

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL PROCESO DE SECADO A TRAVÉS DE LA CINÉTICA DE DESHIDRATACIÓN POR CONVECCIÓN FORZADA EN CALABACÍN (*Cucurbita pepo*).

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Techeira P., Guillermo D.
Para optar al Título
de Ingeniero Químico

Caracas, 2010

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL PROCESO DE SECADO A TRAVÉS DE LA CINÉTICA DE DESHIDRATACIÓN POR CONVECCIÓN FORZADA EN CALABACÍN (*Cucurbita pepo*).

TUTORES: Prof. Andrés Rosales.
Dra. Damely García.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Techeira P., Guillermo D.
Para optar al Título
de Ingeniero Químico

Caracas, 2010

Caracas, Mayo de 2010.

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Guillermo Techeira, titulado:

Evaluar el comportamiento del proceso de secado a través de la cinética de deshidratación por convección forzada en calabacín (*Cucurbita pepo*).

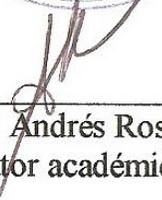
Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Químico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.



Prof. Mary Luz Alonso
Jurado



Prof. Jaime Hernandez
Jurado



Prof. Andrés Rosales
Tutor académico

DEDICATORIA

A mis padres, por bancarme de todas las maneras posibles, cosa que yo se no es fácil.

A mi hermana que siempre me ayudo en todo lo que pudo sobretodo ahora al final de la mi carrera.

A mi hermano, que a pesar de todo siempre consigue encontrar la forma de hacer reír cuando es necesario.

A mi familia más reciente, mi cuñado y mi sobrina, porque sé que puedo contar con su apoyo como cuento con él de mis padres y hermanos.

A mi familia “lejana”, todos mis tíos, primos, abuelos y sobrinos, porque a pesar de la distancia y el tiempo nunca he dejado de sentir su empuje y pensar en regresar siempre va a ser un motivo para echar para adelante.

A todos los amigos que me he encontrado por el camino, dígase: El Peste, Ramón, El Oso, Jonathan, Raúl, Pototo, Rafael y a todo aquel que me acompañó alguna vez al comedor, se unió a una conversación en la biblioteca o algún juego en la cancha.

A la que fue mi novia durante casi toda mi carrera, Laura, por aguantarme y darme ánimos de seguir adelante.

Y a mila.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Central de Venezuela, por brindarme los conocimientos y la experiencia para conseguir el título de ingeniero, y por ser mi casa durante el tiempo necesario para ello.

A mi tutor Andrés Rosales, por compartir sus conocimientos conmigo tanto para la elaboración de este trabajo como al momento de darme clases durante la carrera.

A mi tutora Damely García, por darme la oportunidad de trabajar bajo su guía y conseguir así culminar el trabajo realizado durante toda la carrera.

A mi hermana Nora, por brindarme su apoyo al momento de cualquier consulta y por las horas que espero a que terminara los experimentos.

Al personal técnico del Instituto de Química de Alimentos de la Facultad de Agronomía, por brindarme las facilidades para realizar mi trabajo sin ningún inconveniente.

Techeira P., Guillermo D.

EVALUAR EL COMPORTAMIENTO DEL PROCESO DE SECADO A TRAVÉS DE LA CINÉTICA DE DESHIDRATACIÓN POR CONVECCIÓN FORZADA EN CALABACÍN (*Cucurbita pepo*).

Tutor Académico: Prof. Andrés Rosales. Tutor industrial: Dra. Damely García.

Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. Año 2010, 98p.

Palabras clave: Secado de vegetales, calabacín, curvas de secado.

Resumen. El calabacín (*Cucurbita pepo*) es un fruto con un bajo contenido de carbohidratos y un alto contenido de minerales, vitamina C y antioxidantes por lo que se puede considerar propicio como un alimento para dietas especiales. Como la mayoría de los frutos frescos, éste es altamente perecedero y el secado, además de contribuir a alargar el tiempo apto para el consumo del mismo, también facilita el transporte y almacenamiento, por lo que se planteó evaluar el comportamiento del proceso de secado para determinar las condiciones óptimas de temperatura, espesor y diámetro con el fin de aprovechar mejor el tiempo y la energía requerida para el proceso. Para ello fueron construidas curvas de secado y de velocidad de secado para un aire de secado a las temperaturas de 60, 70 y 80°C, y calabacín cortado en rodajas de 1, 5 y 10 mm de espesor y 4, 4,5 y 5cm de diámetro, para una humedad absoluta y una velocidad de aire de secado fija. En dichas curvas se evidencia claramente como al aumentar el espesor de las rodajas aumenta el tiempo requerido para que las muestras alcancen las condiciones de humedad de equilibrio y una similitud entre las curvas a temperaturas de 70 y 80°C, en base a este análisis cualitativo y conjuntamente con el cálculo de coeficientes de transferencia de calor, transferencia de masa por convección y la difusividad efectiva del agua dentro del sólido, se indica que las mejores condiciones para realizar el proceso de secado son a una temperatura de 70°C y el menor espesor posible, en este caso 1mm; el diámetro no afecta la velocidad con la cual ocurre el proceso, como tampoco afectan la temperatura y el espesor la cantidad de minerales luego de concluido el secado y para todos los casos el valor de actividad de agua fue menor al establecido para inhibir el crecimiento microbiano. A partir del cálculo de los coeficientes ya mencionados, conjuntamente con un factor de relación entre los resultados experimentales y teóricos, es posible predecir el la velocidad de evaporación de la humedad del sólido y el tiempo requerido para alcanzar el equilibrio a diferentes condiciones de humedad absoluta y velocidad de aire de secado.

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | Pág. |
|--|-------------|
| <i>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN</i> | 1 |
| Planteamiento del problema | 2 |
| Objetivos | 3 |
| Objetivo General:..... | 3 |
| Objetivos Específicos: | 3 |
| Antecedentes | 4 |
| <i>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO</i> | 6 |
| Secado | 6 |
| Efecto de la naturaleza del sólido..... | 7 |
| Sólidos solubles | 7 |
| Sólidos insolubles | 7 |
| Operaciones de secado | 11 |
| Curvas de secado | 13 |
| Curvas de velocidad de secado..... | 14 |
| Mecanismo del secado por carga para circulación tangencial..... | 17 |
| Período de rapidez de secado constante..... | 17 |
| Movimiento de la humedad dentro del sólido. | 24 |
| Secado de la superficie no saturada. | 25 |
| Difusión del líquido. | 27 |
| Calabacín | 30 |
| Actividad de agua..... | 32 |
| <i>CAPÍTULO III: METODOLOGÍA GENERAL</i> | 32 |
| <i>CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN</i> | 37 |
| Curvas de secado y velocidad de secado por el método de convección forzada en calabacín..... | 38 |
| Curvas de secado | 38 |
| Curvas de velocidad de secado | 45 |

| | |
|--|----|
| Efecto de las condiciones de temperatura del aire, espesor y diámetro de las rodajas de calabacín para el secado por convección forzada sobre el contenido de humedad final, actividad de agua y cantidad de minerales en calabacín en polvo | 53 |
| Efecto de la temperatura de secado por convección forzada sobre el contenido de humedad final y actividad de agua en calabacín..... | 53 |
| Contenido de fósforo y potasio a las distintas condiciones de temperatura y espesor | 55 |
| Condicions óptimas de temperatura y tamaño de las rodajas de calabacín para llevar a cabo el proceso de secado por cargas mediante el método de convección forzada | 55 |
| Coeficientes de transferencia de masa por convección en el periodo de velocidad de secado constante y la difusividad efectiva en el periodo de velocidad de secado decreciente..... | 58 |
| Coeficientes de transferencia de calor por convección (h_c), conducción (U_k), conducción lateral (U_{kl}) y radiación (h_r) para el periodo de secado a velocidad constante para las distintas condiciones de temperatura, espesor y diámetro. | 58 |
| Coeficientes de transferencia de masa por convección (k_y) y del factor de relación entre los valores experimentales y teóricos (f_c). | 60 |
| Difusividad efectiva (D) para el periodo de velocidad de secado decreciente a las distintas condiciones de temperatura, espesor y diámetro..... | 62 |
| <i>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES</i> | 64 |
| <i>CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES</i> | 65 |
| <i>CAPÍTULO VII: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i> | 66 |
| <i>CAPÍTULO VIII: APÉNDICE</i> | 68 |

NOTACIÓN DE VARIABLES

| | |
|---------------|--|
| A | Superficie que se está secando (m^2). |
| A_m | Superficie promedio del sólido (m^2). |
| A_u | Superficie que no se está secando (m^2). |
| C_{A0} | Concentración inicial (Kg agua/Kg totales). |
| $C_{A\infty}$ | Concentración en el equilibrio (Kg agua/Kg totales). |
| $C_{A\theta}$ | Concentración para un instante de tiempo (Kg agua/Kg totales). |
| C_p | Capacidad calorífica (J/Kg.K). |
| C_s | Calor húmedo (J/Kg.K). |
| D_{AB} | Difusividad molecular del vapor A mezclado con el gas B (m^2/s). |
| D | Difusividad efectiva (m^2/s). |
| d_e | Diámetro equivalente (m). |
| f_C | Factor de relación para el calabacín (adimensional) |
| G | Velocidad másica (Kg/ $m^2.s$). |
| h_c | Coefficiente de transferencia de calor por convección ($W/m^2.K$). |
| h_r | Coefficiente de transferencia de calor por radiación ($W/m^2.K$). |
| k | Conductividad térmica ($W/m.K$). |
| k_Y | Coefficiente de transferencia de masa de la fase gaseosa (Kg/ $m^2.s$). |
| Le | Número de Lewis (adimensional). |
| N | Flux de secado (Kg/ $m^2.s$). |
| N_C | Flux de secado en el contenido crítico de humedad (Kg/ $m^2.s$). |
| P | Presión atmosférica (Pa). |
| P_C | Presión crítica (Pa) |
| P^V | Presión de vapor del agua pura (Pa). |
| Pr | Número de Prandtl (adimensional). |
| q | Flux de calor recibido en la superficie que se está secando (W/m^2). |
| q_C | Flux de calor para la convección (W/m^2). |
| q_K | Flux de calor para la conducción (W/m^2). |
| q_R | Flux de calor para la radiación (W/m^2). |

| | |
|---------------|--|
| Re | Número de Reynolds (adimensional). |
| Sc | Número de Schmidt (adimensional). |
| S_S | Masa de sólido seco (Kg). |
| T_G | Temperatura de un gas (K). |
| T_S | Temperatura superficial (K). |
| U_G | Coefficiente global de transferencia de calor ($W/m^2.K$). |
| U_k | Coefficiente de transferencia de calor por conducción-convección ($W/m^2.K$). |
| U_{kl} | Coefficiente de transferencia de calor por conducción-convección lateral ($W/m^2.K$). |
| X | Contenido de humedad en base seca (Kg agua/Kg sólido seco). |
| X^* | Contenido de humedad en el equilibrio de un sólido (Kg agua/Kg sólido seco). |
| X_C | Contenido crítico de la humedad de un sólido (Kg agua/Kg sólido seco). |
| Y | Contenido de humedad de un gas (Kg agua/Kg aire seco). |
| Y_S | Contenido de humedad en la superficie (Kg agua/Kg aire seco). |
| z_M | Espesor del material de la bandeja (m). |
| z_S | Espesor del sólido que se está secando (m). |
| α | Difusividad molecular térmica (m^2/s). |
| ε | Emisividad de la superficie que se está secando (adimensional). |
| λ_S | Calor latente de vaporización para la temperatura superficial (J/Kg). |
| μ | Viscosidad (Kg/m.s). |
| ρ | Densidad (Kg/m ³). |
| σ | Constante de Stefan-Boltzmann ($W/m^2.k^4$) |
| ν | Difusividad molecular del momento (m^2/s). |
| θ | Tiempo (s) |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | Pág. |
|---------------------|---|-------------|
| Figura N°1: | Contenido de humedad en el equilibrio del nitrato de sodio a 25°C..... | 8 |
| Figura N°2: | Contenido de agua en el equilibrio de algunos sólidos comunes a aproximadamente 25°C..... | 9 |
| Figura N°3: | Tipos de humedad..... | 10 |
| Figura N°4: | Secador de platos típico..... | 12 |
| Figura N°5: | Secado por lotes, condiciones de secado constantes..... | 13 |
| Figura N°6: | Curva típica de rapidez de secado, condiciones de secado constantes..... | 15 |
| Figura N°7: | Secado a rapidez constante..... | 17 |
| Figura N°8: | Rapidez decreciente lineal..... | 25 |
| Figura N°9: | Tratamiento empírico de los datos de rapidez decreciente..... | 27 |
| Figura N°10: | Periodo de rapidez de decreciente controlado por la difusión... | 28 |
| Figura N°11: | Difusión en estado no estacionario..... | 29 |
| Figura N°12: | Diagrama de bloques del proceso..... | 34 |
| Figura N°13: | Curvas de secado de calabacín a las temperaturas de 60, 70 y 80°C para un espesor de 1mm y un diámetro de 4cm..... | 39 |
| Figura N°14: | Curvas de secado de calabacín a las temperaturas de 60, 70 y 80°C para un espesor de 1mm y un diámetro de 4,5cm..... | 40 |
| Figura N°15: | Curvas de secado de calabacín a las temperaturas de 60, 70 y 80°C para un espesor de 1mm y un diámetro de 5cm..... | 40 |
| Figura N°16: | Curvas de secado de calabacín a las temperaturas de 60, 70 y 80°C para un espesor de 5mm y un diámetro de 4cm..... | 41 |
| Figura N°17: | Curvas de secado de calabacín a las temperaturas de 60, 70 y 80°C para un espesor de 5mm y un diámetro de 4,5cm..... | 42 |
| Figura N°18: | Curvas de secado de calabacín a las temperaturas de 60, 70 y 80°C para un espesor de 5mm y un diámetro de 5cm..... | 43 |
| Figura N°19: | Curvas de secado de calabacín a las temperaturas de 60, 70 y 80°C para un espesor de 10mm y un diámetro de 4cm..... | 43 |
| Figura N°20: | Curvas de secado de calabacín a las temperaturas de 60, 70 y 80°C para un espesor de 10mm y un diámetro de 4,5cm..... | 44 |

