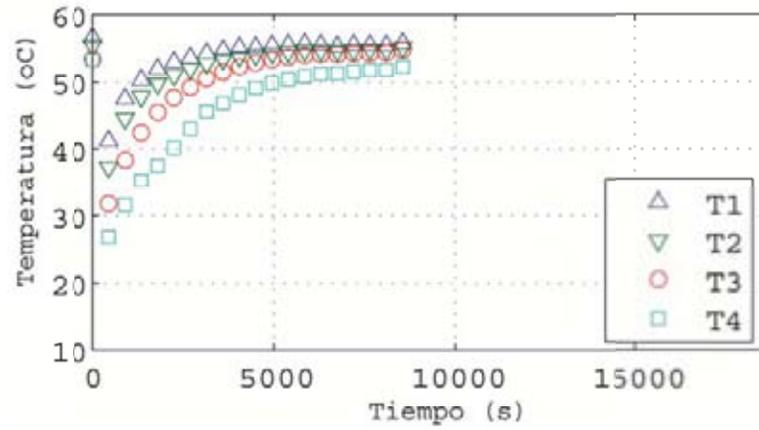


Figura 5.35: Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con agua a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40$ Kg

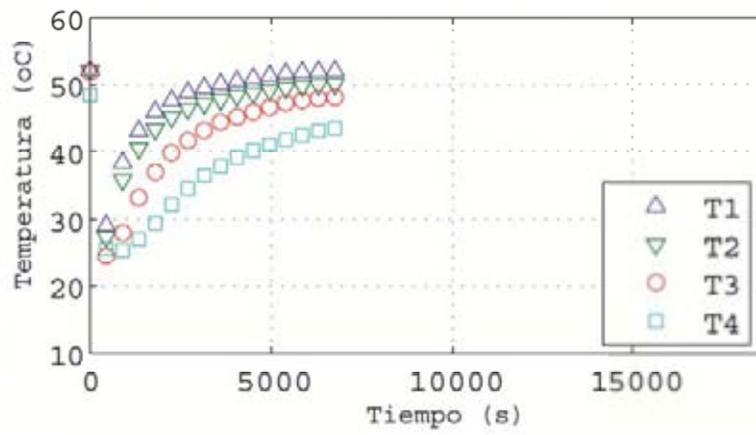


Figura 5.36: Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con agua a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80$ Kg

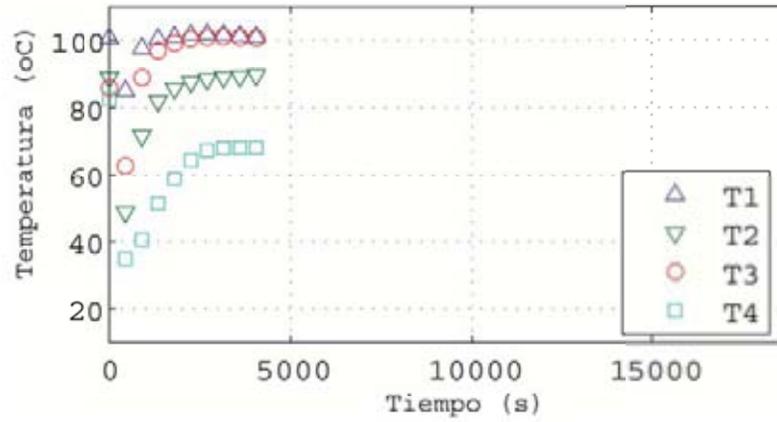


Figura 5.37: Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con agua a velocidad $v = 1.40 \text{ m/s}$, temperatura $T = 110\text{oC}$ y una masa $m = 0.40 \text{ Kg}$

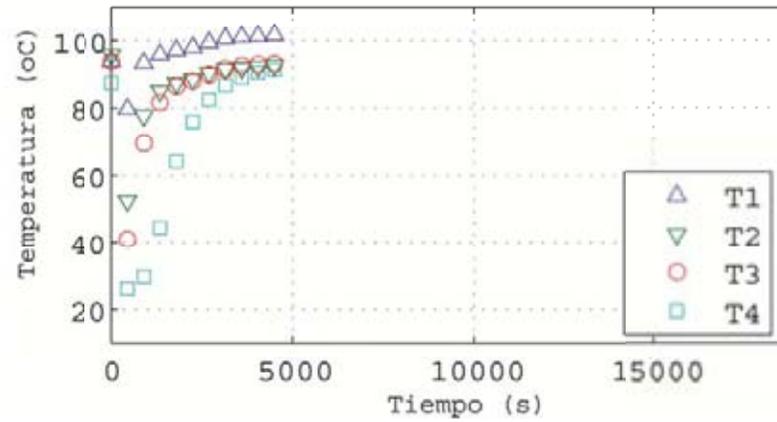


Figura 5.38: Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con agua a velocidad $v = 1.40 \text{ m/s}$, temperatura $T = 110\text{oC}$ y una masa $m = 0.80 \text{ Kg}$

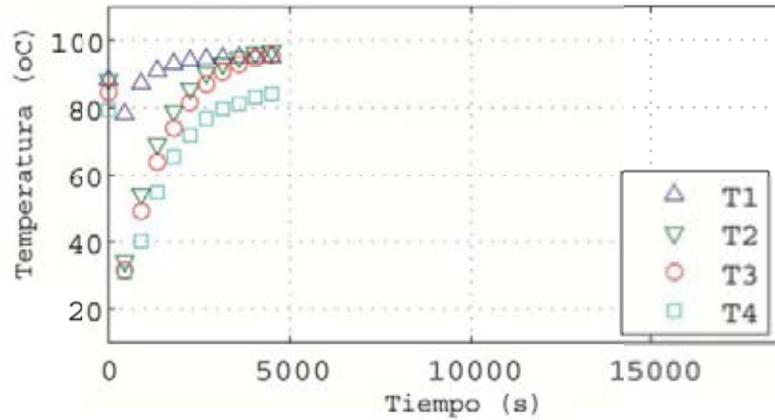


Figura 5.39: Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con agua a velocidad $v = 1.40$ m/s, temperatura $T = 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m = 0.40$ Kg

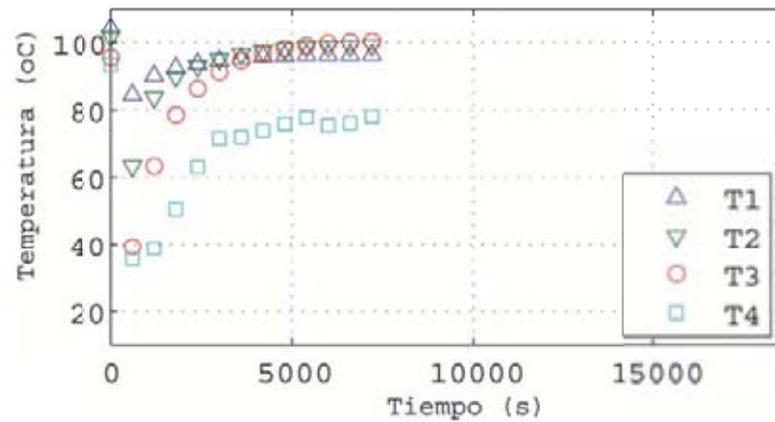


Figura 5.40: Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con agua a velocidad $v = 1.40$ m/s, temperatura $T = 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m = 0.80$ Kg

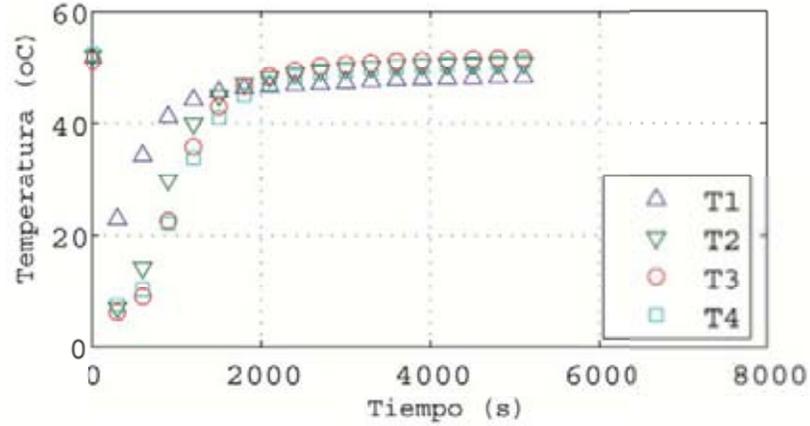


Figura 5.41: Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 60\text{oC}$ y una masa $m= 0.40$ Kg

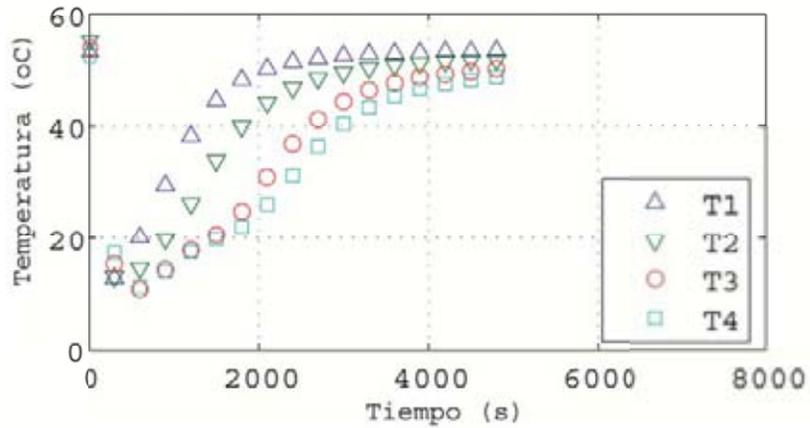


Figura 5.42: Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 60\text{oC}$ y una masa $m= 0.80$ Kg

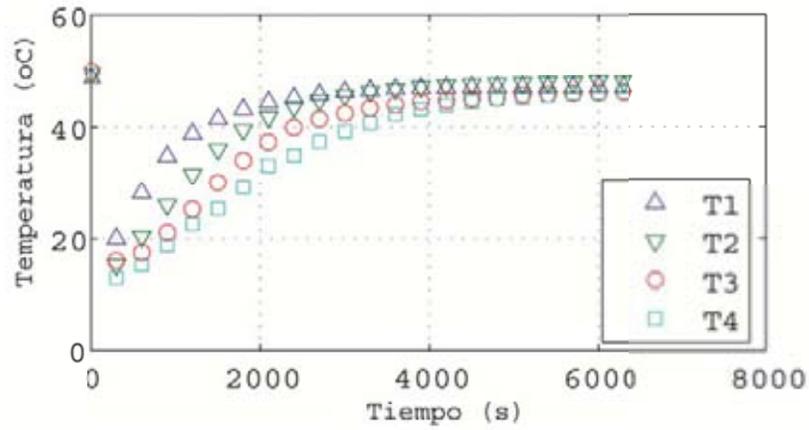


Figura 5.43: Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40$ Kg

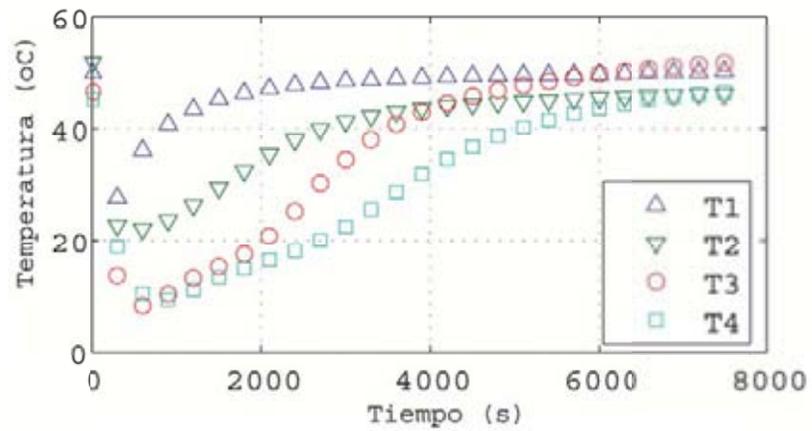


Figura 5.44: Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80$ Kg

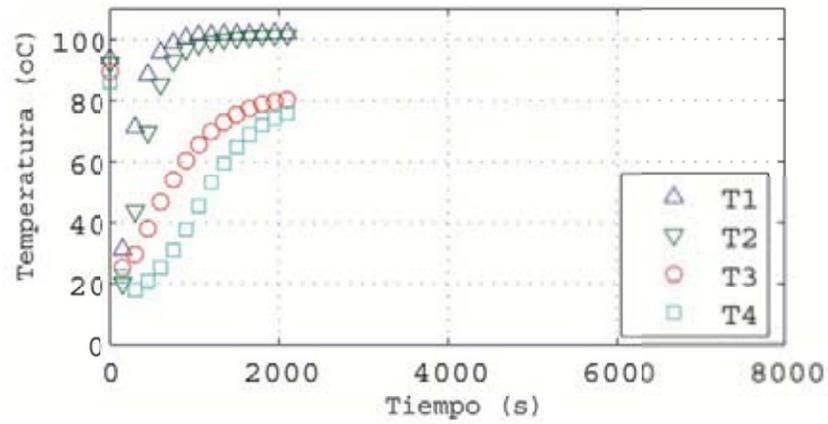


Figura 5.45: Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v=0.80$ m/s, temperatura $T=110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m=0.40$ Kg

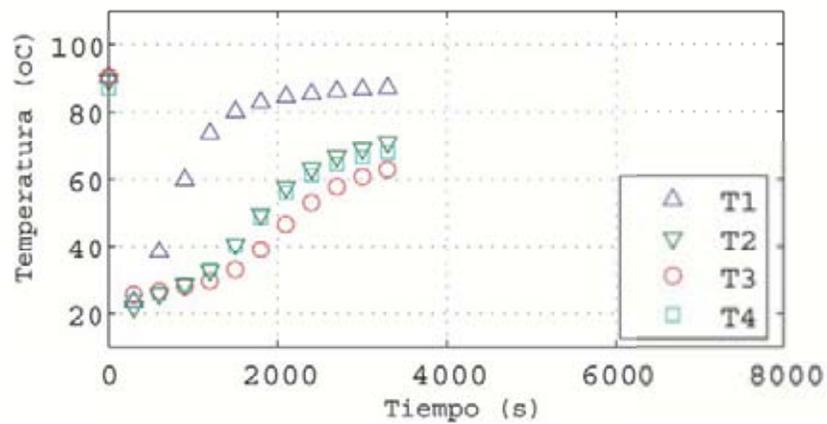


Figura 5.46: Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v=0.80$ m/s, temperatura $T=110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m=0.80$ Kg

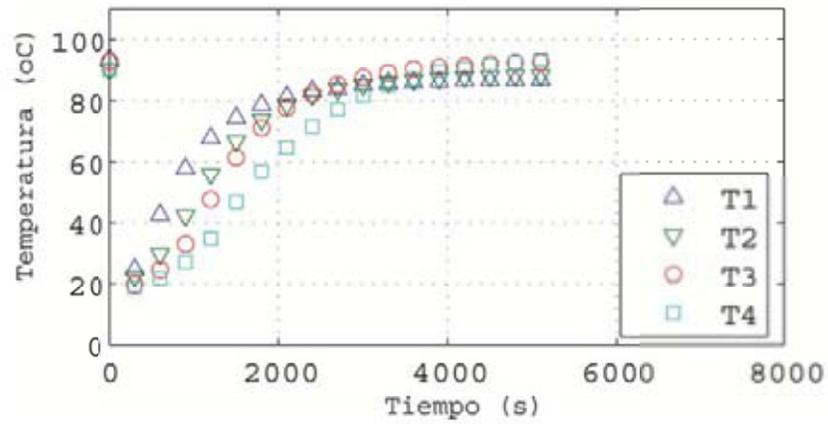


Figura 5.47: Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v=0.80$ m/s, temperatura $T=110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m=0.40$ Kg

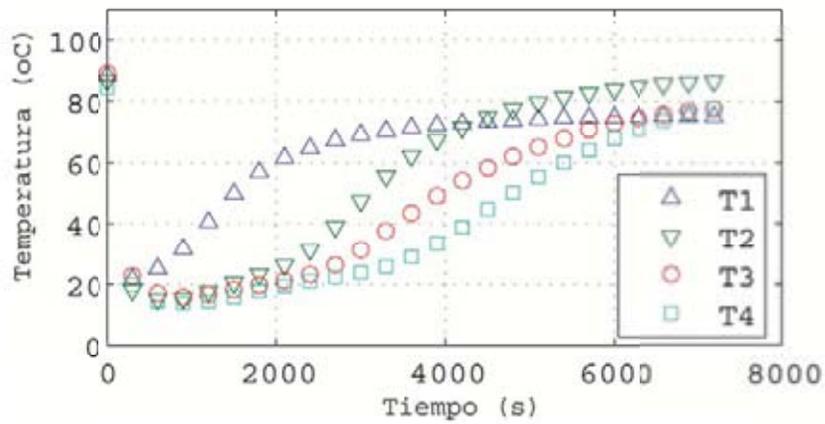


Figura 5.48: Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v=0.80$ m/s, temperatura $T=110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m=0.80$ Kg

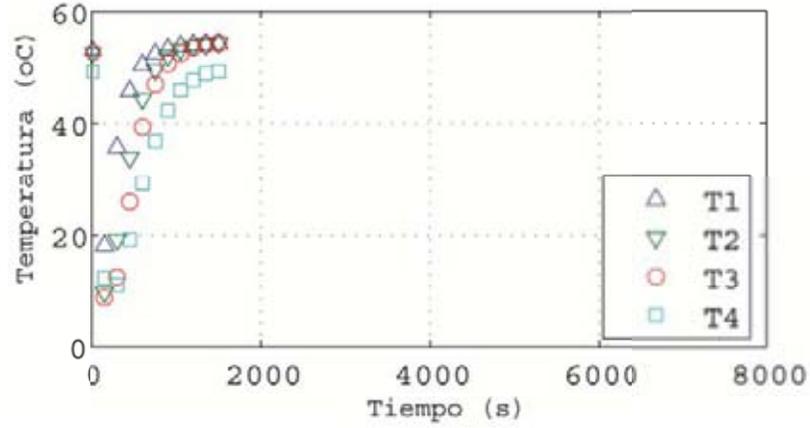


Figura 5.49: Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v = 1.40$ m/s, temperatura $T = 60^\circ\text{C}$ y una masa $m = 0.40$ Kg

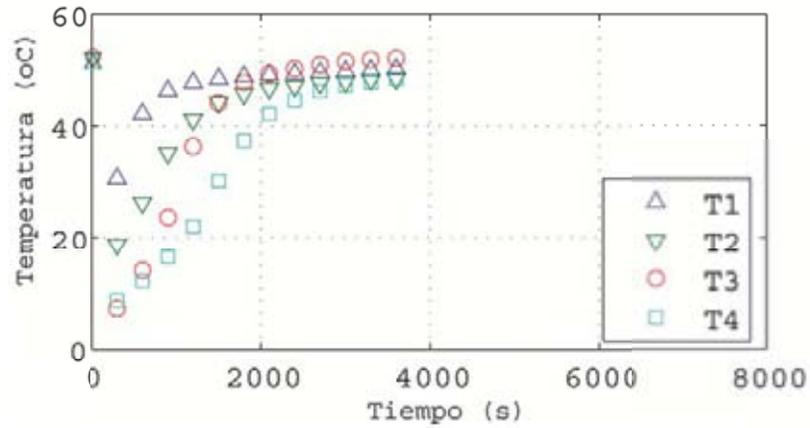


Figura 5.50: Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v = 1.40$ m/s, temperatura $T = 60^\circ\text{C}$ y una masa $m = 0.80$ Kg

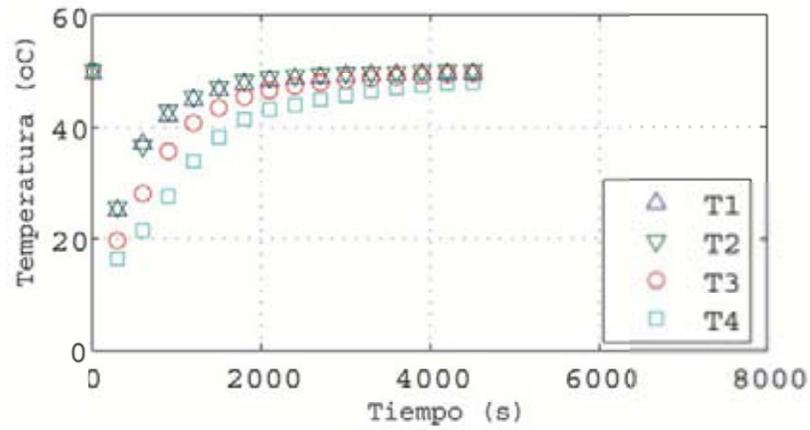


Figura 5.51: Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v = 1.40$ m/s, temperatura $T = 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m = 0.40$ Kg

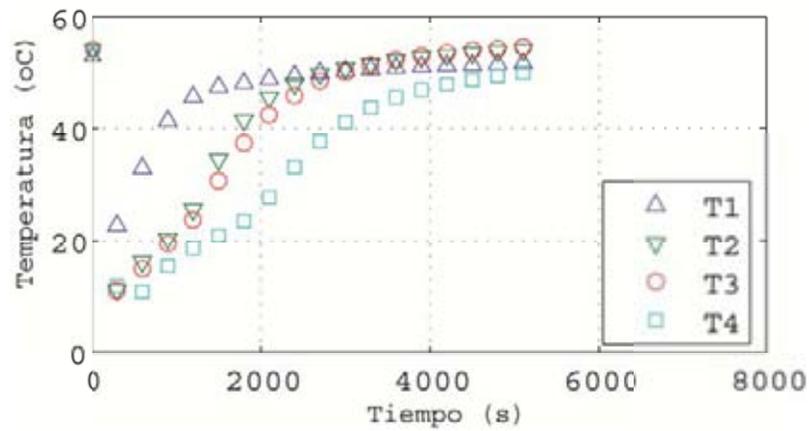


Figura 5.52: Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v = 1.40$ m/s, temperatura $T = 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m = 0.80$ Kg

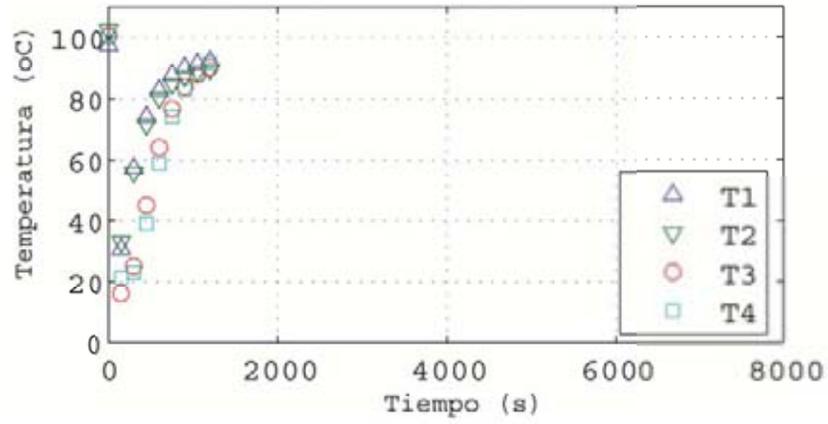


Figura 5.53: Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40$ Kg

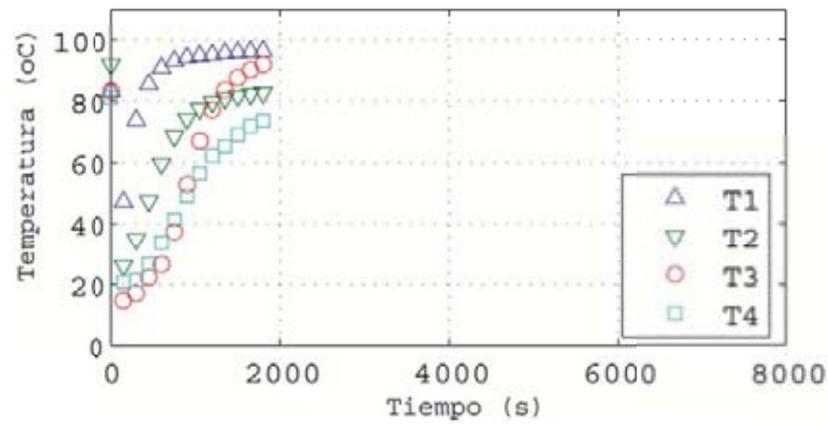


Figura 5.54: Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80$ Kg

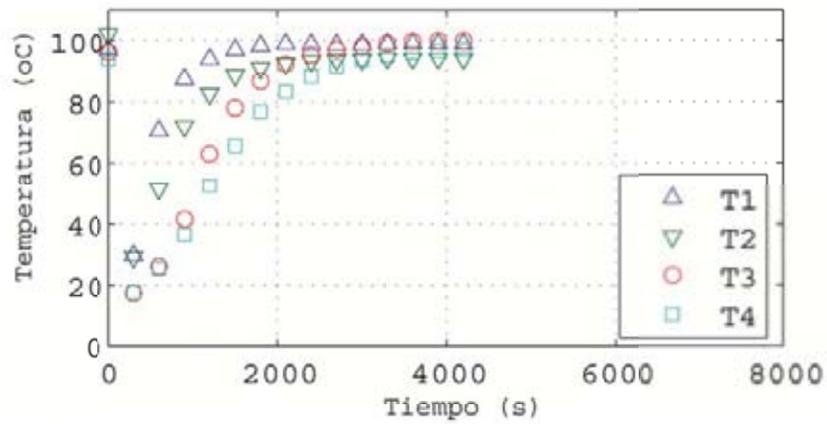


Figura 5.55: Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40$ Kg

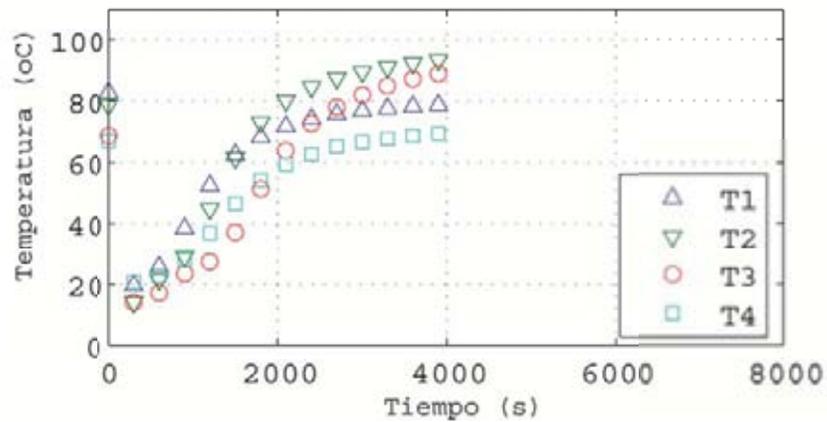


Figura 5.56: Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80$ Kg

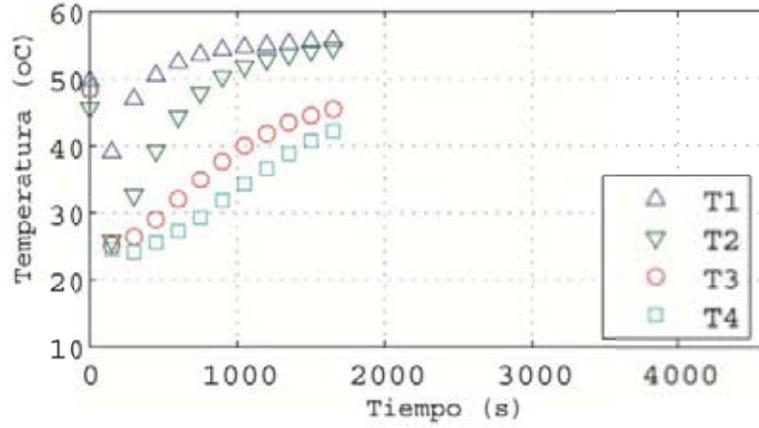


Figura 5.57: Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v = 0.80 \text{ m/s}$, temperatura $T = 60^\circ\text{C}$ y una masa $m = 0.40 \text{ Kg}$

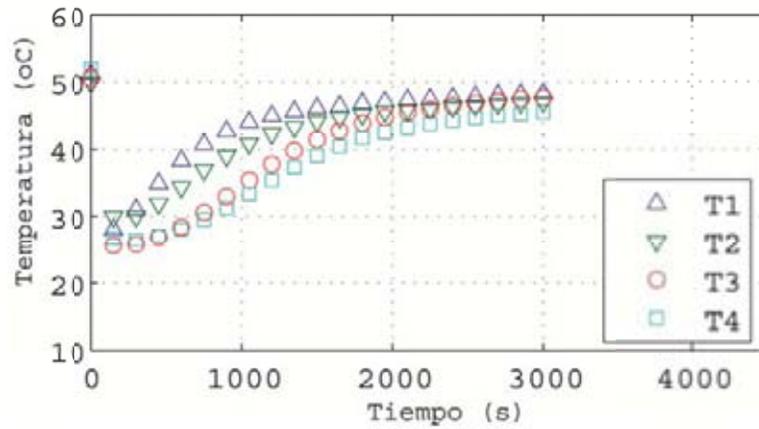


Figura 5.58: Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v = 0.80 \text{ m/s}$, temperatura $T = 60^\circ\text{C}$ y una masa $m = 0.80 \text{ Kg}$

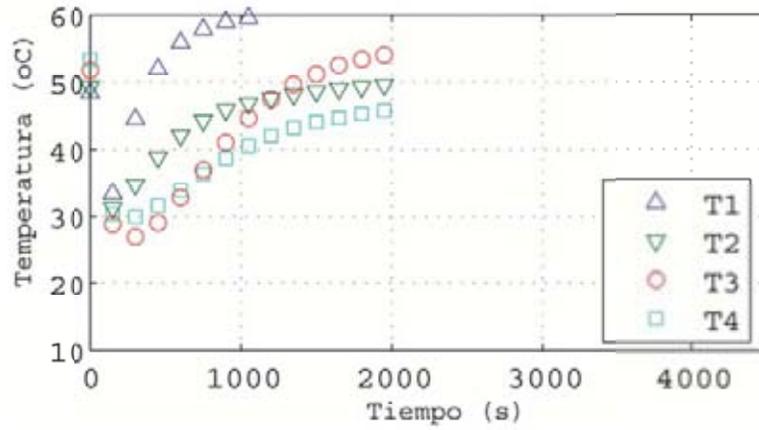


Figura 5.59: Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v = 0.80 \text{ m/s}$, temperatura $T = 60^\circ\text{C}$ y una masa $m = 0.40 \text{ Kg}$