| | | |
|---------------------|---|----|
| Figura N°21: | Curvas de secado de calabacín a las temperaturas de 60, 70 y 80°C para un espesor de 10mm y un diámetro de 5cm..... | 45 |
| Figura N°22: | Curvas de velocidad de secado de calabacín a las temperaturas de 60, 70 y 80°C, para un espesor de 1mm y un diámetro de 4cm..... | 47 |
| Figura N°23: | Curvas de velocidad de secado de calabacín a las temperaturas de 60, 70 y 80°C, para un espesor de 1mm y un diámetro de 4,5cm..... | 47 |
| Figura N°24: | Curvas de velocidad de secado de calabacín a las temperaturas de 60, 70 y 80°C, para un espesor de 1mm y un diámetro de 5cm..... | 48 |
| Figura N°25: | Curvas de velocidad de secado de calabacín a las temperaturas de 60, 70 y 80°C, para un espesor de 5mm y un diámetro de 4cm..... | 49 |
| Figura N°26: | Curvas de velocidad de secado de calabacín a las temperaturas de 60, 70 y 80°C, para un espesor de 5mm y un diámetro de 4,5cm..... | 49 |
| Figura N°27: | Curvas de velocidad de secado de calabacín a las temperaturas de 60, 70 y 80°C, para un espesor de 5mm y un diámetro de 5cm..... | 50 |
| Figura N°28: | Curvas de velocidad de secado de calabacín a las temperaturas de 60, 70 y 80°C, para un espesor de 10mm y un diámetro de 4cm..... | 51 |
| Figura N°29: | Curvas de velocidad de secado de calabacín a las temperaturas de 60, 70 y 80°C, para un espesor de 10mm y un diámetro de 4,5cm..... | 51 |
| Figura N°30: | Curvas de velocidad de secado de calabacín a las temperaturas de 60, 70 y 80°C, para un espesor de 10mm y un diámetro de 5cm..... | 52 |
| Figura N°31: | Curvas de secado de calabacín cortado en rodajas con espesores de 1, 5 y 10mm, para una temperatura de 60°C y un diámetro de 4cm..... | 77 |
| Figura N°32: | Curvas de secado de calabacín cortado en rodajas con espesores de 1, 5 y 10mm, para una temperatura de 60°C y un diámetro de 4,5cm..... | 77 |
| Figura N°33: | Curvas de secado de calabacín cortado en rodajas con espesores de 1, 5 y 10mm, para una temperatura de 60°C y un diámetro de 5cm..... | 78 |

| | | |
|---------------------|--|----|
| Figura N°34: | Curvas de secado de calabacín cortado en rodajas con espesores de 1, 5 y 10mm, para una temperatura de 70°C y un diámetro de 4cm..... | 78 |
| Figura N°35: | Curvas de secado de calabacín cortado en rodajas con espesores de 1, 5 y 10mm, para una temperatura de 70°C y un diámetro de 4,5cm..... | 79 |
| Figura N°36: | Curvas de secado de calabacín cortado en rodajas con espesores de 1, 5 y 10mm, para una temperatura de 70°C y un diámetro de 5cm..... | 79 |
| Figura N°37: | Curvas de secado de calabacín cortado en rodajas con espesores de 1, 5 y 10mm, para una temperatura de 80°C y un diámetro de 4cm..... | 80 |
| Figura N°38: | Curvas de secado de calabacín cortado en rodajas con espesores de 1, 5 y 10mm, para una temperatura de 80°C y un diámetro de 4,5cm..... | 80 |
| Figura N°39: | Curvas de secado de calabacín cortado en rodajas con espesores de 1, 5 y 10mm, para una temperatura de 80°C y un diámetro de 5cm..... | 81 |
| Figura N°40: | Curvas de velocidad de secado de calabacín cortado en rodajas con espesores de 1, 5 y 10mm, para una temperatura de 60°C y un diámetro de 4cm..... | 81 |
| Figura N°41: | Curvas de velocidad de secado de calabacín cortado en rodajas con espesores de 1, 5 y 10mm, para una temperatura de 60°C y un diámetro de 4,5cm..... | 82 |
| Figura N°42: | Curvas de velocidad de secado de calabacín cortado en rodajas con espesores de 1, 5 y 10mm, para una temperatura de 60°C y un diámetro de 5cm..... | 82 |
| Figura N°43: | Curvas de velocidad de secado de calabacín cortado en rodajas con espesores de 1, 5 y 10mm, para una temperatura de 70°C y un diámetro de 4cm..... | 83 |
| Figura N°44: | Curvas de velocidad de secado de calabacín cortado en rodajas con espesores de 1, 5 y 10mm, para una temperatura de 70°C y un diámetro de 4,5cm..... | 83 |
| Figura N°45: | Curvas de velocidad de secado de calabacín cortado en rodajas con espesores de 1, 5 y 10mm, para una temperatura de 70°C y un diámetro de 5cm..... | 84 |
| Figura N°46: | Curvas de velocidad de secado de calabacín cortado en rodajas con espesores de 1, 5 y 10mm, para una temperatura de 80°C y un diámetro de 4cm..... | 84 |

| | | |
|---------------------|--|----|
| Figura N°47: | Curvas de velocidad de secado de calabacín cortado en rodajas con espesores de 1, 5 y 10mm, para una temperatura de 80°C y un diámetro de 4,5cm..... | 85 |
| Figura N°48: | Curvas de velocidad de secado de calabacín cortado en rodajas con espesores de 1, 5 y 10mm, para una temperatura de 80°C y un diámetro de 5cm..... | 85 |
| Figura N°49: | Calabacines usados para ser cortados en rodajas..... | 86 |
| Figura N°50: | Instrumento utilizado para garantizar espesores fijos en las rodajas de calabacín..... | 86 |
| Figura N°51: | Rodajas frescas de calabacín..... | 87 |
| Figura N°52: | Rodajas secas de calabacín..... | 87 |
| Figura N°53 | Secador de bandejas utilizado..... | 88 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | | Pág. |
|--------------------|--|-------------|
| Tabla N°1: | Composición química de la pulpa de los calabacines crudos por cada 100gr..... | 31 |
| Tabla N°2: | Actividad de agua mínima para el crecimiento microbiano..... | 33 |
| Tabla N°3: | Valores de humedad final y actividad de agua obtenidos para las rodajas de calabacín..... | 54 |
| Tabla N°4: | Valores de porcentaje de fósforo y potasio..... | 55 |
| Tabla N°5: | Coeficientes de transferencia de calor por convección, conducción, conducción lateral y radiación..... | 59 |
| Tabla N°6: | Coeficientes de transferencia de masa por convección..... | 61 |
| Tabla N°7: | Difusividad efectiva..... | 63 |
| Tabla N°8: | Peso de las bandejas con 6 rodajas de calabacín cada una para una temperatura de aire de secado de 60°C y un espesor de 1mm..... | 68 |
| Tabla N°9: | Peso de las bandejas con 6 rodajas de calabacín cada una para una temperatura de aire de secado de 60°C y un espesor de 5mm.. | 69 |
| Tabla N°10: | Peso de las bandejas con 6 rodajas de calabacín cada una para una temperatura de aire de secado de 60°C y un espesor de 10mm | 70 |
| Tabla N°11: | Peso de las bandejas con 6 rodajas de calabacín cada una para una temperatura de aire de secado de 70°C y un espesor de 1mm.. | 71 |
| Tabla N°12: | Peso de las bandejas con 6 rodajas de calabacín cada una para una temperatura de aire de secado de 70°C y un espesor de 5mm.. | 72 |
| Tabla N°13: | Peso de las bandejas con 6 rodajas de calabacín cada una para una temperatura de aire de secado de 70°C y un espesor de 10mm | 73 |
| Tabla N°14: | Peso de las bandejas con 6 rodajas de calabacín cada una para una temperatura de aire de secado de 80°C y un espesor de 1mm.. | 74 |
| Tabla N°15: | Peso de las bandejas con 6 rodajas de calabacín cada una para una temperatura de aire de secado de 80°C y un espesor de 5mm.. | 75 |
| Tabla N°16: | Peso de las bandejas con 6 rodajas de calabacín cada una para una temperatura de aire de secado de 80°C y un espesor de 10mm | 76 |

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Es sabido que la industria de procesamiento de alimentos posee cada vez una mayor importancia a nivel mundial debido al alto crecimiento de la población y a la localización de los grandes centros urbanos lejos de las áreas rurales, lo que hace necesario la creación de alimentos de larga duración con el fin de que éstos pueden ser consumidos en cualquier momento. Como consecuencia directa las técnicas ó métodos de conservación de alimentos son cada vez más necesarios.

En el caso de las frutas y vegetales, que son productos de gran demanda y altamente perecederos, se requieren tratamientos que permitan extender su disponibilidad en el mercado. En este sentido, una de las técnicas más adecuada es la deshidratación, no sólo por permitir satisfacer la demanda de productos agrícolas, sino también por contribuir a un mejor transporte y presentación de los mismos, dada la disminución del contenido de agua, haciendo de éstos, alimentos no perecederos listos para el consumo.

La deshidratación o secado, es un proceso utilizado para disminuir la cantidad de agua o humedad presente en los alimentos, con el fin de inhibir el crecimiento microbiano, y de esta forma aumentar el tiempo de vida útil (Maldonado y Pacheco, 2003). Para esta investigación fue seleccionado el calabacín (*Cucurbita pepo*) por ser un producto altamente perecedero, susceptible al manejo y por formar parte de la dieta diaria de muchos consumidores, incluso en regímenes especiales, siendo utilizado comúnmente para la elaboración de sopas o cremas. La deshidratación de este rubro y transformación en forma de polvo puede ser útil, no sólo para preparar sopas o cremas, sino también como ingrediente para elaborar otros productos, como croquetas, panquecas, entre otros.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Si bien el secado como método de conservación de los alimentos es sumamente importante también lo es encontrar las condiciones óptimas para realizar el mismo en el menor tiempo, con el menor gasto energético y con la menor influencia posible en la calidad nutricional del alimento, lo cual es planteado como el principal objetivo de la investigación.

Con el fin de conocer las condiciones óptimas de temperatura y tamaño se sometió el calabacín cortado en distintos espesores y diámetros a un proceso de secado por convección forzada a condiciones constantes de velocidad de aire de secado y de humedad absoluta y a condiciones variables de temperatura, lo que permitió determinar a través de la construcción de curvas de secado y velocidad de secado, conjuntamente con el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor por conducción, conducción lateral, convección y radiación, el coeficiente de transferencia de masa por convección y difusividad efectiva del agua presente en las rodajas de calabacín aplicando las ecuaciones convenientes para cada caso estudiadas en una previa revisión bibliográfica.

OBJETIVOS

Objetivo General:

Evaluar el comportamiento del proceso de secado a través de la cinética de deshidratación por el método de convección forzada en rodajas de calabacín (*Cucurbita pepo*) con la finalidad de conocer las condiciones óptimas de temperatura, espesor y diámetro requeridas para dicho proceso.

Objetivos Específicos:

- 1.- Determinar la curva de secado y la curva de velocidad de secado del calabacín respecto al tiempo a las temperaturas de 60, 70 y 80°C, espesores de 1, 5 y 10mm. y diámetros de 4, 4,5 y 5cm. a una velocidad de aire forzado y una humedad absoluta constantes.
- 2.- Determinar el efecto de las condiciones de temperatura del aire, espesor y diámetro de las rodajas de calabacín para el secado por convección forzada sobre el contenido de humedad final, actividad de agua y cantidad de minerales en calabacín en polvo.
- 3.- Seleccionar las condiciones óptimas de secado por convección forzada para la obtención de un polvo de calabacín con una humedad de equilibrio como indicativo de su estabilidad para su empaqueo y almacenamiento a temperatura ambiente.
- 4.- Determinar el coeficiente de transferencia de masa por convección en el período de velocidad de secado constante y la difusividad efectiva en el período de velocidad de secado decreciente identificando los procesos de transferencia de calor mediante el modelo de secado por circulación tangencial.

ANTECEDENTES

En la última década se han realizado diversos estudios respecto al secado o deshidratación de distintos vegetales, en los cuales independientemente del vegetal utilizado se construye la curva de secado, gráfica que representa la pérdida de humedad de un sólido en función del tiempo, a una determinada temperatura y velocidad de aire de secado (Treybal 1988).

En los estudios realizados por Carranza y Sánchez (2002), Chaves y colaboradores (2003), Maldonado y Pacheco (2003), y Kolawode y colaboradores (2006), sobre plátano y yuca, berenjena, brócoli y coliflor y ñame respectivamente, las curvas de secado fueron construidas a distintas temperaturas; considerándose en la mayoría de estos estudios otra variable, tal como el espesor de las muestras sometidas al proceso de deshidratación.

Además, Maldonado y Pacheco (2003) construyeron curvas de velocidad de secado, la que se expresa como el cociente de la masa de humedad evaporada entre el producto del tiempo de secado por la masa de sólido seco en función de dicho tiempo (Treybal 1988). Estas curvas se realizaron a diferentes temperaturas de aire de secado, las cuales para el vegetal en estudio presentaron un comportamiento distinto, apreciándose zonas de distinta velocidad de secado para las temperaturas más bajas (60 a 70°C).

Generalmente se supone que el mecanismo de migración de la cantidad de agua presente en un sólido durante el secado de alimentos se caracteriza por el fenómeno de difusión, tal como se describe en la segunda ley de Fick (Treybal 1988). En los estudios realizados por Kolawode y sus colaboradores (2006) y Chaves y sus colaboradores (2003), dichos investigadores indican que gracias a dicha ley es posible calcular el coeficiente de transferencia de masa por difusión dentro del sólido.

En su estudio Carranza y Sánchez (2003) plantean que “para el flujo de gas paralelo a una superficie y confinado entre los platos paralelos de un secador de platos, los coeficientes de transferencia de calor por convección y el coeficiente de

transferencia de masa en la fase gaseosa están relacionados con el número de Reynolds”.

De las investigaciones planteadas anteriormente se tomará una base para el desarrollo del procedimiento experimental y el análisis de los resultados como lo son la construcción de las curvas de secado, curvas de velocidad de secado y cálculos de los coeficientes de transferencia de masa y calor por convección, así como la difusividad efectiva para la humedad contenida en el sólido.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

SECADO

La característica esencial del proceso de secado es la eliminación de un líquido por conversión en vapor, que se separa del sólido. En la práctica la energía necesaria para evaporar el líquido es suministrada en forma de calor. A veces se usan otras formas de energía como campos de radiofrecuencia, trabajo mecánico o reacciones químicas; éstos son, sin embargo, casos especiales que no necesitan ser considerados en una exposición de tipo general (Nonhebel, 1979).

Para el caso de los alimentos, el secado es el método más antiguo de conservación de productos perecederos. La industria agroalimentaria utiliza la deshidratación como método de conservación de un gran número de productos, sin entrar en una relación exhaustiva se pueden citar: productos lácteos y derivados (leche en polvo instantánea, semiproductos en polvo para helados y postres, etc.), productos derivados de los cereales (alimentos para bebés con carnes y frutas, harinas con frutas y miel, pastas, etc.), productos obtenidos de café, té y cacao, productos vegetales (purés de patata, forrajes, frutas frescas, etc.), productos de origen animal (huevos, sopas y salsas deshidratadas, etc.). La imagen de “natural” que da el secado hace que se utilice para preparar productos de valor añadido, por ejemplo frutas y granos para cereales de desayuno y *snacks* (Abril y Casp, 2003).

El secado se fundamenta en la transferencia de la cantidad de agua que ocurrirá en el momento en que un sólido húmedo sea expuesto a una corriente continua de gas que contiene una presión parcial dada de vapor, entonces, el sólido perderá humedad por evaporación o ganará humedad del gas hasta que la presión de vapor de la humedad del sólido sea igual a la presión parcial de vapor del gas,

entonces se dice que para dicho punto el sólido y el gas están en equilibrio y el contenido de humedad del sólido se conoce como su contenido de humedad en el equilibrio en las condiciones predominantes, las cuales están referidas a la naturaleza de la humedad, la naturaleza del sólido y la temperatura (Treybal, 1988).