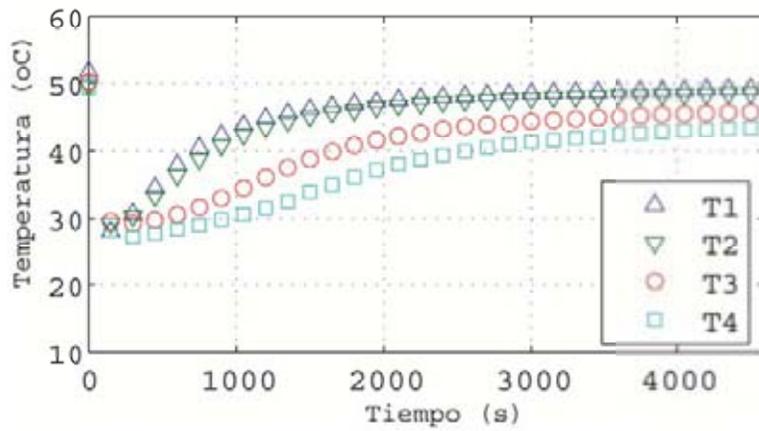


Figura 5.60: Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v = 0.80 \text{ m/s}$, temperatura $T = 60^\circ\text{C}$ y una masa $m = 0.80 \text{ Kg}$

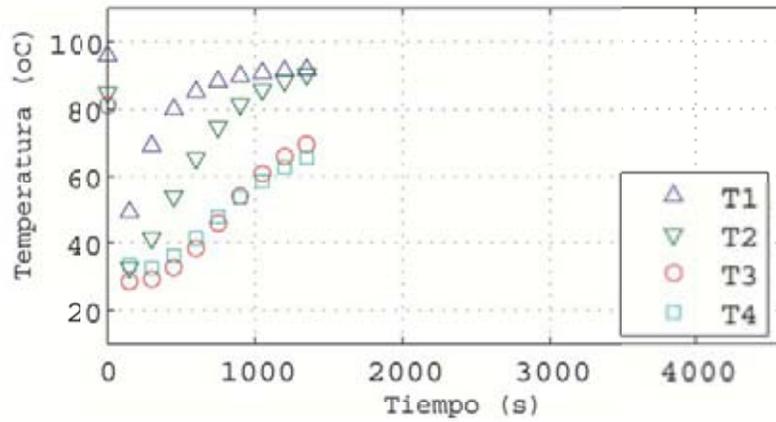


Figura 5.61: Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40$ Kg

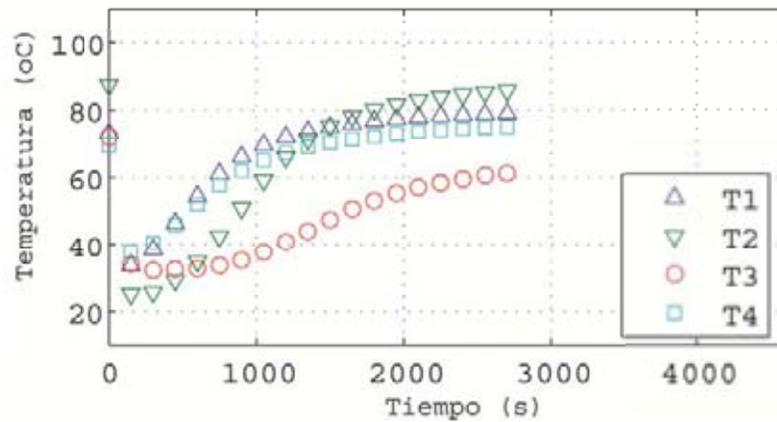


Figura 5.62: Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80$ Kg

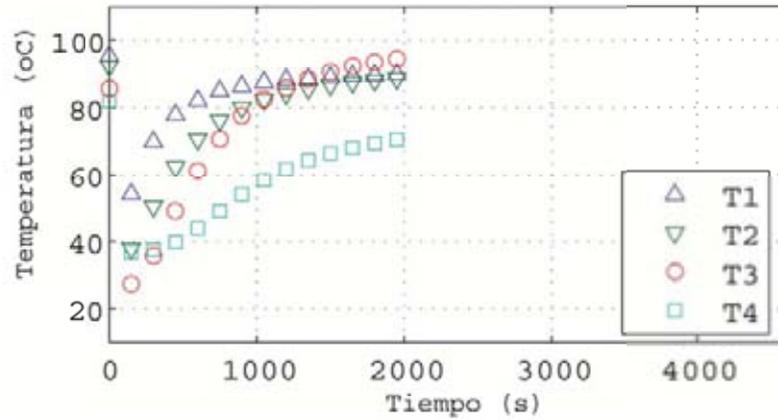


Figura 5.63: Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40$ Kg

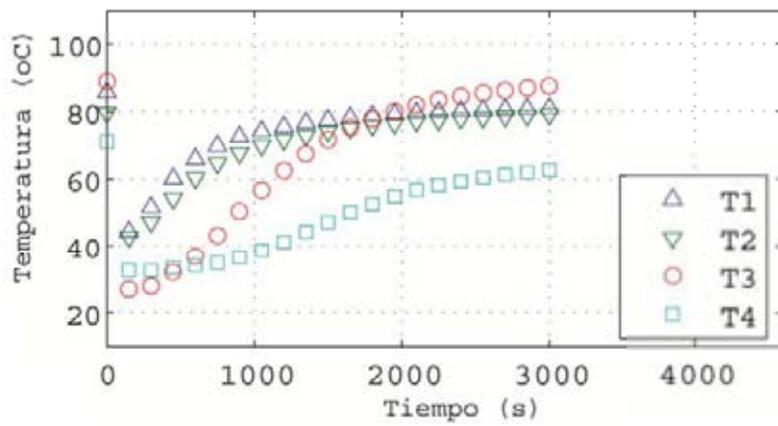


Figura 5.64: Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80$ Kg

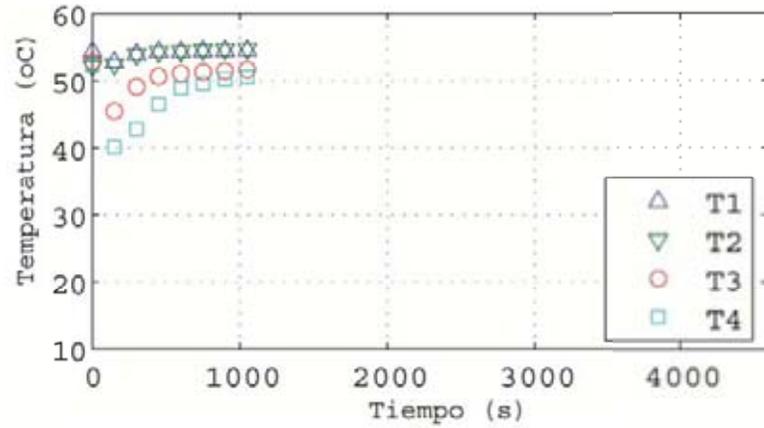


Figura 5.65: Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40$ Kg

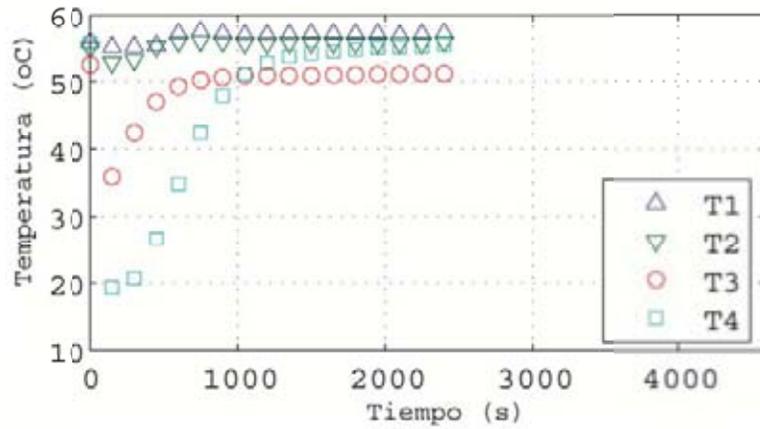


Figura 5.66: Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80$ Kg

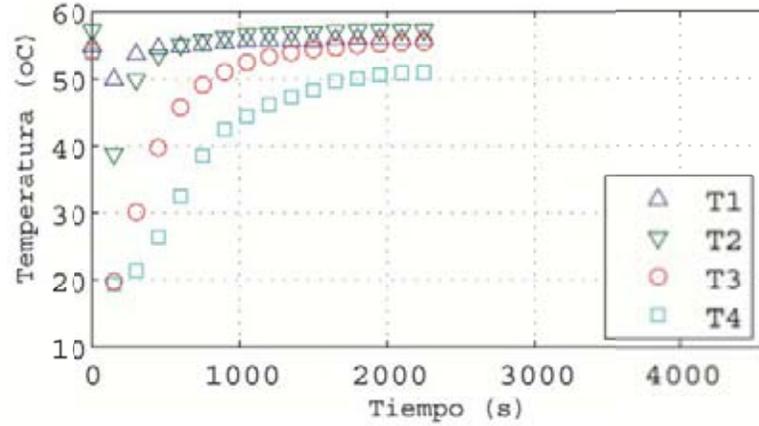


Figura 5.67: Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40$ Kg

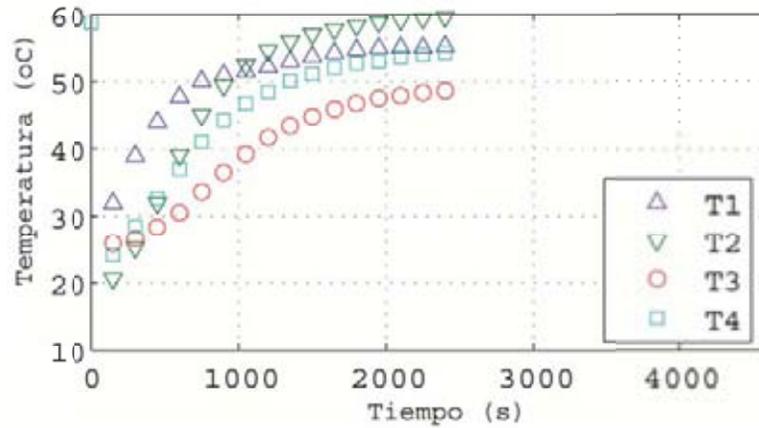


Figura 5.68: Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80$ Kg

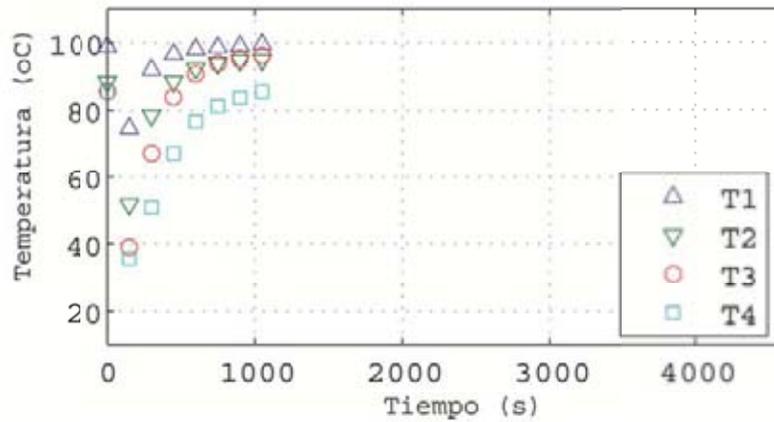


Figura 5.69: Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim húmedas con hexano a velocidad $v = 1.40 \text{ m/s}$, temperatura $T = 110^\circ\text{C}$ y una masa $m = 0.40 \text{ Kg}$

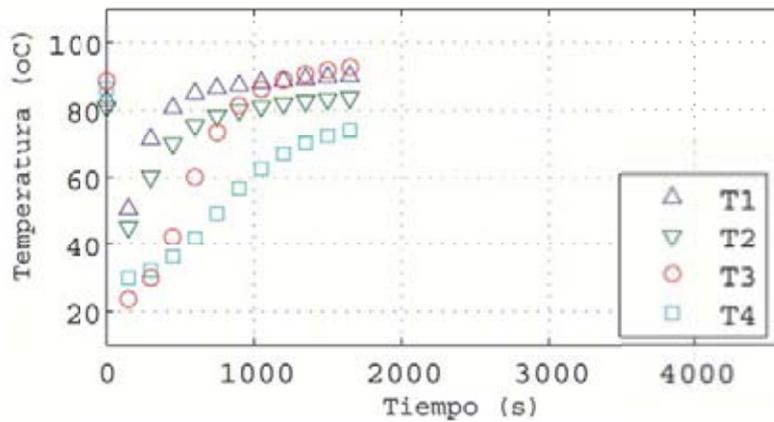


Figura 5.70: Perfil de temperatura del proceso de secado de semillas de nim húmedas con hexano a velocidad $v = 1.40 \text{ m/s}$, temperatura $T = 110^\circ\text{C}$ y una masa $m = 0.80 \text{ Kg}$

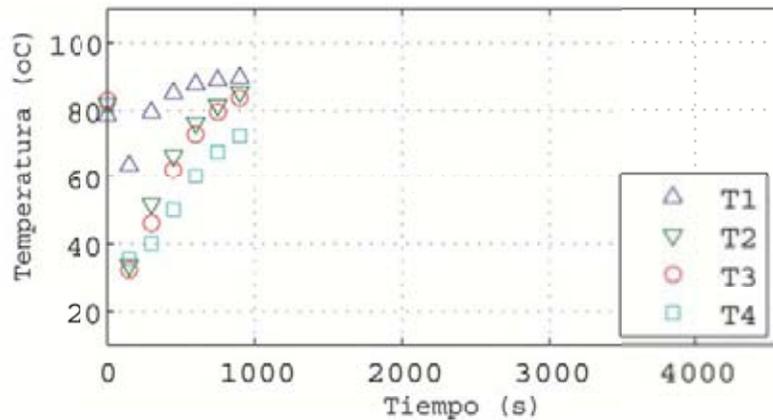


Figura 5.71: Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.40$ Kg

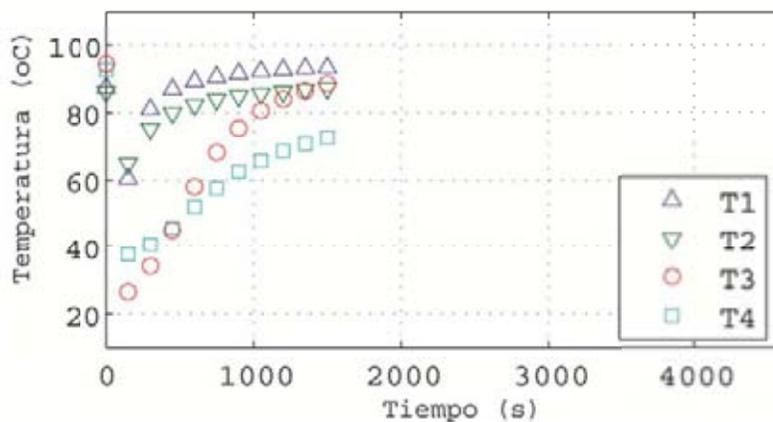


Figura 5.72: Perfil de temperatura del proceso de secado de hojuelas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y una masa $m= 0.80$ Kg

5.4. Curvas de secado teóricas a partir del modelo exponencial

Las curvas de secado teóricas fueron construidas utilizando el modelo exponencial descrito en la ecuación 3.32, la cual es conocida como ecuación de capa fina.