EFEECTO DE LA NATURALEZA DEL SÓLIDO

Dependiendo de la solubilidad del sólido respecto al agua éstos se pueden dividir en dos tipos, solubles e insolubles, y para cada uno la naturaleza del secado varía.

SÓLIDOS SOLUBLES

Se dice que se está en la presencia de un sólido soluble cuando éste al ser expuesto a una corriente de gases cuya presión de vapor es menor que la de la solución saturada del sólido generalmente muestra contenidos insignificantes de humedad en el equilibrio (Treybal, 1988).

En la figura N°1 se puede observar un ejemplo de un sólido soluble, como lo es el nitrato de sodio, esto se evidencia en la zona por debajo de la presión parcial de saturación (aproximadamente 17,7 mmHg) ubicada entre el punto A y el origen de la gráfica, donde el contenido de humedad del sólido pasa a ser extremadamente bajo; también cabe mencionar que, por el contrario, soluciones más diluidas ejercerán presiones parciales mayores.

SÓLIDOS INSOLUBLES

Contrariamente a los sólidos solubles, para que el contenido de humedad en los sólidos insolubles sea considerado despreciable, estos deben ser expuestos a una corriente de aire prácticamente seca, esto se debe a que la mayoría de este tipo de sólidos son materiales celulares y esponjosos, especialmente los de origen vegetal, lo

cual queda evidenciado en la figura N°2, donde se muestran algunas relaciones típicas de humedad en el equilibrio para varios sólidos insolubles salvo el caso del óxido de zinc. Si se tomase como ejemplo la madera, se observa la humedad contenida en la misma hasta una concentración correspondiente al punto B de la curva, humedad que ejerce una presión de vapor menor que la del agua pura, puede ser humedad contenida dentro de las paredes de la estructura de la planta, humedad en suave combinación química con el material celulósico, humedad presente como una solución líquida de porciones solubles del sólido y como una solución de sólidos, humedad dentro de pequeños capilares y huecos en todo el sólido o bien absorbida sobre la superficie, esta humedad se conoce como agua ligada. Si se expone a aire saturado, la madera puede tener un contenido en humedad mayor de 0.3 kg/kg sólido seco (punto B); la humedad que excede a la que se encuentra en B, agua no ligada, ejerce la presión de vapor del agua pura a la temperatura predominante (Treybal, 1988).

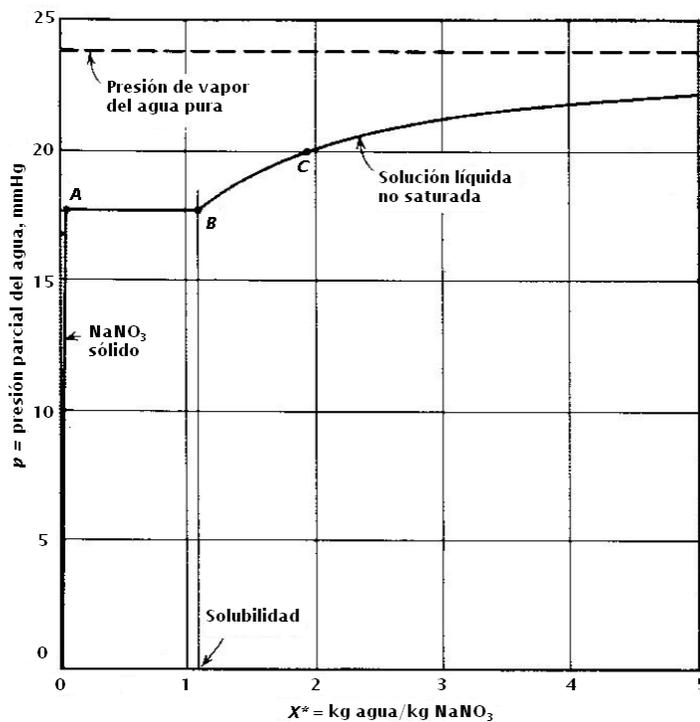


Figura N°1: Contenido de humedad en el equilibrio del nitrato de sodio a 25°C (Treybal, 1988).

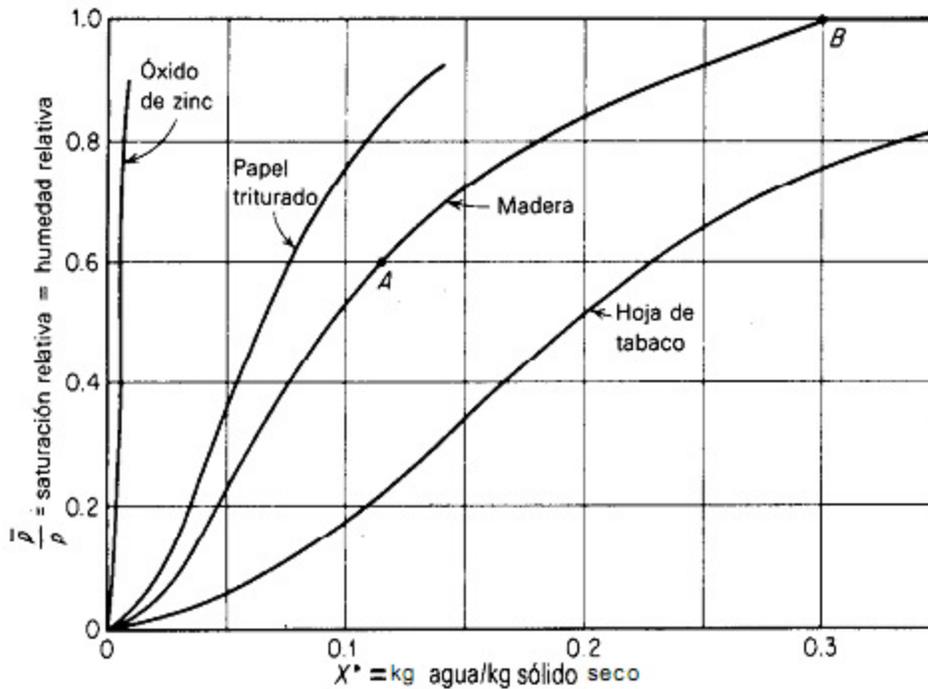


Figura N°2: Contenido de agua en el equilibrio de algunos sólidos comunes a aproximadamente 25°C (Treybal, 1988).

En la figura N°3 quedan mejor evidenciados los tipos de humedad enunciados anteriormente, conjuntamente con otros cuya definición se presenta a continuación:

Contenido de humedad, en base húmeda: El contenido de humedad de un sólido o solución generalmente se describe en función del porcentaje en peso de humedad; a menos que se indique otra cosa, se sobreentiende que está expresado en base húmeda, es decir, (kg humedad/kg sólido húmedo)100.

Contenido de humedad, base seca.: Se expresa como kg humedad/kg sólido seco = X. Porcentaje de humedad, base seca = 100X.

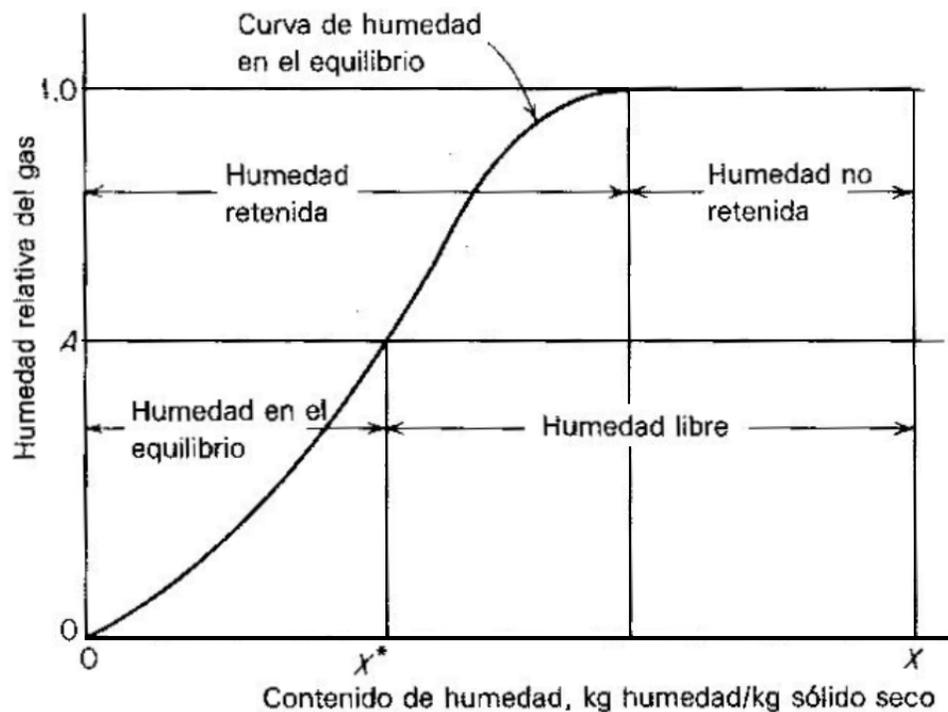
Humedad en el equilibrio (X^*): Es el contenido de humedad de una sustancia que está en el equilibrio con una presión parcial dada del vapor.

Humedad ligada: Se refiere a la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio menor que la del líquido puro a la misma temperatura.

Humedad no ligada: Se refiere a la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio igual a la del líquido puro a la misma temperatura.

Humedad libre: La humedad libre es la humedad contenida por una sustancia en exceso de la humedad en el equilibrio: $X - X^*$. Sólo puede evaporarse la humedad libre; el contenido de humedad libre de un sólido depende de la concentración del vapor en el gas.

En función a lo anteriormente expuesto se puede establecer que el tipo de sólido que se utilizará en el experimento es un sólido insoluble por la naturaleza vegetal del calabacín.



FiguraNº3: Tipos de humedad (Treybal, 1988).

OPERACIONES DE SECADO

Existen tres parámetros que determinan el tipo de operación que se utilizará para el secado, éstos son:

1. Método de operación: existen dos métodos de operación, por carga o continuo; el equipo por carga se opera cíclicamente en condiciones de estado no estacionario, el secador se carga con la sustancia, que permanece en el equipo hasta que se seca, entonces, el secador se descarga y se vuelve a cargar con un nuevo lote; en cambio los secadores continuos operan por lo general en estado estacionario.
2. Método de obtención del calor necesario para la evaporación de la humedad: para esta clasificación se pueden encontrar dos tipos de secadores, directos e indirectos, en los primeros el calor se obtiene completamente por contacto directo entre la sustancia con el gas caliente en el cual tiene lugar la evaporación, en cambio para los secadores indirectos, el calor se obtiene independientemente del gas utilizado para acarrear la humedad evaporada, se pueden considerar como ejemplos de este caso la obtención de calor por conducción a través de una pared metálica o contacto con la sustancia o la exposición de dicha sustancia a radiación infrarroja.
3. Naturaleza de la sustancia que se va a secar: la sustancia a secar puede ser un sólido rígido, un material flexible, un sólido granular, una pasta ligera o inclusive una solución. Dependiendo de la forma física de la sustancia varían los métodos para el manejo de la misma, lo cual posee una alta influencia sobre el tipo de secador que se ha de utilizar.

Para el presente estudio se realizará un secado por lotes en donde la sustancia a secar estará en contacto directo con el aire, la forma física del material a utilizar no tendrá una mayor influencia en el tipo de secador a utilizar.

Se pueden encontrar varios tipos de secadores directos por lotes, entre ellos el más simple es el secador de platos, también llamado secador de gabinetes, de

compartimiento o de anaqueles, el cual es, precisamente, el secador que se va a utilizar en este estudio. Este secador, como se indica en la figura N°4, consta de un gabinete en donde se encuentran contenidos platos o bandejas móviles sobre los cuales se coloca el sólido a secar; una vez cargado, el gabinete se cierra y se introduce aire calentado con una resistencia eléctrica por entre los platos con el fin de evaporar y arrastrar la humedad de la sustancia (secado por circulación cruzada). Cuando el sólido alcanza el grado de sequedad querido, el gabinete se abre y los platos se reemplazan por un nuevo lote (Treybal, 1988).

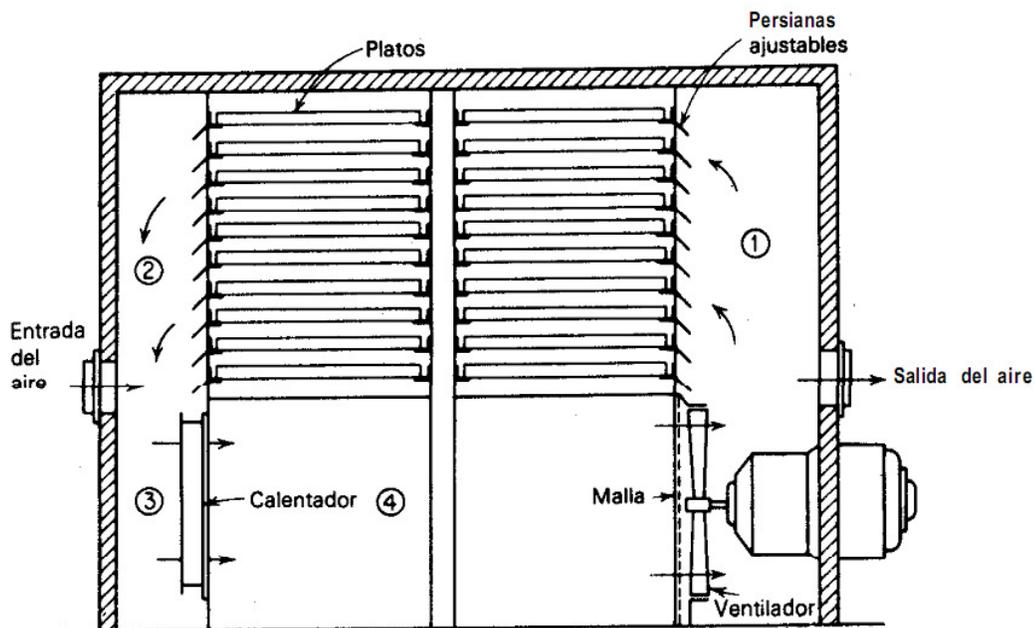


Figura N°4: Secador de platos típico (Treybal, 1988).

Una desventaja importante en el uso de este tipo de secador es la falta de uniformidad del contenido de humedad final en el producto secado que se extrae de distintas partes del secador, este efecto se tomará en cuenta al momento de realizar los distintos ensayos, de manera que no sea causa de posibles errores en las mediciones de humedad.

CURVAS DE SECADO

Se conoce como curva de secado a la representación gráfica del contenido de humedad en una sustancia, sometida a un proceso de secado, como función del tiempo, dicha curva es específica para cada sustancia y depende también de la temperatura y la humedad relativa del gas utilizado para secar el alimento.

Al momento de realizar el ensayo se deben tomar ciertas precauciones para que los datos sean de máxima utilidad, si es posible las condiciones de secado deben parecerse lo más posible a las que se creen serán las condiciones predominantes en la operación a gran escala, entre estas precauciones se encuentran:

1. La muestra no debe ser muy pequeña.
2. La muestra debe soportarse de forma similar sobre un plato o estructura.
3. La muestra debe tener la misma relación de superficie que se seca a la que no se seca.
4. El aire debe tener la misma temperatura, humedad y velocidad (misma dirección y magnitud con respecto a la muestra).
5. La muestra debe sujetarse a condiciones similares de transferencia de calor por radiación.

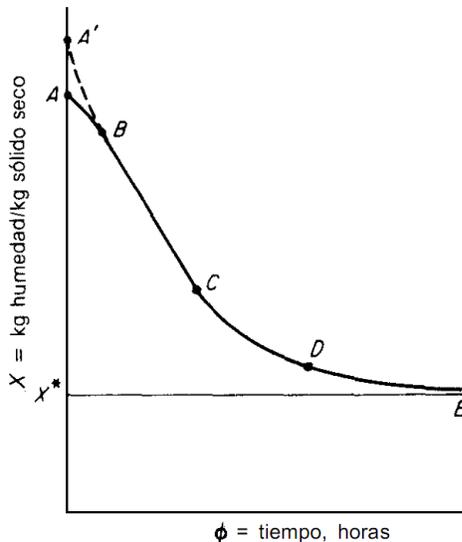


Figura N°5: Secado por lotes, condiciones de secado constantes (Treybal, 1988).

En la figura N°5 se puede observar el comportamiento general de una curva de secado por carga a condiciones (humedad relativa, temperatura y velocidad del aire) constantes.

CURVAS DE VELOCIDAD DE SECADO

A partir de la curva de secado es posible construir una curva de velocidad de secado, esto es posible si los datos de cantidad de humedad en función del tiempo se llevan a rapidez de secado, expresadas como N y se grafican contra el contenido de humedad como se indica en la figura N°6; es posible obtener el valor de N a partir de la siguiente ecuación:

$$N = -S_s \cdot \frac{\Delta X}{A \cdot \Delta \theta} \quad (\text{Ec. 1})$$

Generalmente las curvas de rapidez de secado se encuentran divididas en dos zonas principales, un periodo de rapidez de secado constante y otro de rapidez decreciente, lo cual queda evidenciado en la figura N°6.

Al momento del análisis de la curva de rapidez de secado se debe tomar en cuenta que si el sólido se encuentra inicialmente muy húmedo, la superficie estará cubierta con una película delgada de líquido, la cual se supondrá como humedad total no ligada y al dicho sólido ser expuesto a una corriente de aire relativamente seco, la evaporación tendrá lugar desde la superficie, por lo tanto, la rapidez a la cual se evapora la humedad puede describirse en función de un coeficiente de transferencia de masa del gas (k_Y) y de la diferencia de humedad entre el gas en la superficie líquida (Y_s) y en la corriente principal (Y), lo cual conlleva a la ecuación 2.

$$N_c = k_Y \cdot (Y_s - Y) \quad (\text{Ec. 2})$$

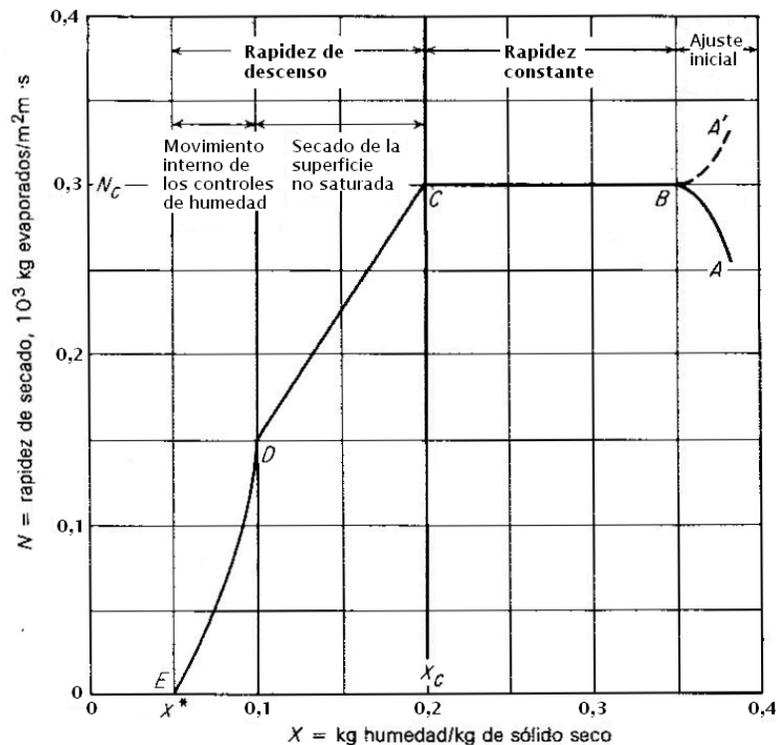


Figura N°6: Curva típica de rapidez de secado, condiciones de secado constantes (Treybal, 1988).

Se puede prever que el coeficiente k_Y , permanecerá constante siempre y cuando no cambien la velocidad y dirección del flujo de gas sobre la superficie. La humedad Y_S es la humedad de saturación a la temperatura superficial del líquido t_S ; por lo tanto, dependerá de esta temperatura. Puesto que la evaporación de humedad absorbe calor latente, la superficie líquida llega y permanece en una temperatura en el equilibrio tal que la rapidez del flujo de calor en el entorno de la superficie es exactamente igual a la rapidez de absorción de calor. Por lo tanto, Y_S permanece constante. Los capilares e intersticios del sólido, llenos de líquido, pueden llevar líquido hasta la superficie tan rápidamente como el líquido se evapora en ésta. Puesto que además Y permanece constante en las condiciones constantes de secado, la rapidez de evaporación debe permanecer constante en el valor N , como se muestra en la figura N°5 y N°6 entre el punto B y C. Al principio, la superficie sólida y la líquida

están generalmente más frías que la temperatura superficial final t_s ; la rapidez de evaporación aumenta cuando la temperatura superficial aumenta hasta su valor final durante el periodo AB sobre estas curvas. En forma alternativa, la temperatura en el equilibrio t_s puede ser menor que el valor inicial, lo cual dará lugar a una curva A'B mientras ocurre el ajuste inicial. Generalmente el periodo inicial es tan corto que se ignora en el análisis subsecuente de los tiempos de secado.

Al completar periodo de velocidad de secado constante, el sólido alcanza un valor de humedad conocido como contenido crítico de humedad (X_C), correspondiente al punto C en la figura N°6, a partir de este punto el valor de N comienza a descender, a pesar de que la rapidez de secado por unidad de superficie húmeda permanezca constante, esto es debido a que el valor de la superficie húmeda del sólido se considera constante aún cuando no lo es como consecuencia de la formación de puntos secos en la misma. Esto da lugar al primer periodo de rapidez decreciente, el periodo de secado superficial no saturado, comprendido entre los puntos C y D.

A partir del punto D se denota una disminución aún más drástica de la velocidad de secado, debido a que la superficie del sólido se ha secado completamente y la rapidez con la cual se puede mover la humedad dentro del sólido es el paso controlante. Esta rapidez presenta como principal fuerza impulsora los gradientes de concentraciones de agua entre las partes más profundas del sólido y la superficie, a su vez, al disminuir la concentración a medida que avanza el proceso, lógicamente, la rapidez del movimiento interno de la velocidad también disminuirá. El secado continuará hasta alcanzar el punto E, donde el contenido de humedad del sólido ha caído hasta el valor en el equilibrio (X^*) para la humedad del aire predominante, como consecuencia, el proceso de secado se detiene.

MECANISMO DEL SECADO POR CARGA PARA CIRCULACIÓN TANGENCIAL

Período de rapidez de secado constante

Este período se caracteriza por la evaporación superficial de la humedad no ligada, por lo que la rapidez de secado se establece mediante un balance de las necesidades caloríficas para la evaporación y la rapidez con la cual el calor alcanza la superficie. En la figura N°7 se presenta la sección de un material que se está secando por una corriente de gas, donde z_s es el espesor del sólido colocado sobre un plato cuyo espesor es z_M ; ambos están sometidos a una corriente de gas de temperatura y humedad T_G y Y respectivamente con una velocidad de masa G . La evaporación de humedad tiene lugar desde la superficie superior (A), que está a una temperatura T_s . La superficie que se está secando recibe calor por convección a partir de la corriente gaseosa, por conducción a través del sólido y por radiación directa de una superficie caliente. Los conceptos de los diferentes tipos de transferencia de calor se presentan a continuación.

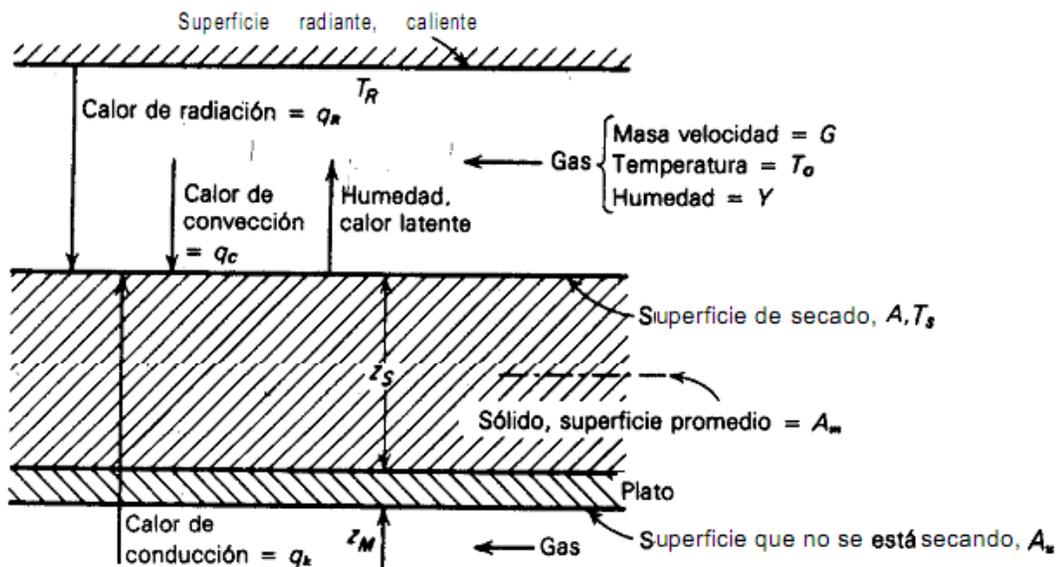


Figura N°7: Secado a rapidez constante (Treybal, 1988).

Conducción (q_k): transferencia de energía de las partículas más energéticas a las menos energéticas de una sustancia debido a las interacciones entre las mismas.

Convección (q_c): la transferencia de energía está compuesta por dos mecanismos, el primero debido al movimiento molecular aleatorio, y el segundo debido al movimiento global o macroscópico del fluido, asociado con el hecho de que en cualquier instante, grandes números de moléculas se mueven de forma colectiva o como agregados.

Radiación (q_R): Energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura finita (Incropera, 1999).

Es posible determinar la rapidez de evaporación y la temperatura de secado mediante un balance de energía, considerando q como el calor total que llega a la superficie, entonces:

$$q = q_C + q_R + q_k \quad (\text{Ec. 3})$$

Si se desprecia el calor necesario para sobrecalentar la humedad evaporada hasta la temperatura del gas y se considera sólo el calor latente de evaporación (λ_S), entonces el flux de evaporación (N_C) y el calor total que llega a la superficie están relacionados de la manera que se muestra a continuación:

$$N_C \cdot \lambda_S = q \quad (\text{Ec. 4})$$

El calor recibido por convección en la superficie está controlado por el coeficiente de transferencia de calor por convección (h_c),

$$q_C = h_c \cdot (T_G - T_S) \quad (\text{Ec. 5})$$

El calor recibido por radiación puede calcularse aplicando la ecuación de transferencia de calor entre dos cuerpos negros, haciendo empleo de la constante de Stefan-Boltzmann (σ), a su vez este calor puede expresarse en función de un coeficiente de transferencia de calor por radiación (h_r),

$$q_R = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_R^4 - T_S^4) = h_R(T_R - T_S) \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde ε es la emisividad de la superficie que se está secando, T_R y T_S son las temperaturas absolutas de las superficies radiantes y de la que se está secando respectivamente, mientras que el valor de la constante de Stefan-Boltzmann para unidades en sistema internacional es de $5,729 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ (Incropera, 1999).

El calor recibido por convección-conducción a puede calcularse de la siguiente manera:

$$q_k = U_k(T_G - T_S) \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde

$$U_k = \frac{1}{(1/h_c) \cdot (A/A_u) + (z_M/k_M) \cdot (A/A_u) + (z_S/k_S) \cdot (A/A_m)} \quad (\text{Ec. 8})$$

En la ecuación presentada anteriormente se puede identificar a h_c como el coeficiente de convección para el plato, el cual puede tomarse generalmente como el coeficiente que para la superficie que se está secando, k_M y k_S son las conductividades térmicas del material del plato y del sólido que se está secando, A_u y A_m son los valores de la superficie que no se está secando y el área promedio del sólido, respectivamente.

A su vez, para efectos de este estudio se incluyó el cálculo de un coeficiente de transferencia de calor por conducción lateral (U_{kl}) que se expresa como:

$$U_{kl} = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_c} \cdot \frac{A}{A_L}\right) + \left(\frac{z_S}{2k_C} \cdot \frac{A}{A_L}\right)} \quad (\text{Ec. 9})$$

Debido a que se supone que las rodajas reciben calor por el lado del cilindro.

La rapidez de secado también se puede calcular combinando las ecuaciones planteadas anteriormente, lo cual da como resultado:

$$N_C = \frac{q}{\lambda_S} = \frac{(h_C + U_k + U_{kl}) \cdot (T_G - T_S) + h_R \cdot (T_R - T_S)}{\lambda_S} = k_Y(Y_S - Y) \quad (\text{Ec. 10})$$

Para poder utilizar esta ecuación es necesario conocer la temperatura superficial, ésta puede obtenerse rearrreglando la ecuación de la siguiente manera:

$$\frac{(Y_S - Y) \cdot \lambda_S}{h_C/k_Y} = \left(1 + \frac{U_k + U_{kl}}{h_C}\right) \cdot (T_G - T_S) + \frac{h_R}{h_C} \cdot (T_R - T_S) \quad (\text{Ec. 11})$$

Puesto que Y_S es la humedad de saturación del gas correspondiente a la temperatura de saturación T_S , estas cantidad pueden obtenerse resolviendo la Ec. 11 conjuntamente con la curva de humedad a saturación en una carta psicrométrica. Por otra parte es necesario conocer la relación h_C/k_Y , la cual es aplicable al flujo de gases en la temperatura de bulbo húmedo mediante la Ec. 12, sin embargo puede utilizarse para los fines presentes.

$$\frac{h_C}{k_Y \cdot C_S} = \left(\frac{Sc}{Pr}\right)^{0,567} = Le^{0,567} \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde:

Le: número de Lewis.

Pr: es el número de Prandtl, el cual se define como la relación entre la difusividad molecular de la cantidad de movimiento (ν) y la difusividad molecular térmica (α).

$$Pr \equiv \frac{v}{\alpha} = \frac{\mu \cdot Cp}{k} \quad (\text{Ec. 13})$$

Sc: es el número de Schmith, el cual se define como la relación entre la difusividad molecular de cantidad de movimiento (v) y la difusividad del vapor de agua en la mezcla vapor de agua-aire (D_{AB}).

$$Sc \equiv \frac{v}{D_{AB}} = \frac{\mu}{\rho \cdot D_{AB}} \quad (\text{Ec. 14})$$

Cs: es el calor húmedo que se requiere para aumentar la temperatura de la masa unitaria del gas y su vapor acompañante 1 °C.