Se utilizó para este fin un programa creado en MATLAB, en el cual se asignaban valores aleatorios a la constante de secado, K , hasta conseguir el mejor ajuste. En las Figuras 5.73 a 5.96 se muestra la comparación de las curvas experimentales con las curvas teóricas generadas al utilizar este modelo.

Las curvas teóricas muestran cualitativamente una tendencia concordante a las curvas experimentales, notándose mejores ajustes a medida que disminuye la volatilidad de los solventes, es decir, se consiguieron tendencias más similares al realizar el ajuste para los experimentos en los cuales se utilizó agua según se muestra en las Figuras 5.73 a 5.80. Seguidos por aquellos en los cuales se utilizó etanol, mostrados en las Figuras 5.81 a 5.88, y finalmente por aquellos en los cuales se utilizó hexano, los cuales son presentados en las Figuras 5.89 a 5.96.

La deficiencia en el ajuste de algunas de las curvas correspondientes al hexano y la tendencia anómala de algunos de los experimentos podría explicarse sobre base a la alta volatilidad de este solvente. El secado de un lecho empacado involucra el acomodamiento aleatorio de las partículas, si a esto se suma el utilizar una sustancia con una alta volatilidad se podría originar una evaporación no uniforme, registrándose altibajos en los valores de humedad que originan curvas con tendencias que se alejan un poco del comportamiento normal de las curvas de secado y en consecuencia ajustes poco precisos.

La solución de Crank a la ecuación de difusión no contempla la variación del coeficiente de transferencia de masa con respecto a la variación en el contenido de humedad, por lo que sería recomendable realizar los ajustes tomando en consideración estas variables, utilizando algún método numérico o una solución analítica por intervalos o condiciones de contorno móviles, esto permitiría obtener ajustes más precisos, sobre todo al utilizar solventes con altas volatilidades. Además que, el patrón heterogéneo de los experimentos presenta dificultades en su simulación con los modelos conocidos.

De acuerdo a Cavalcanti y Menegalli (1997), al inicio del proceso de secado es predominante la difusión del líquido relacionada a la difusión del vapor, debido a la alta concentración de humedad y pequeños gradientes de temperatura. Por tanto, debería esperarse que las ecuaciones basadas en la teoría de la difusión líquida describan mejor el proceso de secado en su período inicial y mostrar una mayor discrepancia en el período final. De hecho, esto se evidenció de forma más marcada en los ajustes teóricos de los experimentos en los cuales se utilizó agua y etanol.

Se debe destacar que en las curvas correspondientes al agua, se observa un pronóstico teórico del tiempo total de secado, observándose en la mayoría de los casos que al usar un secador de este tipo los tiempos de secado se extienden considerablemente si se utilizan solventes que presentan bajas volatilidades.

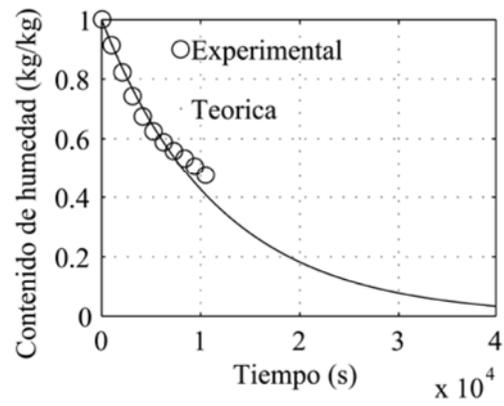


Figura 5.73: Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de hojuelas de nim humedecidas con agua a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.40$ Kg

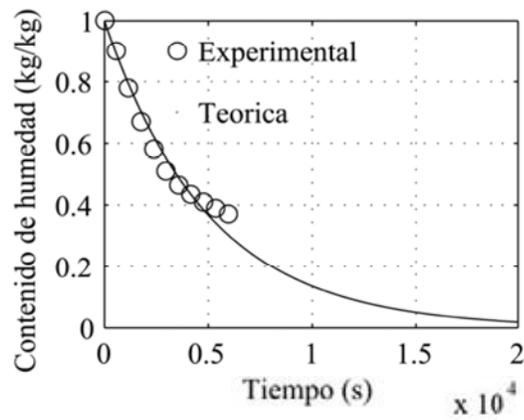


Figura 5.74: Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de semillas de nim humedecidas con agua a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.40$ Kg

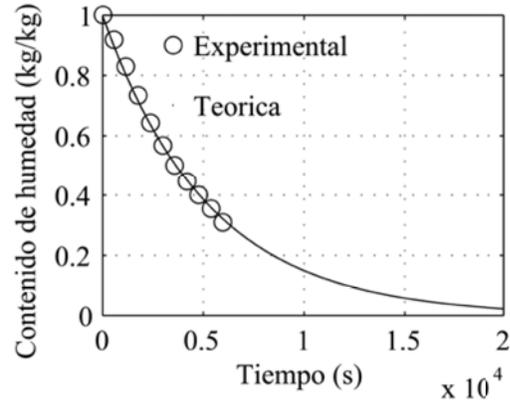


Figura 5.75: Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de semillas de nim humedecidas con agua a velocidad $v = 0.80 \text{ m/s}$, temperatura $T = 110^\circ\text{C}$ y masa $m = 0.80 \text{ Kg}$

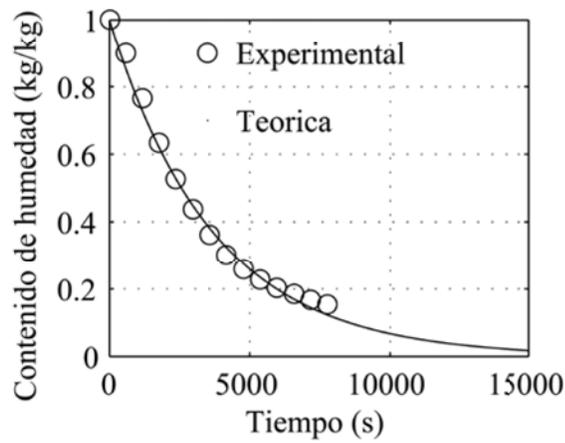


Figura 5.76: Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de hojuelas de nim humedecidas con agua a velocidad $v = 0.80 \text{ m/s}$, temperatura $T = 110^\circ\text{C}$ y masa $m = 0.40 \text{ Kg}$

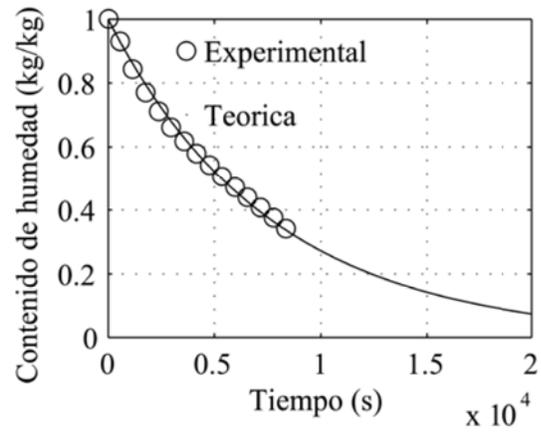


Figura 5.77: Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de hojuelas de nim humedecidas con agua a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.40$ Kg

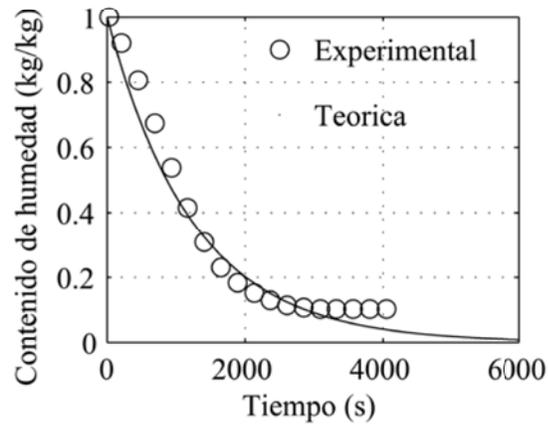


Figura 5.78: Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de semillas de nim humedecidas con agua a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.40$ Kg

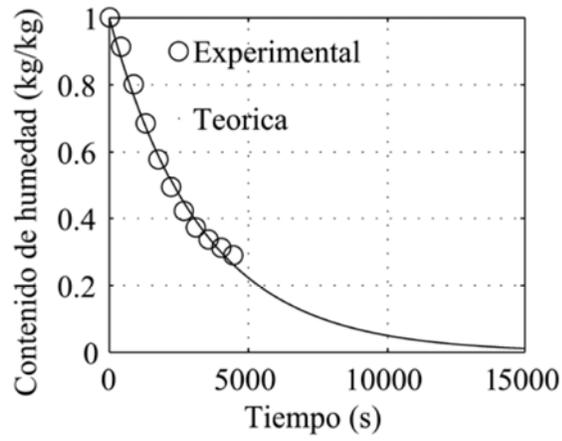


Figura 5.79: Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de semillas de nim humedecidas con agua a velocidad $v = 1.40 \text{ m/s}$, temperatura $T = 110^\circ\text{C}$ y masa $m = 0.80 \text{ Kg}$

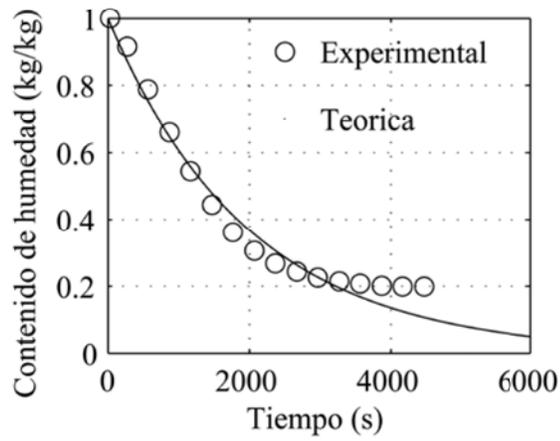


Figura 5.80: Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de hojuelas de nim humedecidas con agua a velocidad $v = 1.40 \text{ m/s}$, temperatura $T = 110^\circ\text{C}$ y masa $m = 0.40 \text{ Kg}$

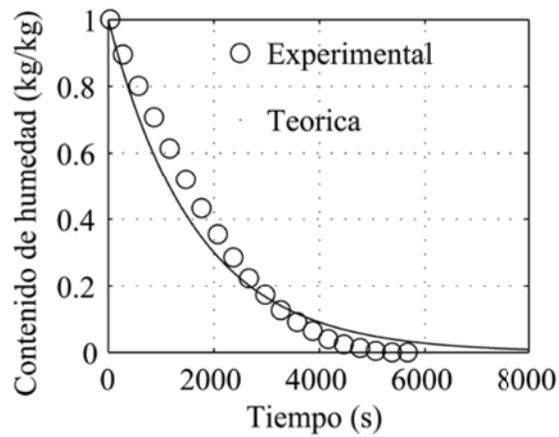


Figura 5.81: Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de hojuelas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v=0.80$ m/s, temperatura $T=60^{\circ}\text{C}$ y masa $m=0.40$ Kg

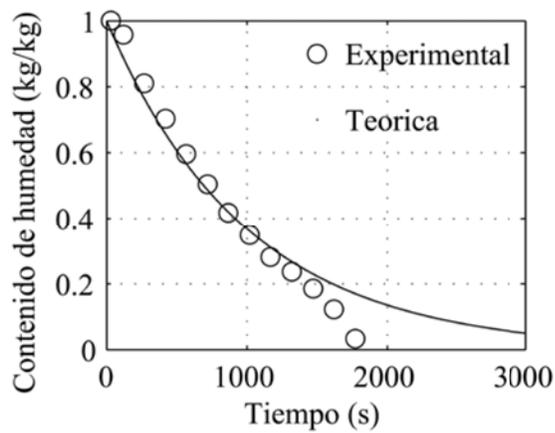


Figura 5.82: Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de semillas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v=0.80$ m/s, temperatura $T=110^{\circ}\text{C}$ y masa $m=0.40$ Kg

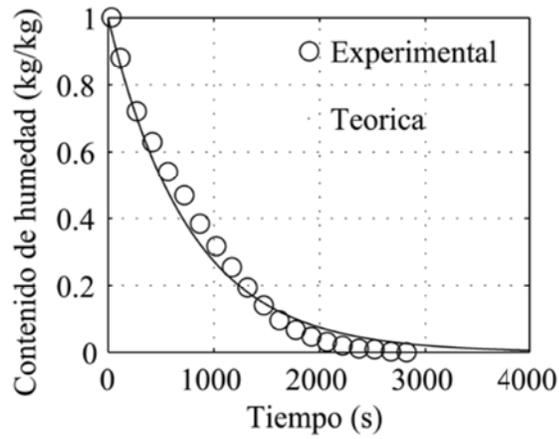


Figura 5.83: Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de semillas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.80$ Kg

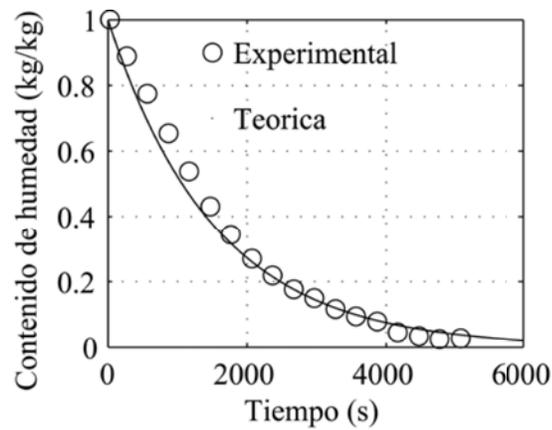


Figura 5.84: Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de hojuelas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.40$ Kg

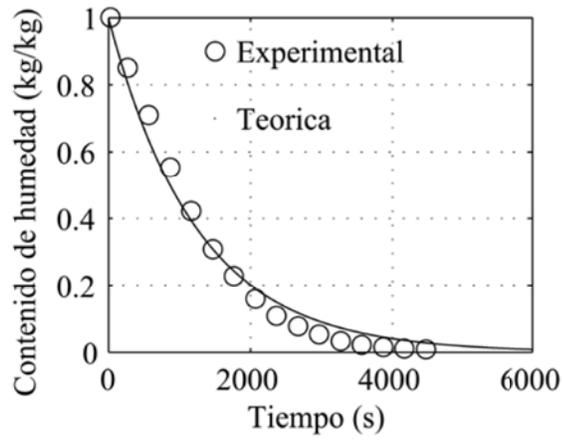


Figura 5.85: Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de hojuelas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.40$ Kg