Como una manera para simplificar los cálculos es posible establecer que, para sistemas aire-vapor de agua, la relación $h_G/k_Y \cdot C_S$ es aproximadamente igual a 1, ésta relación se conoce como la relación de Lewis (Ec. 12 para Le=1).

Si los efectos de la conducción a través del sólido y de radiación están ausentes, la temperatura superficial pasa a ser la temperatura de bulbo húmedo del gas y la Ec. 11 se reduce a la del termómetro de bulbo húmedo, la cual se presenta a continuación:

$$(T_G - T_S) = \frac{(Y_S - Y) \cdot \lambda_S}{h_C/k_Y} \quad (\text{Ec. 15})$$

Para el caso en estudio donde se colocan bandejas de material unos encima de los otros, la mayor parte del sólido sólo recibirá radiación del fondo de la bandeja que se encuentre inmediatamente encima del mismo, y a menos que las temperaturas sean muy elevadas no haría falta apreciar la transferencia de calor por radiación y por conducción.

En el caso específico de flujo de gas paralelo a una superficie y confinado entre platos, como es el caso de un secador de bandejas, y en caso del sistema

presentar un valor de número de Reynolds (Re) entre 2600 y 22000, los coeficientes de transferencia de calor y masa por convección se pueden describir mediante:

$$j_H = \frac{h_c}{C_p \cdot G} \cdot Pr^{2/3} = j_D = \frac{k_Y}{G_S} \cdot Sc^{2/3} = 0,11 \cdot Re^{-0,29} \quad (\text{Ec. 16})$$

Donde:

$$Re = \frac{d_e \cdot G}{\mu} \quad (\text{Ec. 17})$$

$$d_e = \frac{4 \cdot (\text{sección transversal para el flujo de aire})}{\text{perímetro}} \quad (\text{Ec. 18})$$

Despejando h_c de la Ec. 16 se obtiene:

$$h_c = \frac{0,11 \cdot C_p \cdot G}{Pr^{2/3} \cdot Re^{0,29}} \quad (\text{Ec. 19})$$

Para el caso en que los efectos de transferencia de calor por conducción y radiación no sean considerados, el coeficiente de transferencia de masa por convección se puede calcular despejándolo de la ecuación N°15:

$$k_y = \frac{h_c \cdot (T_G - T_S)}{(Y_S - Y) \cdot \lambda_S} \quad (\text{Ec. 20})$$

Donde la temperatura superficial (t_s) es igual a la temperatura de bulbo húmedo y la humedad superficial (Y_S) se relaciona con la temperatura mediante la siguiente ecuación:

$$Y_S = \frac{P^V}{P - P^V} \cdot \frac{M_{\text{Agua}}}{M_{\text{Aire}}} \quad (\text{Ec. 21})$$

Mientras que la presión de vapor P^V puede ser calculada empleando la ecuación de Antoine, que para el caso en específico del agua es la siguiente:

$$P^V = P_C \cdot e^{6,53241 - \frac{3985,439}{(T_S - 38,9974)}} \quad (\text{Ec. 22})$$

Sustituyendo las ecuaciones 21 y 22 en 20 se obtiene:

$$k_y = \frac{h_C \cdot (T_G - T_S)}{\left(\frac{P_C \cdot e^{6,53241 - \frac{3985,439}{(T_S - 38,9974)}}}{P - P_C \cdot e^{6,53241 - \frac{3985,439}{(T_S - 38,9974)}}} \cdot \frac{M_{\text{Agua}}}{M_{\text{Aire}}} - Y \right) \cdot \lambda_S} \quad (\text{Ec. 23})$$

Al la incidencia de la radiación o la conducción no ser consideradas despreciable en el proceso de secado, k_y puede ser calculado a partir de la ecuación N°11, para ello es necesario calcular T_S , la cual se obtiene a través de la siguiente ecuación (suponiendo que T_R es igual a T_G):

$$T_S = T_G - \frac{N_C \cdot \lambda_S}{(h_C + U_k + U_{kl} + h_R)} \quad (\text{Ec. 24})$$

Luego de obtenido T_S se calcula Y_S mediante la ecuación 21 y posteriormente se obtiene k_y de la ecuación 2, ya que el valor de N_C es conocido.

El valor de k_y también puede ser calculado sin necesidad de conocer N_C , despejándolo de la ecuación N°12 y suponiendo $Le=1$.

$$k_{Y(teo)} = \frac{h_C}{C_S} \quad (\text{Ec. 25})$$

Donde:

$$C_S = 1055 + 1884 \cdot Y \quad (\text{Ec. 26})$$

Sustituyendo la ecuación 26 en la ecuación 25 se obtiene:

$$k_{Y(teo)} = \frac{h_C}{1055 + 1884 \cdot Y} \quad (\text{Ec. 27})$$

Factor de relación de los coeficientes de transferencia de masa por convección del calabacín (f_C) para el ajuste de los valores obtenidos teóricamente para el caso específico del calabacín.

Como para esta experiencia es posible determinar el valor de la cantidad de agua evaporada en la superficie del calabacín función del tiempo (N), también se puede realizar una relación entre dicho valor y otro obtenido teóricamente para las mismas condiciones de secado establecidas. El para fines prácticos llamado factor de relación del calabacín (f_C) será el cociente entre el coeficiente de transferencia de masa por convección calculado a partir de los datos experimentales (k_y) entre el coeficiente de transferencia de masa por convección calculado teóricamente ($k_{y(teo)}$), lo que resulta en la siguiente ecuación:

$$f_C = \frac{k_y}{k_{y(teo)}} \quad (\text{Ec. 28})$$

El conocimiento de f_C permitirá una mayor aproximación para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección obtenido teóricamente con el valor real al ser incluido como un nuevo coeficiente en la ecuación 12 para $Le=1$.

$$\frac{h_C}{k_{y(teo)} \cdot C_S} = f_C \quad (\text{Ec. 29})$$

Movimiento de la humedad dentro del sólido.

Al ocurrir la evaporación de la humedad en la superficie del sólido, a su vez debe existir un movimiento de agua desde la parte interior hacia la superficie del mismo, por lo que existen diversas teorías expuestas para explicar el movimiento de la humedad en el interior del sólido, las cuales dependen de la naturaleza de dicho fenómeno. En la figura N°6 es posible observar dos zonas de velocidad decreciente, la primera entre los puntos C y D donde predomina el mecanismo de evaporación de la superficie no saturado, y la segunda, entre D y E donde el mecanismo predominante es la difusión de la humedad a través del sólido.

Secado de la superficie no saturada.

Durante este periodo, la rapidez de secado (N) generalmente variará en forma lineal con el contenido de la humedad (X). Es sabido que el mecanismo de evaporación durante este periodo de rapidez decreciente, por lo que, los efectos de variables como la temperatura, humedad y velocidad del gas y espesor del sólido, son los mismos que en el secado a rapidez constante.

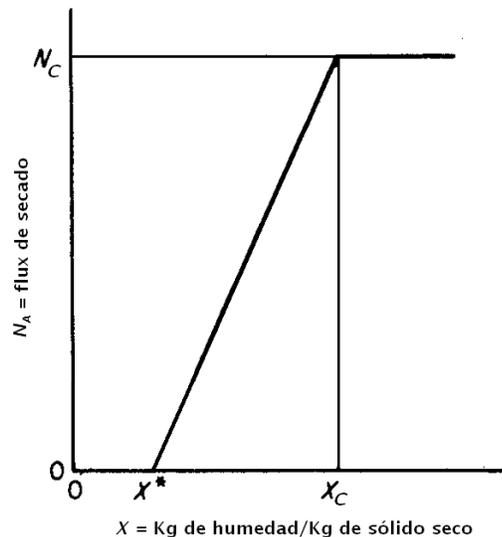


Figura N°8: Rapidez decreciente lineal (Treybal, 1988).

En algunos casos este periodo puede constituir el total del secado durante el periodo de rapidez decreciente y originar una curva como se presenta en la figura N°8.

De presentarse el caso enunciado anteriormente se aplica la siguiente ecuación:

$$-\frac{dX}{d\theta} = \frac{k_Y \cdot A \cdot (X - X^*) \cdot (Y_S - Y)}{S_S \cdot (X_C - X^*)} \quad (\text{Ec. 30})$$

Si se iguala $S_S = z_S \cdot A \cdot \rho_S$ y se deja que $k_Y = f(G)$, entonces se obtiene:

$$\begin{aligned} -\frac{dX}{d\theta} &= \frac{f(G) \cdot A \cdot (X - X^*) \cdot (Y_S - Y)}{z_S \cdot A \cdot (X_C - X^*)} \\ &= \frac{\beta \cdot f(G) \cdot (X - X^*) \cdot (Y_S - Y)}{z_S} \end{aligned} \quad (\text{Ec. 31})$$

En donde β es constante. Algunas veces esta expresión se utiliza como una descripción empírica de las rapidezces de secado en estos casos. En forma alternativa, si el tiempo se define como el tiempo en el que el contenido de humedad es X , la naturaleza del periodo decreciente de rapidez se puede describir mediante:

$$\text{Ln} \left(\frac{X - X^*}{X_C - X^*} \right) = \frac{-N_C \cdot \theta}{z_S \cdot \rho_S \cdot (X_C - X^*)} \quad (\text{Ec. 32})$$

La ecuación anterior sugiere que los datos del periodo decreciente de esta naturaleza, al ser graficados, darán una línea recta (línea a) sobre las coordenadas semilogarítmicas de la figura N°9. Si las pruebas de secado se hacen en las mismas condiciones para muestras de distinto espesor, de manera tal que el calor sólo se aplique al sólido a través de la superficie que se está secando, las pendientes de estas líneas en las gráficas resultaran proporcionales a $-1/z_S$, por lo tanto, el tiempo de

secado entre contenidos fijos de humedad es directamente proporcional al espesor del sólido (Treybal, 1988).

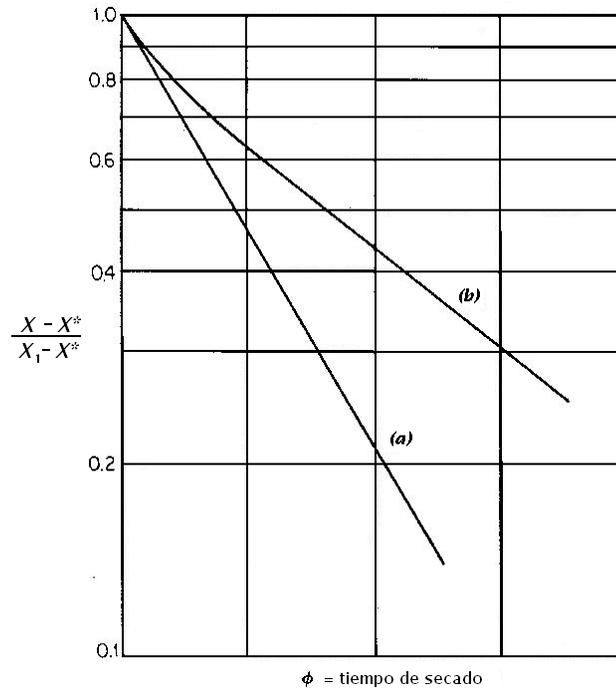


Figura N°9: Tratamiento empírico de los datos de rapidez decreciente (Treybal, 1988).

Difusión del líquido.

La difusión de la humedad líquida puede derivarse de los gradientes de concentración el interior del sólido, donde la concentración es alta, y la superficie, donde es baja; dichos gradientes se fijan durante el secado de la superficie, por lo que la difusividad de la humedad decrece con rapidez al decrecer el contenido de la humedad.

El período en el cual la difusión es el mecanismo controlante del proceso de secado ocurre posteriormente al secado de la superficie no saturada, luego de que la humedad de dicha superficie alcanza las condiciones de equilibrio de humedad con el gas. Es posible que, si el secado inicial a rapidez constante es muy rápido, no aparezca el período de evaporación superficial no saturada y contrario a lo observado en la figura N°8 se obtendría una gráfica del tipo de la figura N°10, donde el periodo

de velocidad decreciente controlado por difusión comienza inmediatamente después que termine el periodo de rapidez constante. Cabe mencionar que si por el contrario es posible encontrar ambas naturalezas de secado a rapidez decreciente, la gráfica tendrá una forma como la presentada en la figura N°6.

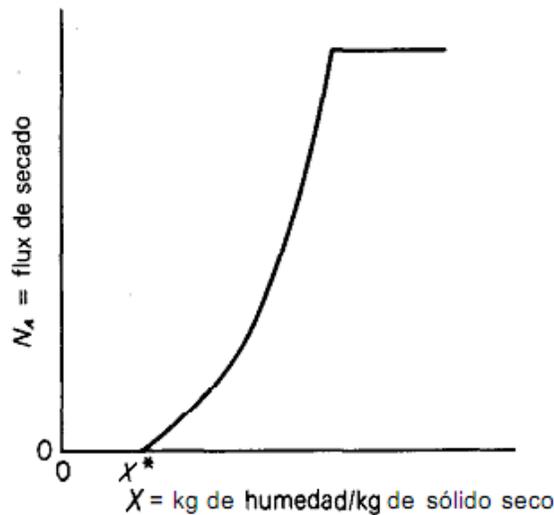


Figura N°10: Periodo de rapidez de decreciente controlado por la difusión (Treybal, 1988).

Para la representación matemática de este sistema se utilizarán las ecuaciones de difusión en estado no estacionario, específicamente para el caso de difusión desde una placa con los lados sellados.

Si se considera el caso de una placa de espesor $2a$, con los cuatro lados sellados, de forma tal que la difusión sólo puede suceder desde y hacia las caras planas paralelas y se supone que inicialmente la concentración de soluto a través de la placa es uniforme (C_{A0}) y dicho soluto difundirá hacia el exterior de la placa indefinidamente hasta que la concentración alcance un valor ($C_{A\infty}$), entonces es posible aplicar la ecuación integrada de la segunda ley de Fick.

$$E_a = \frac{C_{A\theta} - C_{A\infty}}{C_{A0} - C_{A\infty}} = f\left(\frac{D\theta}{a^2}\right) = \quad (\text{Ec. 33})$$

$$= \frac{8}{\pi^2} \cdot \left(e^{-D \cdot \theta \cdot \pi^2 / 4 \cdot a^2} + \frac{1}{9} e^{-9 \cdot D \cdot \theta \cdot \pi^2 / 4 \cdot a^2} + \frac{1}{25} e^{-25 \cdot D \cdot \theta \cdot \pi^2 / 4 \cdot a^2} + \dots \right)$$

Como una manera alternativa para realizar el cálculo de la difusividad efectiva (D) se puede utilizar la relación entre E_a y el valor de $D\theta/a^2$ expresada en la Figura N°11 para el caso de placas planas (losa).

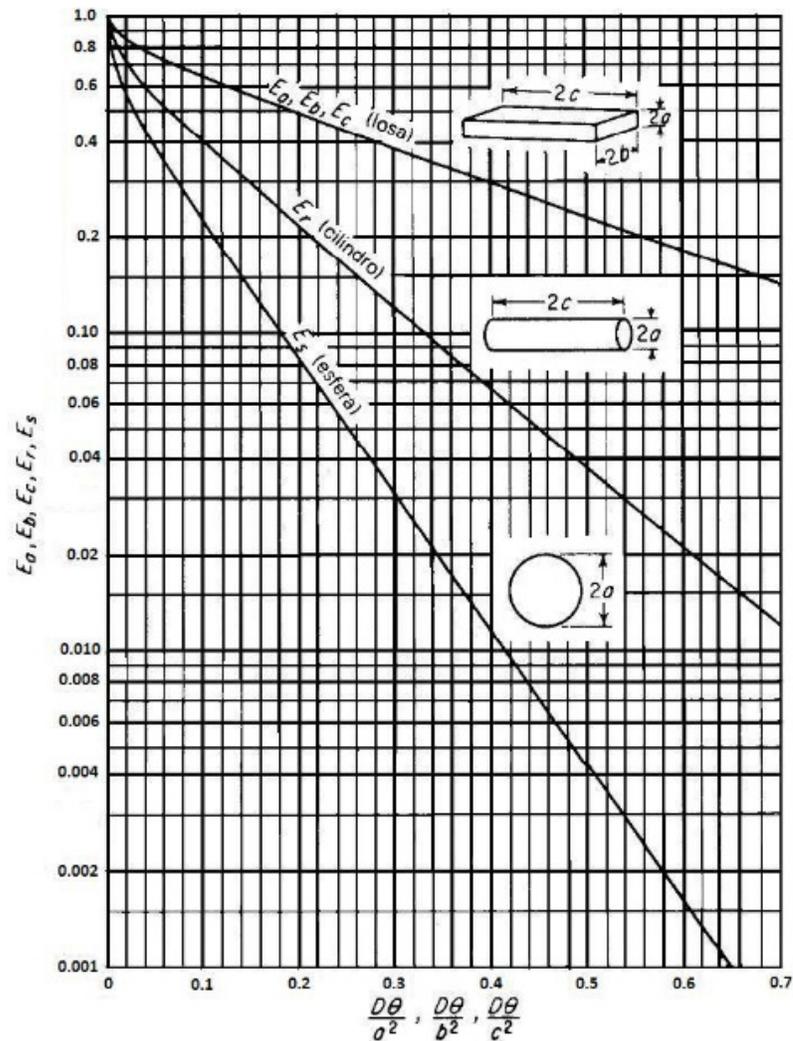


Figura N°11: Difusión en estado no estacionario (Treybal, 1988).

Para formas sólidas en las cuales la difusión sucede desde una cara en lugar que desde dos caras opuestas, las funciones se calculan como si el espesor fuese el doble del valor real (Welty, 2002). Cabe destacar que a pesar que la forma utilizada para secar el calabacín es cilíndrica (rodajas), la transferencia de masa ocurre desde una de las caras circulares y no desde el cuerpo del cilindro, por lo que el modelo que se asemeja más a esta experiencia es el de placas planas.

CALABACÍN

El calabacín, cuyo nombre científico es *Cucurbita pepo*, forma parte de la familia de las cucurbitáceas, conjuntamente con otras hortalizas como los son el melón, la patilla y el pepino (Salazar, 1995).

El fruto presenta generalmente forma cilíndrica aunque también se puede encontrar de manera más redondeada y su color puede variar de verde claro a verde oscuro.

Básicamente los calabacines presentan propiedades alimentarias parecidas al resto de las calabazas. Es sabido que aquellos con mejor sabor y textura son los que todavía no han crecido mucho, al ser recogidos muy tiernos, su contenido en agua es mayor, y debido a este alto porcentaje de agua y por el hecho de poseer menos hidratos de carbono presentan menos calorías, dado que su contenido en azúcares es menor al tratarse de un fruto poco desarrollado. Sin embargo, su contenido en minerales y vitaminas es tan elevado como en el resto de calabazas, incluso supera en contenido de potasio y vitamina C a muchas variedades, además presentan muchos antioxidantes en forma de betacarotenos. Esto hace que sea considerado un alimento ligero, ideal en las dietas para adelgazar o eliminar líquidos del organismo; así como también remineralizar el mismo debido a su alto contenido de minerales.

A continuación se presenta la composición química de una porción de 100 gramos de calabacín.

| Componente | Cantidad |
|---------------------------|-----------------|
| Agua | 95, 2 g |
| Energía | 15 Kcal |
| Grasa | 0,07 g |
| Proteína | 1,03 g |
| Hidratos de carbono | 2, 90 g |
| Fibra | 1,2 g |
| Potasio | 248 mg |
| Fósforo | 32 mg |
| Hierro | 0, 42 mg |
| Sodio | 5 mg |
| Magnesio | 22 mg |
| Calcio | 15 mg |
| Cobre | 0, 057 mg |
| Cinc | 0, 20 mg |
| Manganeso | 0, 127 µg |
| Vitamina C | 9 mg |
| Vitamina A | 340 UI |
| Vitamina B1 (Tiamina) | 0,070 mg |
| Vitamina B2 (Riboflavina) | 0, 030 mg |
| Vitamina B3 (Niacina) | 0, 400 mg |
| Vitamina B6 (Piridoxina) | 0, 089 mg |
| Vitamina E | 0, 12 mg |
| Ácido fólico | 22 µg |

Tabla N°1: Composición química de la pulpa de los calabacines crudos por cada 100gr. (botanical-online.com)

Desde un punto de vista culinario, los calabacines no son tan utilizables como las calabazas y su uso se suele ceñir a la fabricación de cremas, rellenos, ensaladas o

guisos. Entre los principales países que consumen muchos calabacines se encuentra Gran Bretaña y México. (botanical-online)

Los calabacines deben comerse una vez recogidos puesto que, al no disponer de una corteza dura, aguantan muy poco y se pudren con facilidad, sobre lo cual recae la principal importancia de someter dicho fruto a un proceso de conservación como el secado, además de otras ventajas como lo son la reducción de los costos de transporte y almacenamiento, su utilización en forma de polvo para preparar sopas y cremas o como ingrediente para elaborar otros productos, como croquetas, panquecas, entre otros, los cuales pueden formar parte de regímenes dietéticos especiales debido al alto contenido de vitaminas y minerales respecto al bajo contenido energético.

ACTIVIDAD DE AGUA

El término actividad de agua se define teóricamente como:

$$a_w = \frac{\bar{P}}{P^V} \quad (\text{Ec. 34})$$

Donde \bar{P} es la presión de vapor de un alimento y P^V la presión de vapor del agua pura a la misma temperatura.

A pesar de que el término de actividad de agua carece de rigurosidad en el aspecto fisicoquímico, es una referencia como base para la descripción de las interrelaciones del agua con los alimentos. (Coultate, 2001).

Los datos de la tabla N°2 demuestran la importancia del conocimiento de la actividad de agua como factor en el control del crecimiento microbiano, garantizado su inhibición si el valor es menor a 0,6.

| Microorganismo | Actividad de agua (a_w) |
|-----------------------|---|
| Bacterias normales | 0,91 |
| Levaduras normales | 0,88 |
| Hongos normales | 0,80 |
| Bacterias halófilas | 0,75 |
| Hongos xerófilos | 0,65 |
| Levaduras osmófilas | 0,60 |

Tabla N°2: Actividad de agua mínima para el crecimiento microbiano (Coulter, 2001).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA GENERAL

Para el desarrollo del presente trabajo se realizaron un conjunto de pruebas experimentales en el Laboratorio de Bioquímica de Alimentos del Instituto de Química y Tecnología de la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela empleando muestras de distintos cortes de calabacín obtenidos en supermercados adyacentes a la zona de trabajo. Para la obtención de resultados fueron realizados una serie de pasos enunciados a continuación en el siguiente diagrama de bloques posteriormente esquematizado:

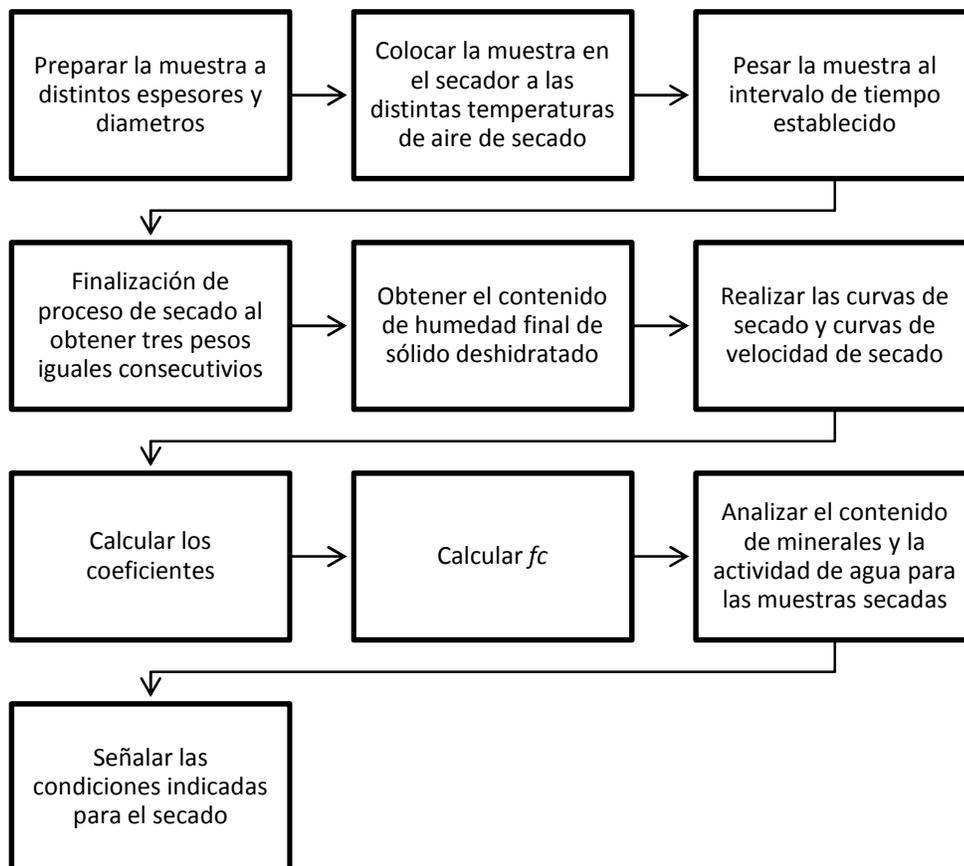


Figura N°12: Diagrama de bloques del proceso.

- 1.- Se cortó el calabacín en distintos tamaños, el espesor de los cortes varió entre 1 mm., 5 mm y 10 mm., mientras que el diámetro fue de 4 cm, 4,5 cm y 5 cm, obteniendo 9 tipos de cortes en total.
- 2.- Las rebanadas se colocaron en bandejas de aluminio previamente pesadas, a razón de 6 rodajas por bandeja. Para cada combinación de espesor-diámetro se utilizaron 4 bandejas, salvo para el caso del espesor de 1mm., para el cual se utilizó una bandeja adicional con el fin de asegurar suficiente cantidad de muestra para los exámenes posteriores.
- 3.- Las pruebas de secado se realizaron a tres temperaturas diferentes, 60, 70 y 80°C a una velocidad de aire de secado de 1,5 m/s, las muestras se pesaron en intervalos de 30 minutos hasta que el peso alcanzó tres medidas iguales.
- 4.- Con el fin de obtener los valores de humedad de equilibrio para cada prueba, o lo que es lo mismo, el contenido de humedad del sólido deshidratado, se utilizó la metodología descrita por la AOAC (1995), la cual consiste en pesar 1g de muestra previamente molida, para someterla a deshidratación en estufa con circulación de aire a una temperatura de 100°C. La diferencia entre el peso inicial y el peso final, alcanzado para tres medidas de peso iguales, determinará el valor de humedad en el equilibrio para la experiencia de secado.
- 5.- Se midió la actividad de agua sobre las muestras molidas luego de finalizado el proceso de secado utilizando un medidor de actividad de agua, modelo pawkit, de la marca Decagon, así como también se realizó un análisis de tejido vegetal para determinar la cantidad final de los minerales que se encuentran en mayor proporción, los cuales para el caso del calabacín corresponderían al potasio y al fósforo.
- 6.- Con los valores obtenidos de la experiencia se realizaron las curvas de secado para las distintas condiciones, graficando los valores de humedad en función del tiempo.

- 7.- Se construyeron las curvas de velocidad de secado a partir de la derivada de la humedad como función del tiempo correspondiente a la curva de secado, dicha función se halló utilizando la herramienta Microsoft Office Excel 2007®.
- 8.- En base al análisis de las curvas de secado, velocidad de secado y los valores de humedad en el equilibrio, actividad de agua y contenido de minerales para las muestras secadas, se determinó las condiciones óptimas de temperatura de aire de secado, espesor y diámetro de las rodajas de calabacín.
- 9.- Anterior al cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección se realizó una prueba exploratoria para determinar la influencia de la radiación y la conducción en el proceso, y si estos mecanismos de transferencia de calor deben ser considerado en el estudio. En dicha experiencia realizada a las condiciones de temperatura más altas (80°C), donde las bandejas (superficie radiante) alcanzaran la mayor temperatura, se determinó que la radiación y la conducción no deben consideradas despreciables, ya que cada uno de los coeficiente de transferencia de calor resultaron ser mayores a 5% del valor del coeficiente de transferencia de calor por convección.
- 10.- Tomando en cuenta la transferencia de calor por radiación y por conducción la temperatura superficial será determinada mediante la ecuación N°11, suponiendo T_R igual a T_G .
- 11.- Conocidos los coeficientes de transferencia de calor y el valor de la velocidad de evaporación de a humedad para el periodo de velocidad de secado constante (N_C), se calculó el coeficiente de transferencia de masa por convección, aplicando la ecuación N°2.
- 12.- Se calculó un coeficiente de transferencia de masa por convección teórico mediante el empleo de la ecuación N°27 y posteriormente se utilizó la ecuación N°28 para obtener el factor de relación para el calabacín.

13.- Una vez conocidos los valores de humedad crítica y humedad de equilibrio, conjuntamente con el tiempo entre dichos valores, fue posible determinar la difusividad efectiva aplicando la ecuación N°33 o la figura N°11.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1.- Curvas de secado y velocidad de secado por el método de convección forzada en calabacín.

1.1.- Curvas de secado.

De la figura N°13 a la 15 se observan las curvas de secado para un espesor de 1mm a las temperaturas de 60, 70 y 80°C, en dichas curvas se observa un disminución de la humedad en base seca (Kg agua/Kg sólido seco) en función del tiempo la cual se acentúa a medida que aumenta la temperatura y no depende del diámetro utilizada, lo cual coincide con lo expresado en el marco teórico.