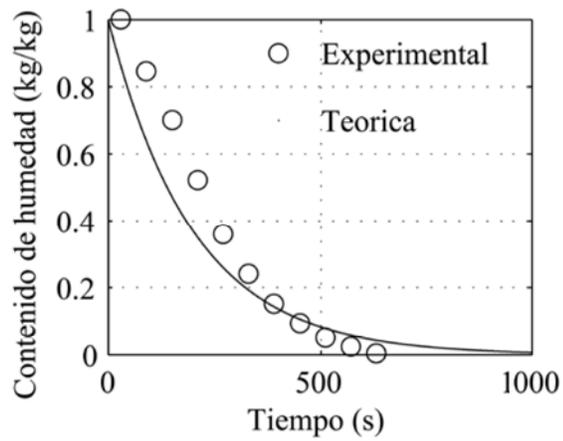


Figura 5.86: Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de semillas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.40$ Kg

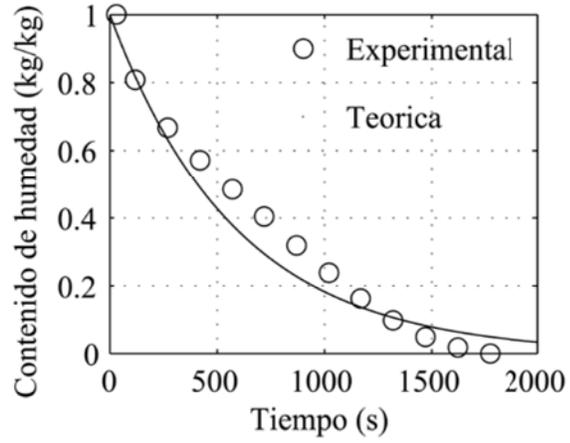


Figura 5.87: Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de semillas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.80$ Kg

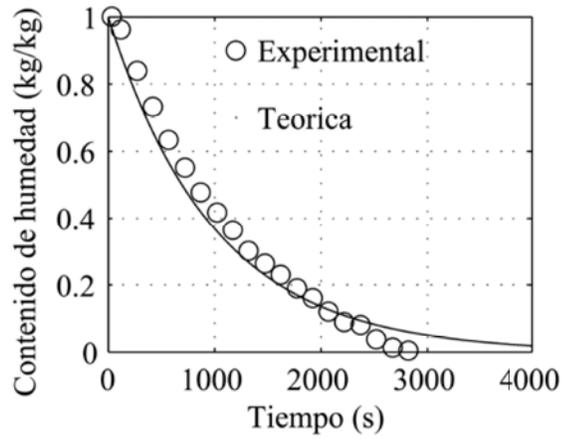


Figura 5.88: Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de hojuelas de nim humedecidas con etanol a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.40$ Kg

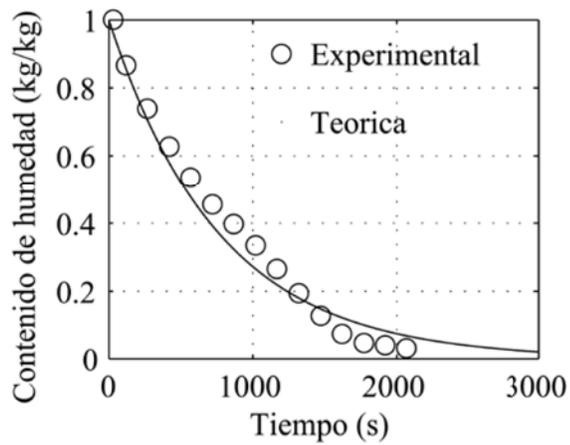


Figura 5.89: Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de hojuelas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.40$ Kg

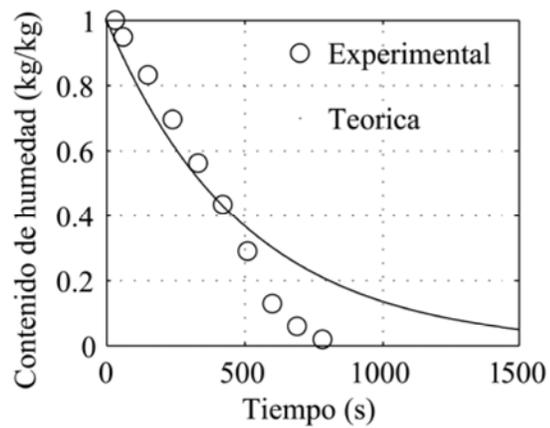


Figura 5.90: Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de semillas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 0.80$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.40$ Kg

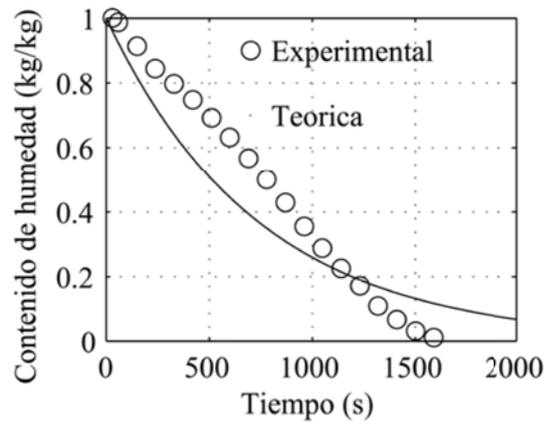


Figura 5.91: Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de semillas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v=0.80$ m/s, temperatura $T=110^{\circ}\text{C}$ y masa $m=0.80$ Kg

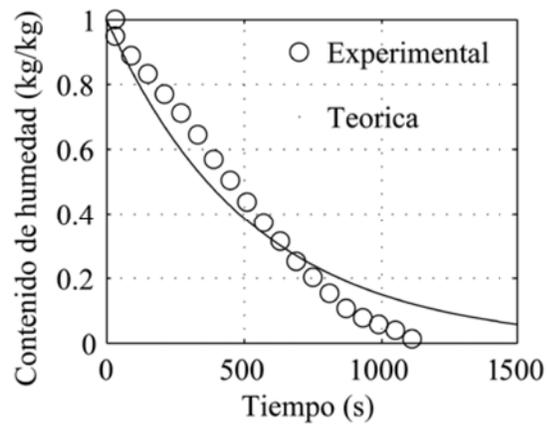


Figura 5.92: Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de hojuelas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v=0.80$ m/s, temperatura $T=110^{\circ}\text{C}$ y masa $m=0.40$ Kg

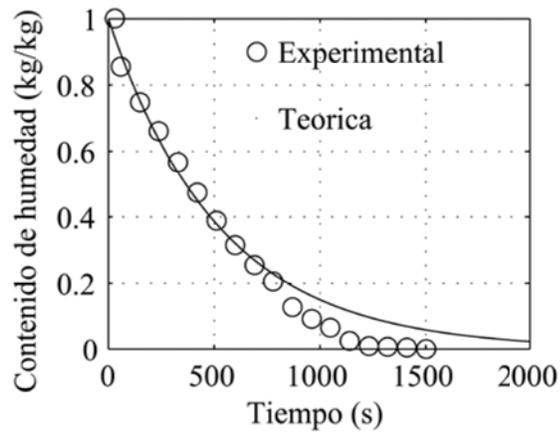


Figura 5.93: Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de hojuelas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 60^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.40$ Kg

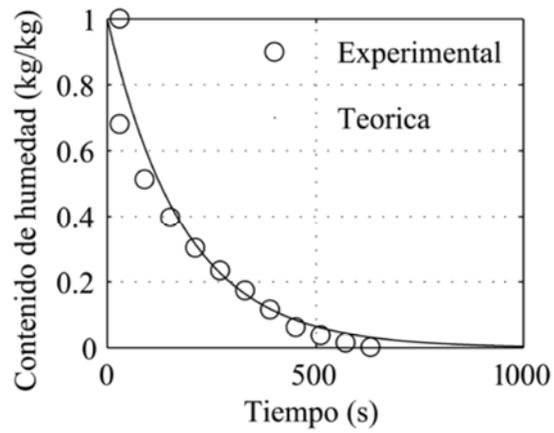


Figura 5.94: Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de semillas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.40$ Kg

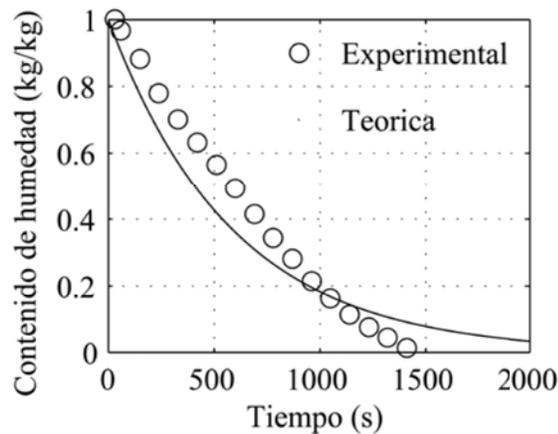


Figura 5.95: Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de semillas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.80$ Kg

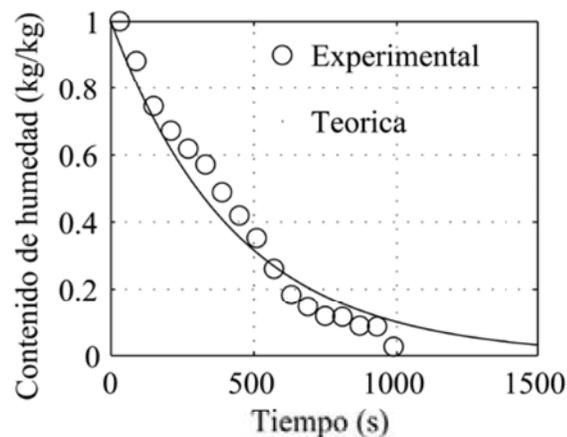


Figura 5.96: Comparación de las curvas de secado experimental y teórica de hojuelas de nim humedecidas con hexano a velocidad $v= 1.40$ m/s, temperatura $T= 110^{\circ}\text{C}$ y masa $m= 0.40$ Kg

Los valores de las constantes de secado, K , fueron utilizados para determinar el valor de la difusividad efectiva para cada experimento mediante la ecuación 3.33. La Tabla 5.1 muestra los valores obtenidos para la difusividad efectiva.

La difusividad efectiva se incrementa al incrementarse la temperatura del aire, esto se debe a que una mayor diferencia de temperatura promueve una mayor diferencia de concentración, debido a que el componente volátil se difunde rápidamente en el aire.

De la misma manera, la difusividad efectiva incrementa al incrementarse la velocidad del aire. La velocidad del aire de secado está relacionada al coeficiente convectivo de transferencia de calor que promueve una temperatura de la muestra

más alta. Las temperaturas más altas incrementan la difusividad efectiva de la transferencia de masa.

El tamaño de las partículas tiene una influencia menor en el coeficiente de difusión durante un proceso de secado convectivo. Los valores de difusividad efectiva se incrementaron ligeramente con el aumento en el tamaño de partícula, siendo mayor al utilizarse semillas. Esto puede explicarse también de acuerdo a la porosidad del lecho, ya que el solvente puede difundirse mejor si el lecho no presenta resistencia al flujo del aire.

La masa de material no tiene incidencia sobre la magnitud de la difusividad, sin embargo, se logran observar ciertas diferencias en estos valores para experimentos diferentes, lo cual muy probablemente pudo deberse a variaciones en las condiciones experimentales.

Tabla 5.1. Difusividad efectiva

Solvente	Exp.	Variables				K (1/s)	V (m ³)	D (m)	H (m)	D _{ef} (m ² /s)
		Vel. (m/s)	Temp. (°C)	Tam. Part. (mm)	Masa (Kg)					
Agua	3	0.80	60	1.00	0.40	8.50E-05	1.00E-04	1.00E-01	1.02E-01	8.958E-08
	5	0.80	110	3.00	0.40	2.00E-04	8.01E-04	1.00E-01	1.02E-01	2.108E-07
	6	0.80	110	3.00	0.80	1.90E-04	1.42E-03	1.00E-01	1.81E-01	6.293E-07
	7	0.80	110	1.00	0.40	2.70E-04	8.01E-04	1.00E-01	1.02E-01	2.845E-07
	11	1.40	60	1.00	0.40	1.30E-04	8.01E-04	1.00E-01	1.02E-01	1.370E-07
	13	1.40	110	3.00	0.40	8.00E-04	8.01E-04	1.00E-01	1.02E-01	8.431E-07
	14	1.40	110	3.00	0.80	3.00E-04	1.42E-03	1.00E-01	1.81E-01	9.936E-07
Etanol	15	1.40	110	1.00	0.40	5.00E-04	8.01E-04	1.00E-01	1.02E-01	5.269E-07
	3	0.80	60	1.00	0.40	6.00E-04	8.01E-04	1.00E-01	1.02E-01	6.323E-07
	5	0.80	110	3.00	0.40	1.00E-03	8.01E-04	1.00E-01	1.02E-01	1.054E-06
	6	0.80	110	3.00	0.80	1.30E-03	1.42E-03	1.00E-01	1.81E-01	4.306E-06
	7	0.80	110	1.00	0.40	6.50E-04	8.01E-04	1.00E-01	1.02E-01	6.850E-07
	11	1.40	60	1.00	0.40	8.00E-04	8.01E-04	1.00E-01	1.02E-01	8.431E-07
	13	1.40	110	3.00	0.40	5.00E-03	8.01E-04	1.00E-01	1.02E-01	5.269E-06
Hexano	14	1.40	110	3.00	0.80	1.70E-03	1.42E-03	1.00E-01	1.81E-01	5.630E-06
	15	1.40	110	1.00	0.40	1.00E-03	8.01E-04	1.00E-01	1.02E-01	1.054E-06
	3	0.80	60	1.00	0.40	1.30E-03	8.01E-04	1.00E-01	1.02E-01	1.370E-06
	5	0.80	110	3.00	0.40	2.00E-03	8.01E-04	1.00E-01	1.02E-01	2.108E-06
	6	0.80	110	3.00	0.80	1.35E-03	1.42E-03	1.00E-01	1.81E-01	4.471E-06
	7	0.80	110	1.00	0.40	1.90E-03	8.01E-04	1.00E-01	1.02E-01	2.002E-06
	11	1.40	60	1.00	0.40	2.30E-03	8.01E-04	1.00E-01	1.02E-01	2.424E-06
13	1.40	110	3.00	0.40	5.50E-03	8.01E-04	1.00E-01	1.02E-01	5.796E-06	
14	1.40	110	3.00	0.80	1.70E-03	1.42E-03	1.00E-01	1.81E-01	5.630E-06	
15	1.40	110	1.00	0.40	2.50E-03	8.01E-04	1.00E-01	1.02E-01	2.635E-06	

Para visualizar el efecto de la velocidad y temperatura del aire sobre la difusividad efectiva, se presentan las siguientes gráficas:

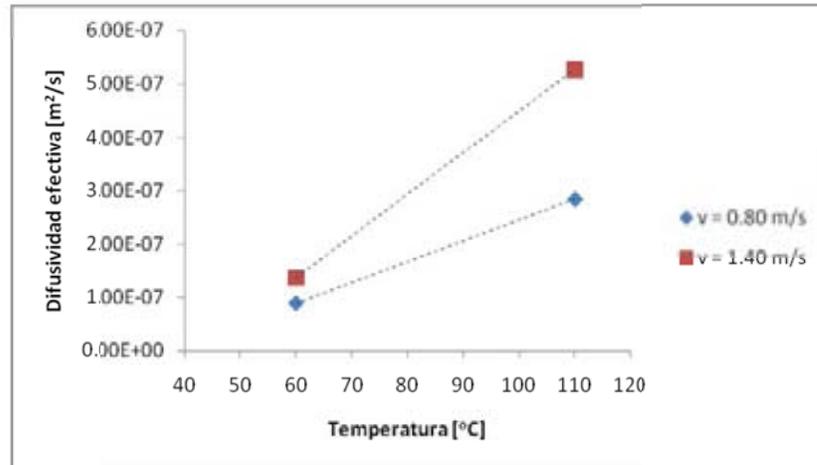


Figura 5.97: Efecto de la velocidad y la temperatura del aire sobre la difusividad efectiva de un lecho de 0.40 Kg de hojas de nim humedecidas con agua

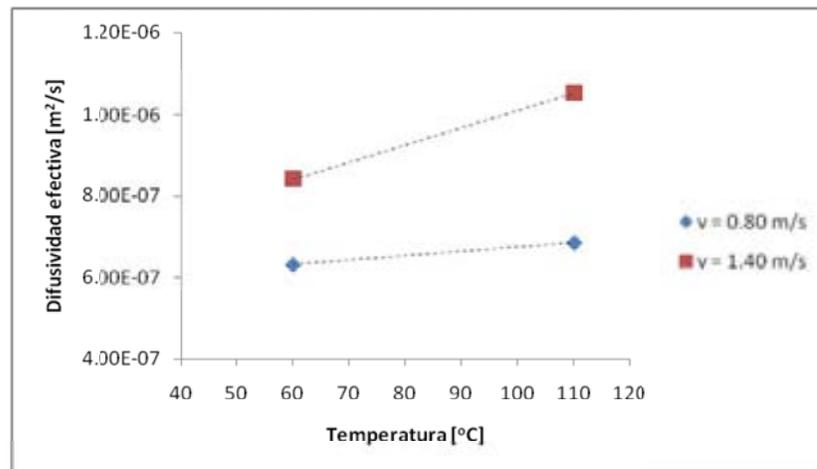


Figura 5.98: Efecto de la velocidad y la temperatura del aire sobre la difusividad efectiva de un lecho de 0.40 Kg de hojas de nim humedecidas con etanol

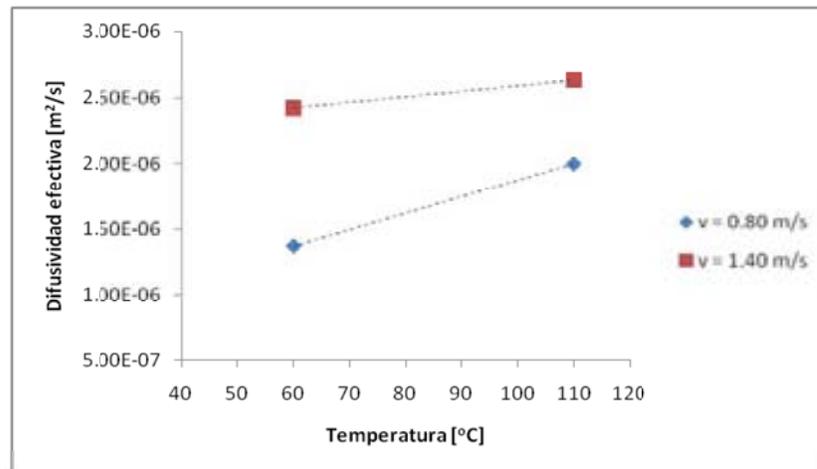


Figura 5.99: Efecto de la velocidad y la temperatura del aire sobre la difusividad efectiva de un lecho de 0.40 Kg de hojuelas de nim humedecidas con hexano

En las gráficas se puede observar la tendencia que fue analizada previamente, es decir, un incremento en la velocidad y la temperatura del aire favorece un incremento de la difusividad, por lo que la velocidad de secado también es favorecida.

En el caso de los experimentos realizados con agua se observa una diferencia marcada en los valores de difusividad que corresponden a la temperatura más alta, mostrándose una pendiente más inclinada en la Figura 5.97. Este hecho también es visualizado en los experimentos realizados con etanol, aunque en menor proporción, siendo prácticamente iguales las diferencias entre los coeficientes de difusividad para ambas velocidades y ambas temperaturas, siendo las pendientes prácticamente paralelas según se observa en la Figura 5.98.

En cambio, al utilizar hexano, se observa una diferencia más marcada en las difusividades a la temperatura más baja. Esto muy probablemente esté relacionado a la tendencia anómala que presentaron los resultados de los experimentos realizados con este solvente.

VI. Conclusiones

Se ha realizado un estudio experimental y teórico de la cinética del secado de semillas y hojuelas de nim, humedecidas separadamente con agua, etanol y hexano, en un secador de lecho empacado. Gracias a este estudio se logró comprender aspectos importantes relacionados al secado de nim al empacar un lote de material en una columna de vidrio y hacer pasar a través de éste un flujo de aire caliente de forma transversal.

Las curvas de secado muestran un comportamiento estable con el tiempo, por lo que las curvas de velocidad de secado generadas revelan comportamientos típicos del proceso de secado de un sólido poroso, es decir, un período de velocidad constante seguido de un período de velocidad decreciente.

La velocidad del aire influye de manera directamente proporcional sobre la velocidad de secado, lo cual se debe a que una velocidad del aire más alta promueve que la temperatura de la muestra se incremente de forma más rápida, favoreciendo la transferencia de masa y por tanto el proceso de secado.

Del mismo modo, la temperatura del aire influye de forma directamente proporcional sobre la velocidad de secado, lo cual es razonable debido a que un mayor gradiente de temperatura implica también un mayor gradiente de concentración y por tanto la agilización del proceso de secado por convección.

Contrariamente a lo esperado, la velocidad de secado es influenciada de forma directamente proporcional por el tamaño de partícula. La explicación de este fenómeno podría estar relacionada a la porosidad del lecho. Dado que la porosidad de un lecho de semillas es superior a la de un lecho de hojuelas, la resistencia al flujo del aire sería menor y por tanto la transferencia de masa se incrementaría, agilizándose de esta forma el proceso de secado.

La masa de material influye de forma inversamente proporcional sobre la velocidad de secado. La difusión de la humedad en el interior del sólido constituye una de las etapas controlantes del proceso de secado, por lo que cuando se utiliza una masa de material más grande la resistencia a la transferencia de masa se incrementa y esto provoca la disminución en la velocidad de secado.

Cuando un material se humedece con un solvente poco volátil, se requerirá un tiempo de secado excesivamente alto para lograr secarlo por completo en un equipo de este tipo, según fue observado al llevar a cabo los experimentos en los cuales se utilizó agua como solvente.

En todos los perfiles de temperatura generados durante el proceso de secado se observa una etapa de enfriamiento, correspondiente al período de secado de velocidad constante, en el cual se da la prevalencia de humedad superficial, la cual para ser evaporada requiere la transferencia de energía del sólido hacia el solvente, provocándose la disminución de la temperatura. Luego se observó una etapa en la

cual ocurre el incremento de la temperatura del sólido, debido a que la evaporación cesa, que se corresponde con el período de secado de velocidad decreciente, en el cual ocurre la remoción de la humedad interna del sólido.

Las curvas teóricas obtenidas con el modelo exponencial muestran muy buen ajuste con respecto a las curvas experimentales, sin embargo, se puede observar que los resultados son más concordantes cuando se utilizan solventes que presentan una volatilidad más baja.

Los valores de los coeficientes de difusividad efectiva fueron calculados relacionando el modelo exponencial con la solución simplificada de Crank a la ecuación de difusión. El coeficiente de difusión efectiva es directamente proporcional a la velocidad del aire y a la temperatura del aire, lo cual es razonable debido a que el mecanismo de difusión por convección depende de las diferencias de temperaturas, y por tanto de las diferencias de concentración, así como de la fuerza cinemática del flujo del aire.

El coeficiente de difusión efectiva es también directamente proporcional al tamaño de partícula. Esto tiene relación con la porosidad del lecho y el consecuente incremento en la resistencia a la transferencia de masa que se provoca al disminuir este parámetro.

La masa de material no presenta influencia sobre la magnitud de la difusividad y las mínimas diferencias observadas entre los experimentos pudieron deberse a variaciones en las condiciones experimentales.

VII. Recomendaciones

El análisis de los resultados obtenidos en este estudio ha permitido el desglose de las siguientes recomendaciones, válidas para ser aplicadas al proceso productivo de aceite e insecticida de nim, o bien, para otras etapas de investigación relacionadas a este tópico.

Para aumentar la eficiencia del proceso de secado en un lecho empacado, sobre todo si se pretende remover sustancias que presenten una baja volatilidad, se recomienda implementar un proceso de secado convectivo en el cual se utilice un flujo de aire multidireccional, es decir, que el equipo debería ser adecuado de tal forma que el aire se pudiera incorporar a diferentes profundidades a lo largo de la columna, favoreciéndose entonces que la transferencia de calor y masa en el lecho ocurra de forma más rápida.

El secado de un lecho empacado de nim es influenciado notablemente por la velocidad del aire, es por esto que se recomienda aumentar los valores de este parámetro, de tal forma que se limite la temperatura a un valor menor o igual a 60°C para evitar dañar el principio activo del grano.

Gracias al buen ajuste obtenido al utilizar el modelo exponencial, se recomienda continuar implementando otros modelos matemáticos, verificar el grado de ajuste y lograr a futuro contar con diversas formas de simular el proceso de secado en un lecho empacado, que permita reducir la cantidad de trabajo experimental que involucra altos costos y una gran inversión de tiempo.

Se recomienda realizar un estudio de secado multicomponente, en el cual se remuevan de forma simultánea los solventes que serían utilizados para lixiviar el aceite y el insecticida a la misma vez en la columna de vidrio.

Debido a la existencia limitada de estudios en los cuales se haya utilizado vapor sobrecalentado en un proceso de secado en lecho empacado, se recomienda utilizarlo como agente de secado en estudios posteriores, lo cual a su vez permitirá verificar las ventajas y desventajas de este proceso.

VIII. Nomenclatura

Letras Latinas

A	Área	[m ²]
a, b, c y d	Coefficientes empíricos	[-]
B	Complemento temperatura reducida	[-]
C _p	Calor específico	[J/Kg. K]
C	Capacidad calorífica	[J/K]
C	Concentración	[Kg./m ³], [Kmol/m ³]
d	Diámetro de la tubería	[m]
d _p	Tamaño de partícula	[mm]
D	Difusividad	[m ² /s]
D _D	Coefficiente de dispersión	[m ² /s]
f	Velocidad relativa	[-]
h	Coefficiente convectivo de transferencia de calor	[W/m ² K]
H _r	Humedad relativa	[%]
H	Profundidad del lecho	[m]
H	Longitud de la placa plana	[m]
j _H	Factor de transferencia de calor	[-]
j _M	Factor de transferencia de masa	[-]
k	Conductividad térmica	[W/mK]
K	Constante de secado empírica	[s ⁻¹]
K _y	Coefficiente convectivo de transferencia de masa	[m/s]
L	Longitud de la hojuela	[m]
m	Masa	[Kg]
m _a	Flujo másico de aire seco	[Kg/s]
M	Masa molecular	[Kg/Kmol]
N	Intensidad del secado	[s ⁻¹]

N_v	Velocidad de secado superficial o volumétrica	[Kg/m ² s] [Kg/m ³ s]
N_w	Flujo molar	[Kmol/m ² s]
P	Presión total del sistema	[N/m ²]
P_v	Presión de vapor del componente volátil en el sólido	[N/m ²]
P_{vo}	Presión de saturación del vapor	[N/m ²]
P_a	Presión parcial del aire	[N/m ²]
P_r	Numero de Prandtl	[-]
Q	Calor requerido para evaporar la humedad	[W]
Q_i	Calor generado por el sistema	[KJ/m ³ s]
q	Flujo de calor por unidad de superficie	[W/m ²]
R	Resistencia térmica	[KW]
Re	Numero de Reynolds	[-]
R_i	Solvente en forma de vapor añadido a la corriente gaseosa	[Kmol/m ³ s]
Sc	Numero de Schmidt	[-]
t	Tiempo	[s]
T	Temperatura	[K], [°C]
u_p	Volumen de líquido por volumen de partícula	[-]
v	Velocidad lineal	[m/s]
V	Volumen	[m ³]
w	Flujo másico por unidad de área	[Kg/sm ²]
x	Longitud del eje coordenado	[m]
X	Contenido de humedad del sólido sobre base seca	[Kg solvente/Kg aire]
y	Fracción molar	[-]
y_g	Humedad sobre base húmeda	[-]
Y	Humedad absoluta del aire sobre	[-]

	base húmeda	
Y_w	Humedad de saturación	[-]
z	Longitud del eje coordenado	[m]
Letras Griegas		
α	Difusividad térmica	[m ² /s]
ε	Porosidad	[-]
λ	Calor latente de evaporación	[J/Kg]
μ	Viscosidad del aire	[Pa.s]
ν	Viscosidad cinemática	[m ² /s]
ρ	Densidad	[Kg/m ³]
ψ	Factor de forma	[-]
Subíndices		
a	Aire	
ap	Aparente	
ave	Promedio	
c	Crítico	
ef	Efectiva	
eq	Equilibrio	
bh	Bulbo húmedo	
bs	Bulbo seco	
f	Final	
g	Gas	
max	Máxima	
in	Entrante	
H	Húmeda	
hH	Húmeda introducida al horno	
m	Muestra	
m	Reducida normal de ebullición	
m	Fase vapor	
o	Inicial	
out	Saliente	
p	Hojuelas	

R	Recipiente
r	Reducida
s	Sólido o superficie del sólido
s	Solvente
s	Seca
sup	Superficial
sol	Solvente
sH	Seca obtenida en el horno
sat	Saturación
T	Transversal de la tubería
v	Compuesto volátil
w	Agua añadida

IX. Referencias

Belhamri, A., Ali Mohamed, A., Bennamoun, L., Contribution to the study of the external conditions effects on the drying kinetics of porous media, *Drying 2006*, ed. A.S. Mujumdar, pp. 191-194 (2006)

Belhamri, A., Fohr, J.P., The wet surface reduction during the first drying period, *Drying 92*, ed. A.S. Mujumdar, pp. 353-363 (1992)

Bird, R.B., Stewart, W.E., Lightfoot, E.N., *Transport Phenomena*, John Wiley & Sons, Inc., United States, pp. 152-155 (2002)

Carrillo, M., Determinación de parámetros para el diseño de un sistema de secado de lecho deslizante para el secado de nim, Tesis de BSc., Universidad Nacional de Ingeniería, Managua, Nicaragua (1996)

Cassirer, T. and Rosengren, F., Drying of solvents from neem seeds and neem flakes in a process for the manufacture of a botanical insecticide, Universidad Nacional de Ingeniería, Managua, Nicaragua (2008)

Cavalcanti, M.E.R.M., Menegalli, F.C., Influence of the initial moisture contents and air velocity in the drying rate in thin layers of bean grains, *Proceedings of the Inter-American Drying Conference*, Brazil, pp. 569-577 (1997)

Coulson, J.M., Richardson, J.F., *Chemical Engineering*, Butterworth Heinemann, England, Vol.1, pp. 738-756 (1999)