En la Figura N°13 se muestra que los valores iniciales de contenido de humedad para las rodajas de calabacín secadas a las temperaturas de 70 y 80°C fueron superiores a las rodajas secadas a 60°C, sin embargo luego de transcurridos 30 minutos los valores son prácticamente iguales entre sí, mientras que luego de una hora la humedad de las rodajas secadas a 70 y 80°C representa únicamente un tercio de aquellas que fueron secadas a 60°C, además se puede apreciar que prácticamente no existen diferencias entre los procesos de secado a 70 y 80°C, salvo el tiempo que requiere cada uno en alcanzar el valor de peso constante.

El comportamiento de las curvas de secado que se presentan en la Figura N°14 fue similar al mostrado en la Figura N°13, ya que los valores iniciales de contenido de humedad para las rodajas secadas a 70 y 80°C fueron superiores a los de 60°C y a su vez, al cabo de media hora dichos valores son aproximados. Sin embargo, en este caso es posible observar una ligera diferencia entre los valores de humedad obtenidos para el secado a 70 y 80°C.

Para el caso de la Figura N°15 el valor inicial para el contenido de humedad de las rodajas secadas a 70°C es, de forma apreciable, superior al de aquellas secadas a 60 y 80°C, por lo cual se necesitó de una hora para que dicho valor pasara a ser menor que aquel que presentaron las rodajas secadas a 60°C. A su vez se puede alegar que las diferencias entre la curva de secado a 70 y 80°C pueden ser atribuidas a las diferencias iniciales existentes entre sus correspondientes valores de humedad.

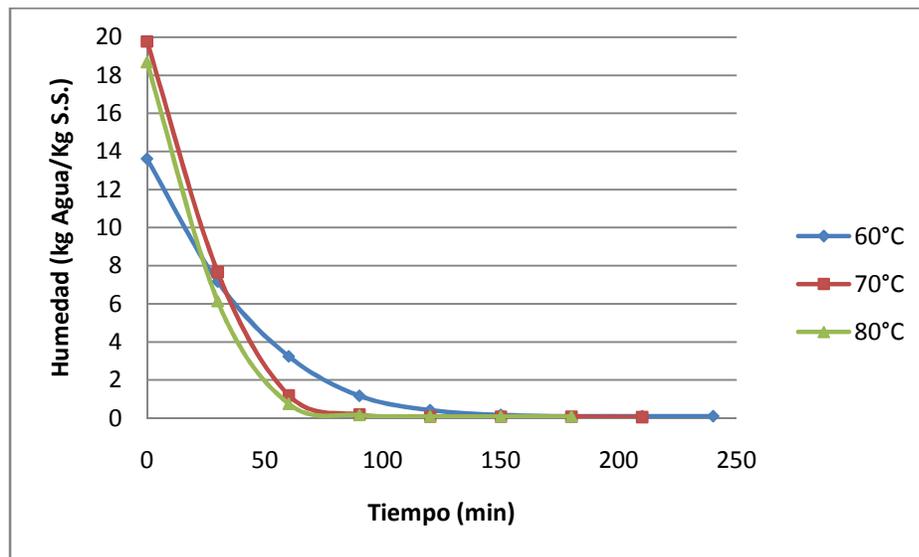


Figura N°13: Curvas de secado de calabacín a las temperaturas de 60, 70 y 80°C para un espesor de 1mm y un diámetro de 4cm.

Las curvas de secado construidas a para un espesor de 5mm para las distintas condiciones de temperatura y diámetro pueden ser observadas de la figura N°16 a la 18, en ellas se evidencia el mismo patrón de las curvas para 1mm de espesor donde el contenido de agua disminuye a medida que pasa el tiempo, salvo que para estos casos las diferencias entre el secado a las distintas temperaturas es más marcadas, sobretodo para el caso del aire de secado a 60°C, a su vez nuevamente se evidencia que el diámetro utilizado no influye prácticamente en el proceso de secado.

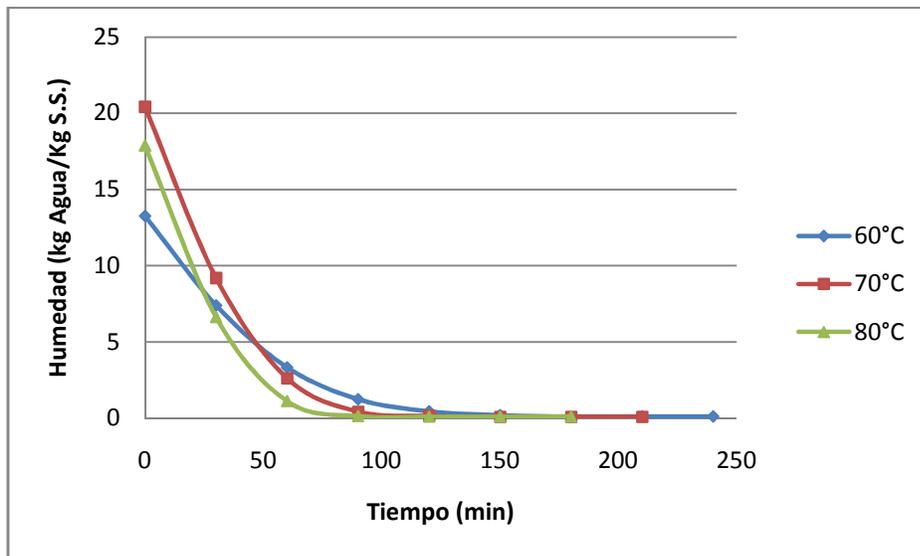


Figura N°14: Curvas de secado de calabacín a las temperaturas de 60, 70 y 80°C para un espesor de 1mm y un diámetro de 4,5cm.

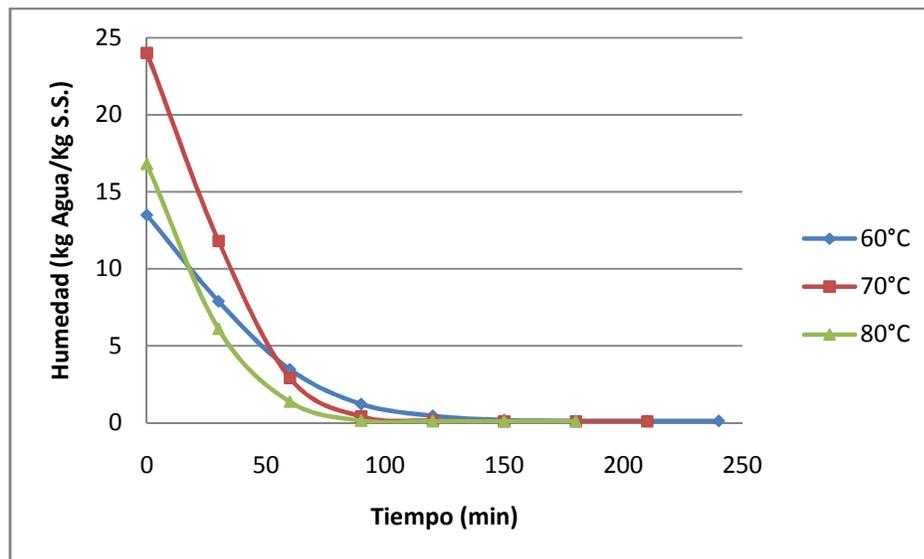


Figura N°15: Curvas de secado de calabacín a las temperaturas de 60, 70 y 80°C para un espesor de 1mm y un diámetro de 5cm.

En la Figura N°16 es posible observar una similitud en los valores iniciales de humedad que presentaron las rodajas secadas a 60 y 80°C, los cuales contrastan con el valor inicial de humedad para las rodajas secadas a 70°C, la cual se ve superada por la

curva de 60°C al cabo de 90 minutos. A pesar de la diferencia inicial en el contenido de humedad para las curvas de 70 y 80°C, ambas alcanzan valores similares luego de 3 horas, no obstante para el secado a 70°C se requiere una hora adicional respecto al secado a 80°C para alcanzar peso constante.

En la Figura N°17 se puede notar la similitud existente entre las curvas de secado obtenidas a 70 y 80°C, teniendo ambas curvas prácticamente el mismo comportamiento, sólo se observan diferencias en el tiempo necesario para alcanzar el punto de humedad de equilibrio, o lo que es lo mismo, tres valores iguales consecutivos en la medida de la humedad. Por otra parte, a pesar de iniciarse a valores inferiores de humedad, el secado a 60°C necesita mucho más tiempo que el requerido a 70 y 80°C, los cuales fueron de 90 y 150 minutos respectivamente.

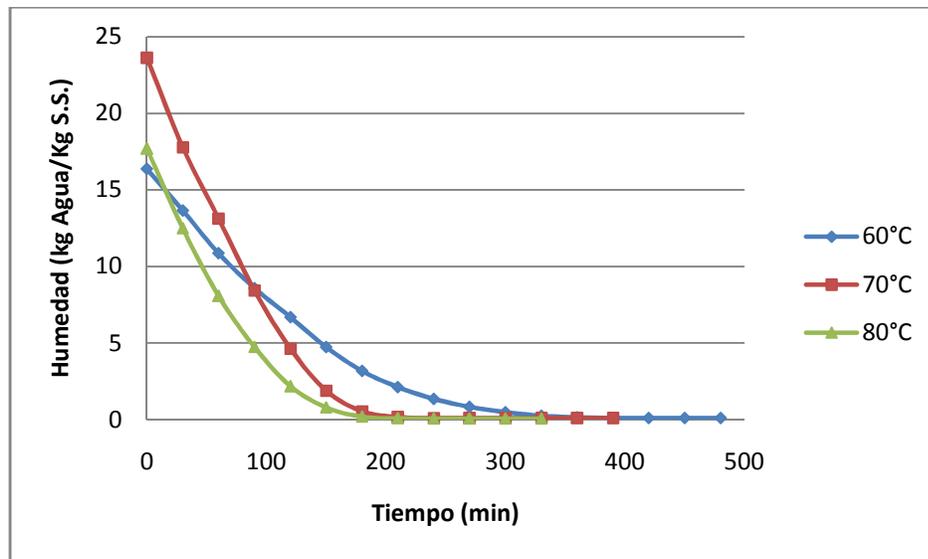


Figura N°16: Curvas de secado de calabacín a las temperaturas de 60, 70 y 80°C para un espesor de 5mm y un diámetro de 4cm.

En la Figura N°18 se observa un valor de humedad inicial para las rodajas secadas a 70°C, superior al determinado en aquellas secadas a 60 y 80°C. Sin embargo, al cabo de una hora el valor de humedad para el secado a 60°C se hace mayor al obtenido para 70°C, una vez transcurrido este tiempo las curvas de secado

para 70 y 80°C comienzan a tener un comportamiento similar, aunque la primera tarda una hora más en alcanzar tres valores de humedad constante consecutivos respecto a las curva a 80°C, la cual a su vez difiere en dos horas y media menos respecto a la curva de secado a 60°C.

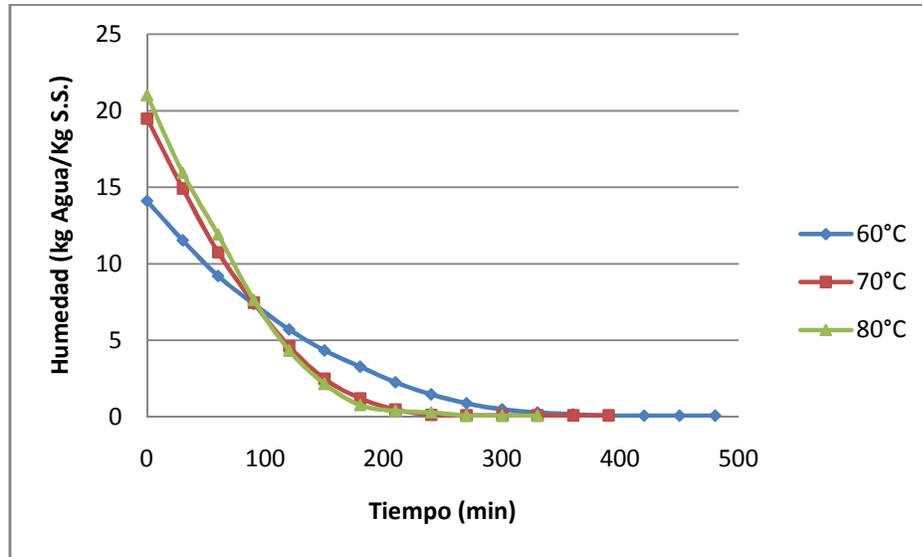


Figura N°17: Curvas de secado de calabacín a las temperaturas de 60, 70 y 80°C para un espesor de 5mm y un diámetro de 4,5cm.

En las figuras N°19 a la N°21 se observan las curvas de secado construidas para un espesor de rodajas de calabacín de 10mm, en dichas curvas se vuelve a evidenciar la tendencia presentada en el secado para 1mm y 5mm de espesor, donde al aumentar la temperatura disminuye el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio y también que el diámetro no posee influencia sobre el proceso de secado, estos resultados son lógicos y concuerdan con lo que se podía esperar luego de la revisión bibliográfica.

En el caso de la Figura N°19 se puede observar que las 3 curvas de secado se inician en un valor de humedad similar; posteriormente presentan un comportamiento teóricamente estimable, ya que la curva de secado a 80°C siempre muestra valores inferiores a los de la curva de secado a 70°C, alcanzando la humedad de equilibrio

antes que ésta. A su vez la curva de secado a 70°C exhibe un comportamiento similar al presentado por la curva de secado a 60°C.

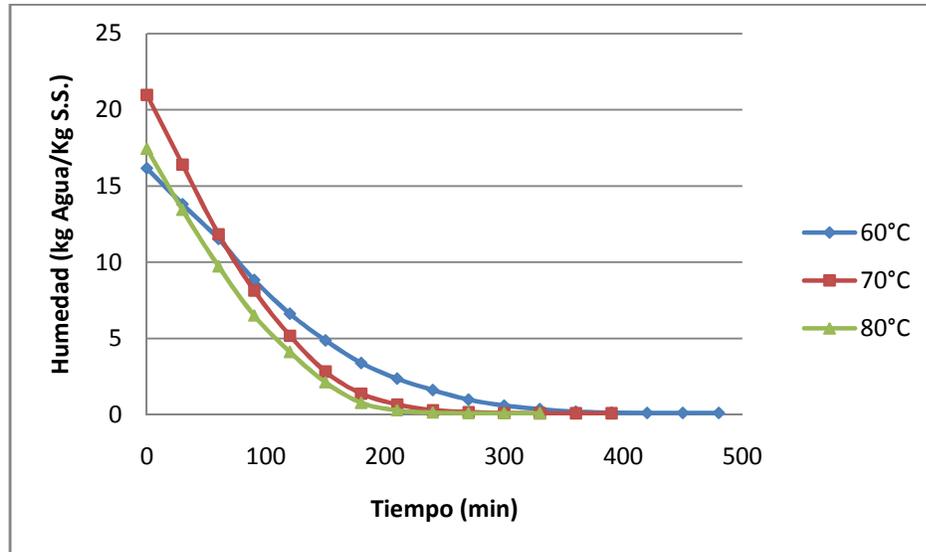


Figura N°18: Curvas de secado de calabacín a las temperaturas de 60, 70 y 80°C para un espesor de 5mm y un diámetro de 5cm.