Coulson, J.M., Richardson, J.F., *Chemical Engineering*, Butterworth Heinemann, England, Vol. 2, pp. 690-696 (1991)

Crank, J., *The mathematics of diffusion*, Oxford Science Publications, Great Britain, pp. 1-27 (1975)

Cubillo, A., Estudio preliminar para la recuperación de solventes en la producción del insecticida de nim, Tesis de BSc., Universidad Nacional de Ingeniería, Managua, Nicaragua (1998)

Cunningham, R.M., y Kelly, J.J. Liquid transport in drying macroporous materials, 1st Int. Conf. on Drying, Montreal (1978)

Environmental Protection Agency EPA, (2002), www.epa.gov/EPA-PEST/2002/June/Day-28/p16273.htm

Espinosa, R., Determinación de la cinética de extracción de la semilla de nim empleando hexano como solvente por método discontinuo, Tesis de BSc., Universidad Nacional de Ingeniería, Managua, Nicaragua (1993)

Espinosa, R., Leaching and Drying Process Steps in the Manufacture of a Botanical Insecticide from Ground Neem Seeds, Licentiate Treatise, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden (2000)

Espinosa, R., Lagerstedt, J., Nyman, T. and Martínez, J., Drying of Ground Neem Seeds in a Fluidized Bed Dryer, Proceedings of the 13th International Drying Symposium, Beijing, China, pp. 1360-1366 (2002)

Freire, F., Barrozo, M., Sartori, D., Freire, J., Study of the drying kinetics in thin layer fixed and moving bed, Drying 2004- Proceedings of the 14th International Drying Symposium, Sao Paulo, Brazil, pp. 1684-1691 (2004)

Gamero, R., Evaluación experimental de algunos parámetros que influyen en el proceso de secado de granos por contacto en un medio particulado caliente, Tesis de BSc., Universidad Nacional de Ingeniería, Managua, Nicaragua (1993)

Gamero, R., Mass transfer during isothermal Drying of a porous solid containing multicomponent liquid mixtures, Licentiate Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden (2004)

García, S., Determinación de la influencia de la presencia y naturaleza del soluto sobre la velocidad de secado de un sólido humedecido con una mezcla binaria, Tesis de BSc., Universidad Nacional de Ingeniería, Managua, Nicaragua (1999)

Geankoplis, C.J. Procesos de transporte y operaciones unitarias, Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V., México, pp. 579-599 (1998)

Hassini, L., Azzouz, S. and Belghith, A., Estimation of the moisture diffusion coefficient of potato during hot air drying, Drying 2004- Proceedings of the 14th International Drying Symposium, Sao Paulo, Brazil, pp. 1488-1495 (2004)

Holla, K.S., Method for producing azadirachtina concentrates from neem seed materials. U.S. Statutory Invention Registration H1.541, Jun.4. (1996)

IOSA, (2009). Investigaciones Orgánicas S.A. Referencias personales.

Istadi, Sitompul, J.P., Effect of distributed superficial- velocity in deep bed grain drying, Seminar of Fundamental and Application of Chemical Engineering, pp. DP2.1-DP2.6 (2000)

Key, R.B., Drying of loose and particulate materials, Hemisphere Publishing Corporation, United States, pp. 215-245 (1992)

Key, R.B., Drying Principles and Practice, Pergamon, Oxford, United Kingdom, pp. 181-183 (1972)

Khan, J.A., Alatas, B., Beasley, D.E., Superheated steam drying of porous particles in a packed bed, *Drying* 88, pp. OP321-OP328 (1988)

Koul, O., Isman, M.B. and Ketkar, C.M., Properties and uses of neem, *Azadirachta indica*. *Can. J. Bot.* 68:1-11 (1990)

Langrish, T.A.G., Bahu, R.E., Reay, D., Drying kinetics of particles from thin layer drying experiments, *Drying* 91, pp. 196-206 (1991)

Lewis, W.K., The rate of drying of solids materials, *Journal of Industrial Chemical Engineering*, pp. 427-443 (1921)

Lide, D.R., *Handbook of Chemistry and Physics*, CRC Press LLC, United States (2002)

Lozano, E., Estudio teórico y experimental de la cinética del secado del ácido acetilsalicílico, Tesis de BSc., Universidad Nacional de Ingeniería, Managua, Nicaragua (2009)

Martinello, M.A., Mattea, M.A., Crapiste, G., Superheated steam drying of parsley: A fixed bed model for predicting drying performance, *Latin American Applied Research*, pp. 333-337 (2003)

McCabe W.L., Smith, J.C., Harriott, P., *Operaciones unitarias en ingeniería química*, Editorial McGraw Hill Interamericana, España, pp. 579-580 (1991)

McGaw, D.R., Jairam, J., Drying of high moisture content materials in packed beds, *Drying* 98, Vol. B, ed. A.S. Mujumdar, pp. 1412-1419

Michel-Kim, H., Brandt, A., In the Proceedings of the 1st international neem conference, Germany, pp. 279-290 (1981)

Mujumdar, A. *Handbook of Industrial Drying*, Marcel Dekker, Inc., United States, Vol. 1, pp. 1-15 (1995)

National Research Council, *Neem: A Tree for Solving Global Problems*, National Academy of Sciences, United States (1992)

Negrini, A.L., Fuelber, J.T., Freire, J.T. and Thoméo, J.C., Fluid Dynamics of Air in a Packed Bed: Velocity Profiles and the Continuum Model Assumption. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, vol. 16, pp. 421-432 (1999)

Nyberg, M., Leaching and drying of neem flakes to obtain a botanical insecticide, MSc. Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweeden (2005)

Perry, R. y Green, D., *Perry's Chemical Engineer's Handbook*, McGraw Hill Companies Inc., United States, pp. 12.29-12.34 (1997)

Ramírez, W., Lixiviación a contracorriente en un extractor por lotes para obtener aceite e insecticida de nim a escala de planta piloto, Tesis de BSc., Universidad Nacional de Ingeniería, Managua, Nicaragua (1996)

Reids, R.C., Prausnitz, J.M., Poling, B.E., The properties of gases and liquids, McGraw Hill, United States (1987)

Schmutterer, H., Properties and potential of natural pesticides from the neem tree, *Azadirachta indica*. *Ann. Rev. Entomol.* 35:271-297 (1990)

Strumillo C. y Kudra T., *Drying: Principles, Applications and Design*, Gordon and Breach Science Publishers, United States, pp. 39-75 (1986)

Treybal, R.E., *Operaciones de transferencia de masa*, McGraw Hill Interamericana, México, pp. 753-756 (1999)

Valentas, K., Rotstein, E., Singh, R., *Handbook of Food Engineering Practice*, CRC Press LLC, United States, pp. 133-134 (1997)

Vallecillo, E., Determinación de las curvas de equilibrio en la lixiviación del aceite y del insecticida de la semilla de nim, Tesis de BSc., Universidad Nacional de Ingeniería, Managua, Nicaragua (2001)

Walas, S., *Chemical Process Equipment. Selection and Design*, Butterworth Heinemann, United States, pp. 231-237 (1990)

APÉNDICES

Apéndice A

Modelo matemático del proceso de secado en un lecho empacado

Nyberg (2005) estudió la cinética del secado de hojuelas de nim empacadas en una columna, tomando en consideración que los mayores cambios en la fase gaseosa ocurren en la dirección axial, según se muestra en la Figura A.1.

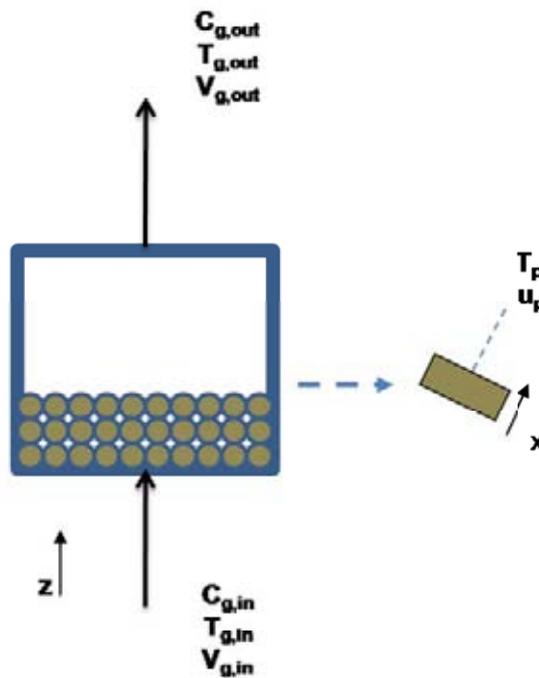


Figura A.1. Esquema del secado en un lecho empacado

Balances de masa:

La ecuación (A.1) define la transferencia de masa en la fase gaseosa:

$$\frac{\partial C_g}{\partial t} = D_D \frac{\partial^2 C_g}{\partial z^2} - v \left(\frac{\partial C_g}{\partial z} \right) + R_i \quad (\text{A.1})$$

Donde C_g es la concentración de solvente en forma de vapor en la fase gaseosa por volumen total, D_D es el coeficiente de dispersión, t es el tiempo, z es la longitud de la coordenada, v es la velocidad del aire y R_i es el solvente en forma de vapor añadido

a la corriente gaseosa debido a la evaporación a partir de la superficie de las hojuelas por volumen de lecho.

La ecuación (A.2) define la transferencia de masa en las hojuelas:

$$\frac{\partial u_p}{\partial t} = D \frac{\partial^2 u_p}{\partial x^2} \quad (\text{A.2})$$

Donde u_p es el volumen de líquido por volumen de partícula y D es la difusividad del líquido en las hojuelas.

Balances de energía:

La ecuación (A.3) define la transferencia de calor en la fase gaseosa:

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = \alpha_g \frac{\partial^2 T_g}{\partial z^2} - \frac{v}{\rho_{sol} C_p} \left(\frac{\partial T_g}{\partial z} \right) + \frac{Q_i}{\rho_{sol} C_p} \quad (\text{A.3})$$

Donde T_g es la temperatura del gas, α_g es la difusividad térmica del gas, ρ_{sol} es la densidad del solvente, C_p es el calor específico y Q_i es la energía del solvente en forma de vapor añadida a la corriente de gas, es decir, calor generado por el sistema.

La ecuación (A.4) define la transferencia de calor en las hojuelas:

$$\frac{\partial T_p}{\partial t} = \alpha_p \frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} \quad (\text{A.4})$$

Donde T_p es la temperatura de las hojuelas y α_p es la difusividad térmica de las hojuelas.

Las condiciones iniciales y las condiciones de contorno que permiten resolver mediante un método numérico las ecuaciones diferenciales previas son mostradas a continuación:

Condiciones iniciales:

En el lecho:

$$C_g = C_{gi} \quad 0 \leq z \leq H \quad t = 0$$

$$T_g = T_{gi} \quad 0 \leq z \leq H \quad t = 0$$

En las hojuelas:

$$u_p = u_{p,i} \quad -L/2 \leq x \leq L/2 \quad t = 0$$

$$T_p = T_{p,i} \quad -L/2 \leq x \leq L/2 \quad t = 0$$

Condiciones de contorno:

En el lecho:

$$-D \frac{\partial C_g}{\partial z} + v C_g = v C_{g,in} \quad z = 0 \quad t > 0$$

$$-\alpha \frac{\partial T_g}{\partial z} + v T_g = v T_{g,in} \quad z = 0 \quad t > 0$$

$$\frac{\partial C_g}{\partial z} = 0 \quad z = H \quad t > 0$$

$$\frac{\partial T_g}{\partial z} = 0 \quad z = H \quad t > 0$$

En las hojuelas:

$$\frac{\partial u_p}{\partial x} = 0 \quad x = 0 \quad t > 0$$

$$\frac{\partial T_p}{\partial x} = 0 \quad x = 0 \quad t > 0$$

$$c_l D_L \left. \frac{\partial u_p}{\partial x} \right|_{x=L/2} = N_w \quad x = L/2 \quad t > 0$$

$$-k \left. \frac{\partial T_p}{\partial x} \right|_{x=L/2} = h(T_g - T_p) - N_w \lambda M_w \quad x = L/2 \quad t > 0$$

$$N_w = h_D \frac{C_T}{C_{Bm}} (C_{g,s} - C_{g,b}) \quad x = L/2 \quad t > 0$$

$$C_{g,s} = \frac{P_w(T_p)}{RT_p} \quad x = L/2 \quad t > 0$$

Apéndice B

Relaciones de transferencia de calor

La ecuación (B.1) define el balance de energía total en un sistema:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{v}{\rho C_p} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{Q_i}{\rho C_p} \quad (\text{B.1})$$

(A) (B) (C) (D)

El término (A) se refiere a la acumulación de energía dentro del sistema. El término (B) se refiere a la transferencia de calor por conducción. El término (C) se refiere a la transferencia de calor por convección. El término (D) se refiere a la generación de energía dentro del sistema.

Si se analiza únicamente el efecto de la transferencia de calor por conducción, la ecuación B.1 podrá ser escrita de la siguiente forma:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (\text{B.2})$$

El término entre paréntesis corresponde a la ecuación de Fourier, análoga a la ecuación de Fick (Ecuación 3.28), según se muestra a continuación:

$$q = \frac{Q}{A} = -k \left(\frac{dT}{dz} \right) \quad (\text{B.3})$$

Al integrar la ecuación B.3 se obtiene la siguiente expresión:

$$Q = \frac{kA}{H} (T_1 - T_2) \quad (\text{B.4})$$

La relación entre el producto de la conductividad térmica por el área transversal y la longitud se conoce como conductancia.

La relación inversa a la conductancia se conoce como resistencia térmica y es definida así:

$$R = \frac{H}{kA} \quad (\text{B.5})$$

Apéndice C

Curva de calibración de la velocidad promedio del aire

Tabla C.1. Datos de la tubería y del aire

Diámetro de la tubería d (m)	0.04
Temperatura promedio T_{ave} (K)	312.3
Densidad del aire ρ (Kg/m ³)	1.117
Viscosidad del aire μ (Pa/s)	1.92E-05

Tabla C.2. Relación de la frecuencia de rotación del ventilador con la velocidad máxima y promedio del aire

Frecuencia (Hz)	Velocidad máxima (v_{max})	Número de Reynolds $Re = (v_{max} d \rho_a) / \mu_a$	Velocidad promedio (v_{ave})
50	2.51	5841.85	2.01
45	2.20	5120.35	1.76
40	1.75	4073.01	1.40
35	1.51	3514.42	1.21
30	1.25	2909.29	1.00
25	1.00	2327.43	0.80
20	0.83	1931.77	0.42
15	0.63	1466.28	0.32
10	0.40	930.97	0.20
5	0.19	442.21	0.10

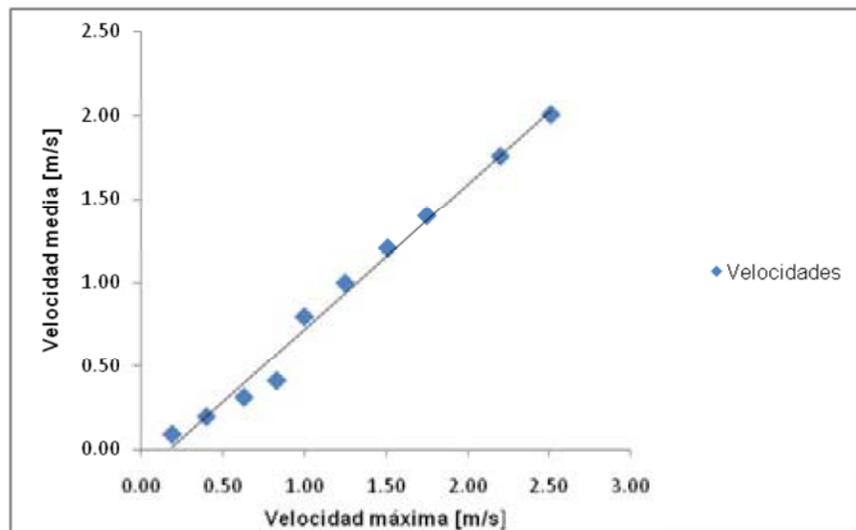


Figura C.1. Curva de calibración de la velocidad promedio del aire

Las velocidades máximas y promedios se pueden correlacionar de forma lineal según se muestra en la Figura B.1. La ecuación lineal resultante de esta correlación es $y = 0.870x - 0.147$, siendo el valor de $R^2 = 0.987$, lo cual denota un buen ajuste.

Apéndice D

Datos y propiedades del material

Tabla D.1. Densidad aparente promedio

Nim	Densidad aparente promedio (Kg/m ³)
Semillas	563
Hojuelas	499

Tabla D.2. Volumen del lecho

Nim	Cantidad	Volumen del lecho (m ³)
Semillas	0.40 Kg	7.10E-04
	0.80 Kg	1.42E-03
Hojuelas	0.40 Kg	8.01E-04
	0.80 Kg	1.60E-03

Tabla D.3. Porosidad promedio del lecho

Nim	Porosidad promedio
Semillas	0.50
Hojuelas	0.35

Apéndice E

Análisis de varianza

Tabla E.1. Análisis de varianza para el solvente agua

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Suma de cuadrados promedio	Relación F	Valor p
Efectos principales					
A: Velocidad del aire	0.03324	1	0.03324	30.91	0.0026
B: Tamaño de partícula	0.01762	1	0.01762	16.38	0.0099
C: Temperatura del aire	0.0195	1	0.0195	18.13	0.008
D: Masa de material	0.02768	1	0.02768	25.74	0.0039
Interacciones					
AB	0.00249	1	0.00249	2.32	0.1884
AC	0.00794	1	0.00794	7.39	0.0419
AD	0.0112	1	0.0112	10.44	0.0232
BC	1.156 E-06	1	1.156 E-06	0	0.9751
BD	0.00259	1	0.00259	2.42	0.1808
CD	0.00458	1	0.00458	4.26	0.094
Residual	0.00538	5	0.001075		
Total (corregido)	0.1323	15			

Tabla E.2. Análisis de varianza para el solvente etanol

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Suma de cuadrados promedio	Relación F	Valor p
Efectos principales					
A: Velocidad del aire	1.2492	1	1.2492	17.49	0.0086
B: Tamaño de partícula	0.00005366	1	0.00005366	0	0.9792
C: Temperatura del aire	3.4387	1	3.4387	48.15	0.001
D: Masa de material	0.4046	1	0.4046	5.67	0.0598
Interacciones					
AB	0.0003195	1	0.0003195	0	0.9493
AC	0.7591	1	0.7591	10.63	0.0224
AD	0.2787	1	0.2787	3.9	0.1052
BC	0.01202	1	0.01202	0.17	0.6986
BD	0.004841	1	0.004841	0.07	0.805
CD	0.4143	1	0.4143	5.8	0.061
Residual	0.3571	5	0.07141		
Total (corregido)	6.9189	15			

Tabla E.3. Análisis de varianza para el solvente hexano

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Suma de cuadrados promedio	Relación F	Valor p
Efectos principales					
A: Velocidad del aire	3.9045	1	3.9045	46.68	0.001
B: Tamaño de partícula	0.01031	1	0.01031	0.12	0.7399
C: Temperatura del aire	1.4564	1	1.4564	17.41	0.0087
D: Masa de material	2.80002	1	2.80002	33.48	0.0022
Interacciones					
AB	0.02207	1	0.02207	0.26	0.6293
AC	0.5291	1	0.5291	6.33	0.0535
AD	0.607	1	0.607	7.26	0.0431
BC	0.04375	1	0.04375	0.52	0.5019
BD	0.01283	1	0.01283	0.15	0.7114
CD	0.4229	1	0.4229	5.06	0.0744
Residual	0.4182	5	0.08364		
Total (corregido)	10.227	15			

Gráficos

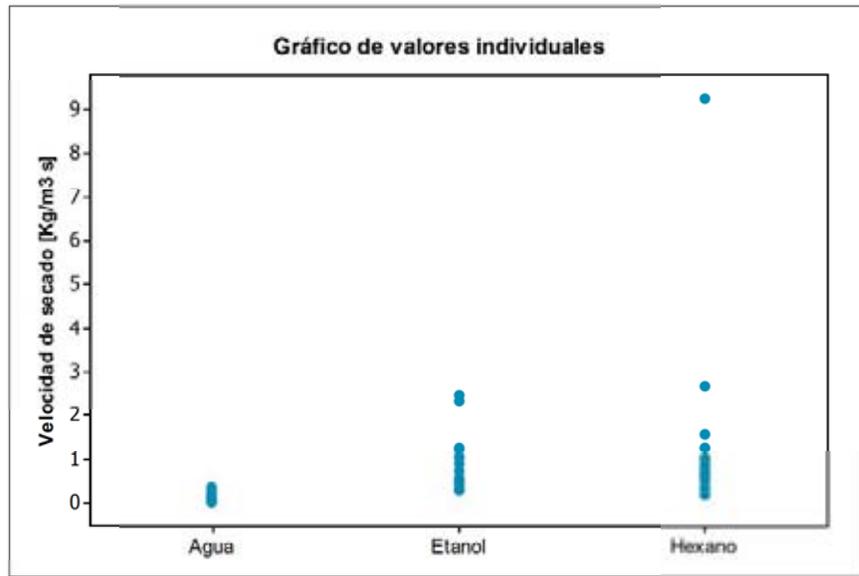


Figura E.1. Gráfico de valores individuales de velocidad de secado para cada solvente

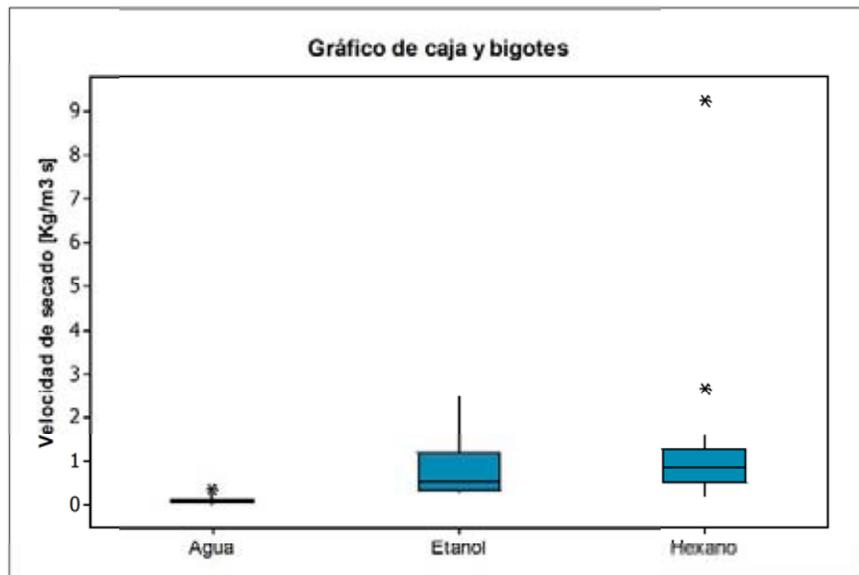


Figura E.2. Gráfico de caja y bigotes para velocidad de secado correspondiente a cada solvente

Apéndice F

Gráficos de la variable no controlable: Humedad relativa ambiental

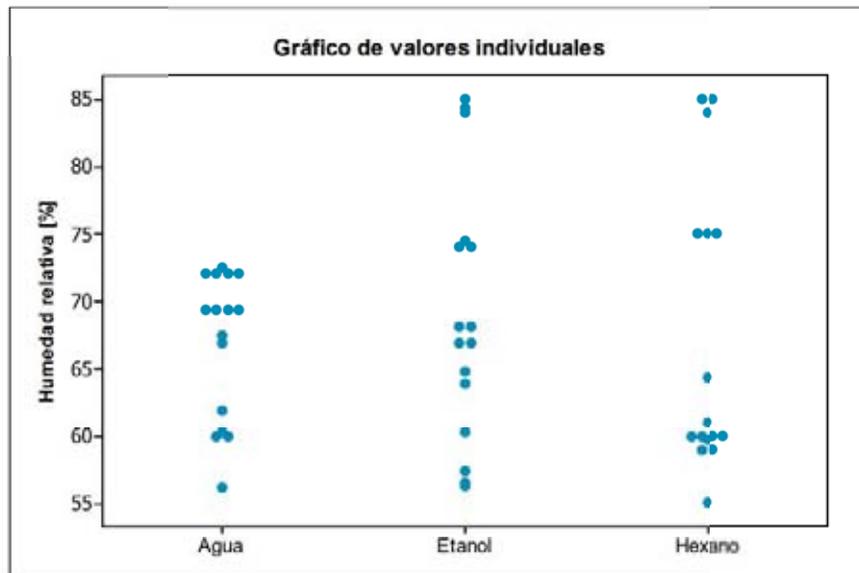


Figura F.1. Gráfico de valores individuales de humedad relativa correspondiente a cada experimento

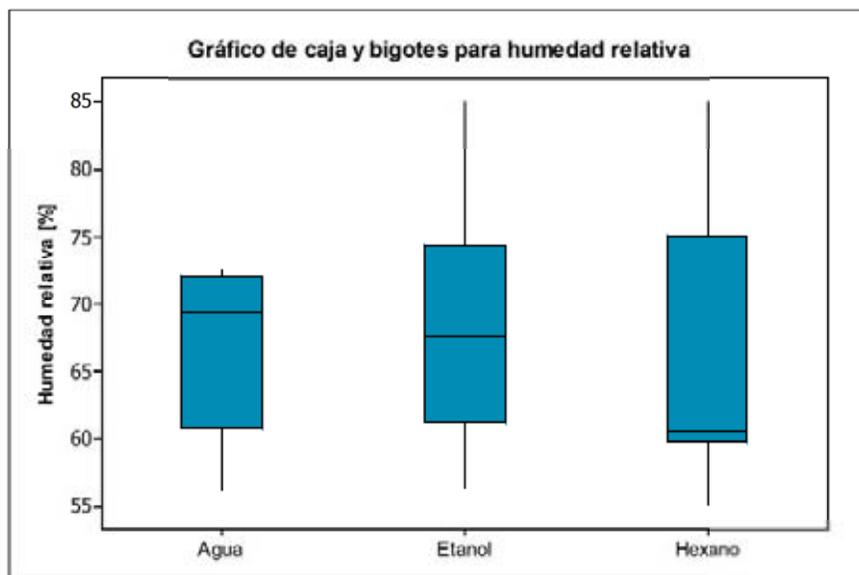


Figura F.2. Gráfico de caja y bigotes de humedad relativa correspondiente a cada experimento

Apéndice G

Fotografías del árbol de nim y sus derivados



Figura G.1. Árbol de nim



Figura G.2. Frutos del árbol de nim



Figura G.3. Semillas de nim con endocarpio



Figura G.4. Semillas de nim sin endocarpio

Apéndice H

Fotografías de la fase experimental



Figura H.1. Semillas de mim



Figura H.2. Hojuelas de mim



Figura H.3. Equipo experimental



Figura H.4. Lecho empacado de semillas de nim en la columna de vidrio del equipo experimental

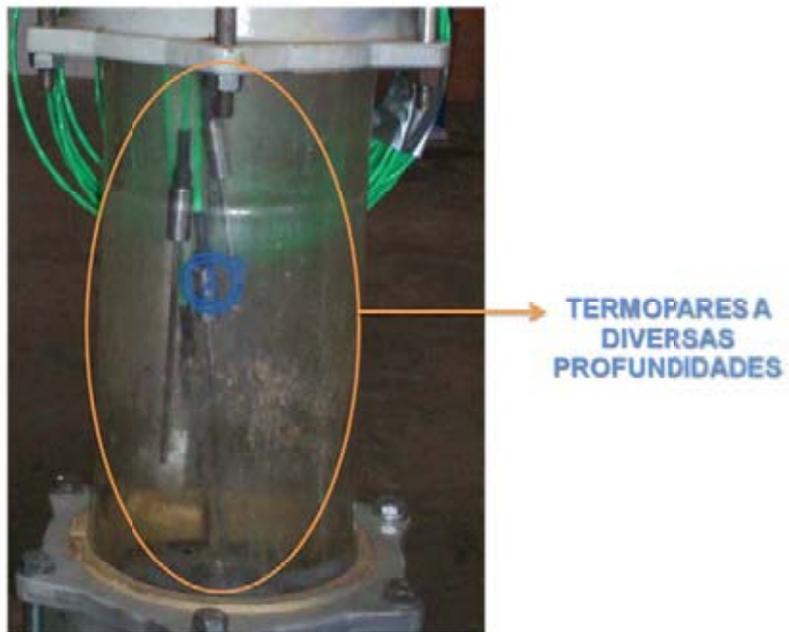


Figura H.5. Ubicación de los termopares a diversas profundidades en el interior de la columna de vidrio.

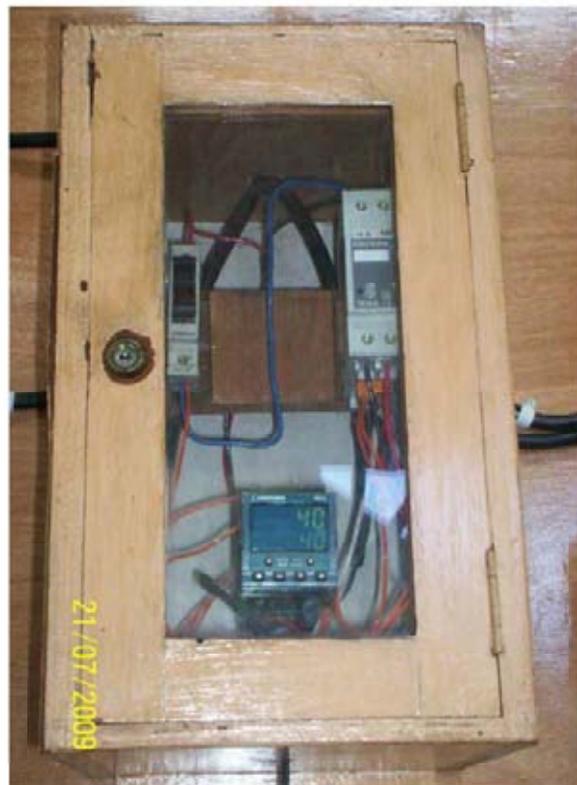


Figura H.6. Controlador de temperatura *Eurotherm*



Figura H.7. Muestras para determinar la humedad inicial dentro de un horno