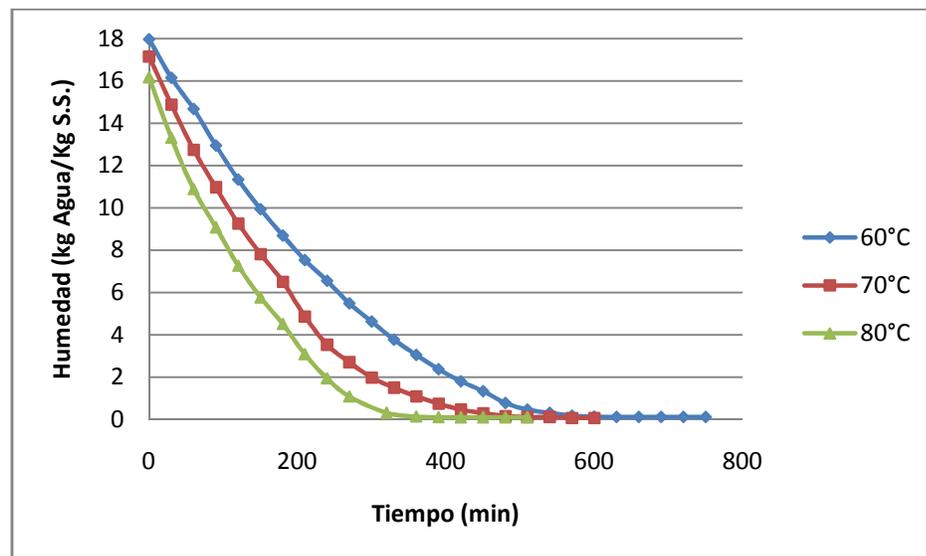


Figura N°19: Curvas de secado de calabacín a las temperaturas de 60, 70 y 80°C para un espesor de 10mm y un diámetro de 4cm.

En el gráfico presentado en la Figura N°20 se puede observar que a pesar de que las rodajas secadas a 80°C presentaron una humedad inicial mayor a aquellas secadas a 70°C, las primeras alcanzan las condiciones de humedad de equilibrio 90 minutos antes, y al ser comparadas con la curva de secado a 60°C, estas últimas requieren de 4 horas más antes de alcanzar dichas condiciones.

En el caso de la Figura N°21 se puede apreciar que las tres curvas de secado poseen prácticamente el mismo valor de humedad inicial. La curva de velocidad de secado a 60°C siempre posee valores superiores de humedad a la curva de 70°C, y ésta a su vez valores superiores a la de 80°C; además, se observa que el secado a 60°C requiere de once horas y media, a 70°C diez horas y a 80°C ocho horas y media, lo que supone un comportamiento estimable teóricamente.

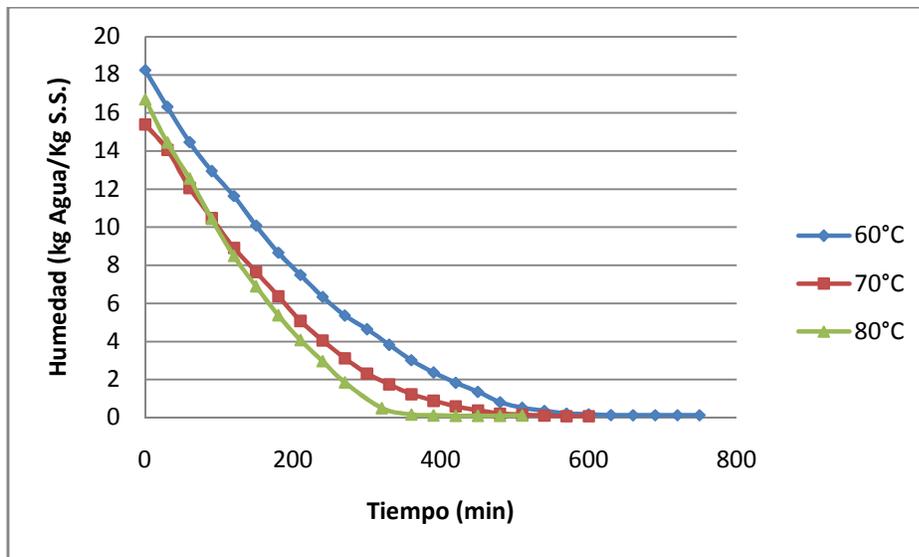


Figura N°20: Curvas de secado de calabacín a las temperaturas de 60, 70 y 80°C para un espesor de 10mm y un diámetro de 4,5cm.

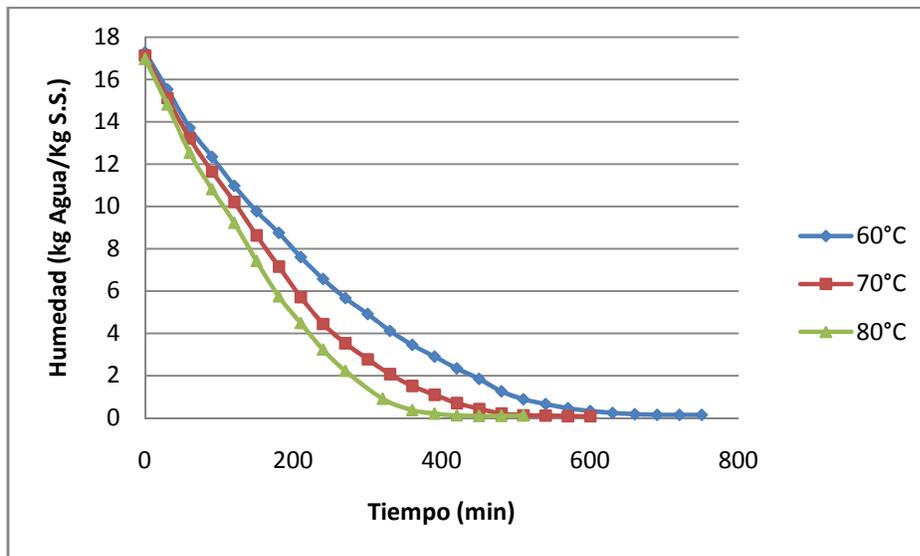


Figura N°21: Curvas de secado de calabacín a las temperaturas de 60, 70 y 80°C para un espesor de 10mm y un diámetro de 5cm.

Como se esperaba al aumentar el espesor aumenta de manera notable el tiempo necesario para alcanzar las condiciones de humedad de equilibrio en las rodajas, dicha tendencia se demuestra de una forma más explícita en las figuras de la N°31 a la 39 en la sección de Apéndice B.

1.2.- Curvas de velocidad de secado.

De la figura N°22 a la N°24 se observan las curvas de velocidad de secado construidas para las temperaturas de 60, 70 y 80°C para un espesor fijo de 1mm y diámetros que varían entre 4, 4,5 y 5cm. Dichas curvas se caracterizan por carecen de un periodo de velocidad de secado constante, lo cual concuerda con la teoría, ya que se supone que al las rodajas de calabacín tener un espesor tan bajo disminuyen su volumen y a su vez la cantidad de agua total presente en las mismas, por lo que el sólido pierde la capacidad de reponer el agua evaporada en la superficie, o si lo hace este efecto es imperceptible y como consecuencia todo el proceso de secado pasa a ser dominado totalmente por la difusión del agua en el interior del sólido

En la gráfica presentada en la Figura N°22 se puede apreciar que los valores de velocidad de secado para las temperaturas de 60 y 70°C son similares y difieren únicamente cuando ambos se aproximan al mínimo debido que para dicho momento la humedad relativa para las temperaturas mayores disminuye, por lo tanto aumenta el gradiente de concentración de agua entre el sólido y el aire, sin embargo para 80°C la curva presenta valores superiores a las otras dos en todo su recorrido.

En la Figura N°23 se puede apreciar que los valores de la curva de velocidad de secado en función de la concentración para 60°C son ligeramente inferiores a los de la curva para el secado a 70°C y éstos, a su vez, inferiores a los de la curva de 80°C, debido, a como se expreso anteriormente al aumentar la temperatura del aire de secado aumenta la humedad relativa del aire y por consiguiente aumenta el gradiente de concentración de agua entre el aire y el calabacín.

Para el caso de la Figura N°24, en la curva de velocidad de secado para 70°C se puede observar una tendencia hacia un comportamiento de velocidad de secado constante al inicio de la misma (la curva se lee de derecha a izquierda) ocasionado por un alto contenido de humedad inicial, como es posible observar en la respectiva curva de secado representada en la Figura N°15, posteriormente el recorrido de dicha curva de velocidad de secado pasa a ser similar al de la curva para 60°C. Es posible apreciar también, que la curva para el secado a 80°C presenta valores superiores en todo su recorrido en comparación a las dos curvas ya mencionadas.

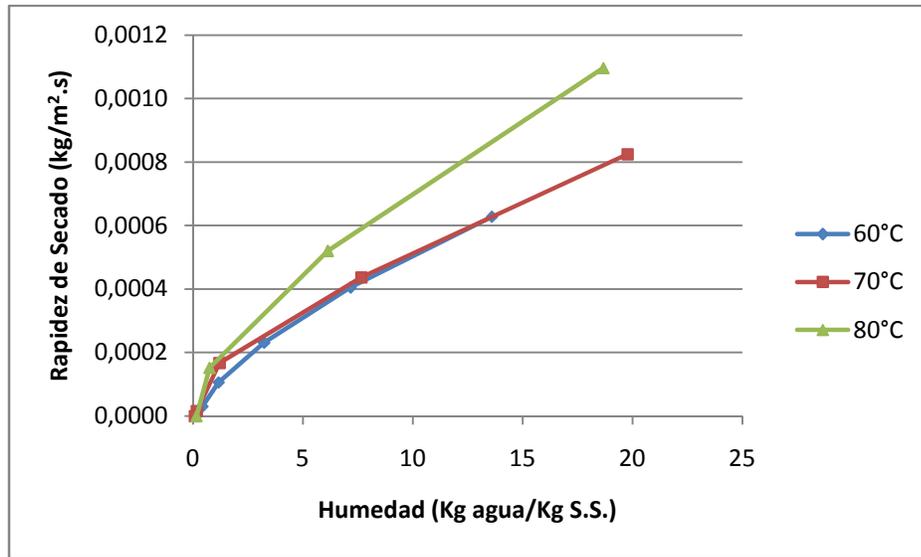


Figura N°22: Curvas de velocidad de secado de calabacín a las temperaturas de 60, 70 y 80°C, para un espesor de 1mm y un diámetro de 4cm.

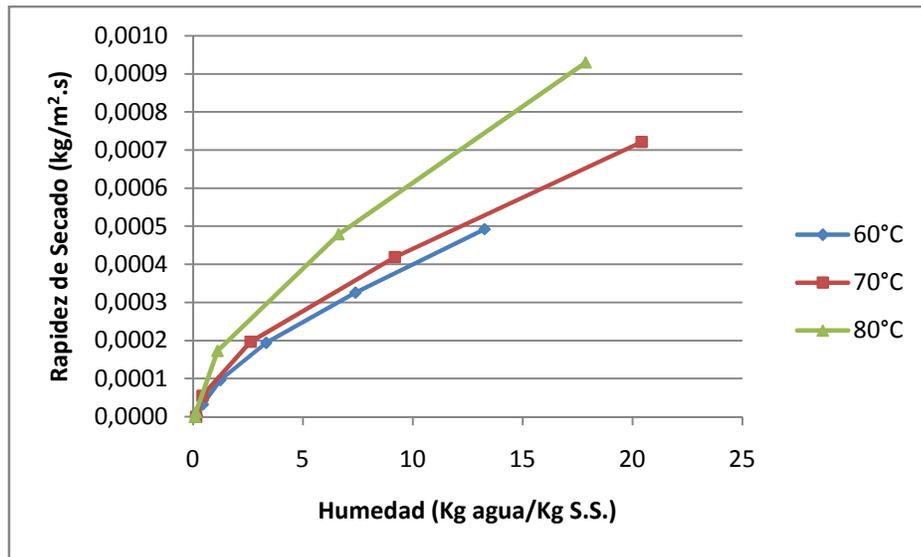


Figura N°23: Curvas de velocidad de secado de calabacín a las temperaturas de 60, 70 y 80°C, para un espesor de 1mm y un diámetro de 4,5cm.

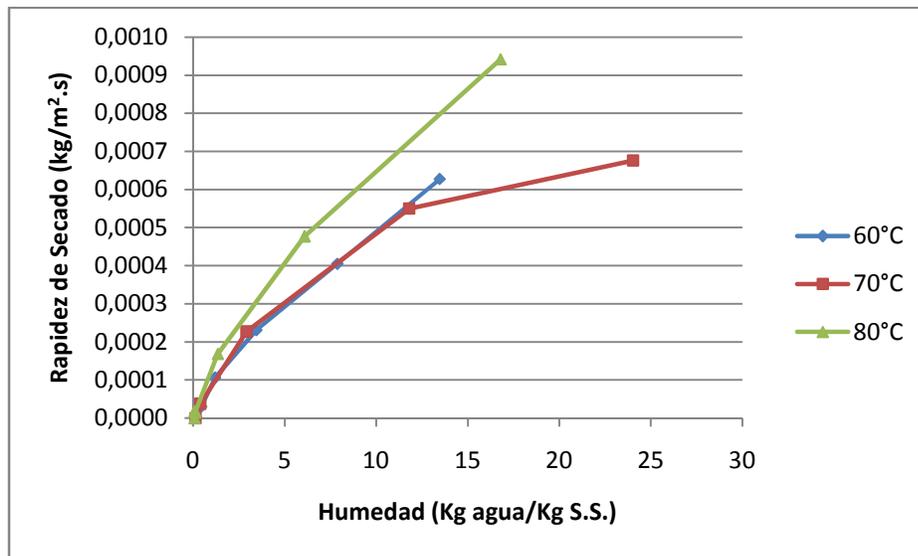


Figura N°24: Curvas de velocidad de secado de calabacín a las temperaturas de 60, 70 y 80°C, para un espesor de 1mm y un diámetro de 5cm.

En las curvas de velocidad de secado presentes en las figuras de la N°25 a la 27, construidas para las temperaturas de aire de secado a 60, 70 y 80°C se nota la diferencia del secado a 80°C para los casos de un diámetro de 4 (Figura 25) y 5cm (Figura 27) con respecto a los demás, ya que si bien para esta temperatura no se observa el período de secado a velocidad constante, para las otras dos sí, esto se fundamenta en que la cantidad de calor transferida es mayor a medida que aumenta el gradiente de temperatura entre el aire y la superficie de secado, evaporando el agua superficial más rápido de lo que la difusión interna en el sólido permite reponer, ocasionando así que para el secado a 80°C la curva presente un comportamiento similar a las reportadas para 1mm de espesor, donde el proceso de secado está dominado por la difusión interna del agua en el sólido; caso contrario ocurre con el secado a 60 y 70°C y para las tres temperaturas en la figura N°26, donde se evidencia un período de secado a velocidad constante dominado por la transferencia de masa por convección, justificando la aparición de este período para el caso de 80°C debido al mayor contenido de humedad inicial respecto a los otros 2 (4 y 5cm), conjuntamente con un período de velocidad de secado decreciente, que como se

expreso anteriormente presenta la difusión interna del agua en el sólido como mecanismo controlante del proceso de secado.

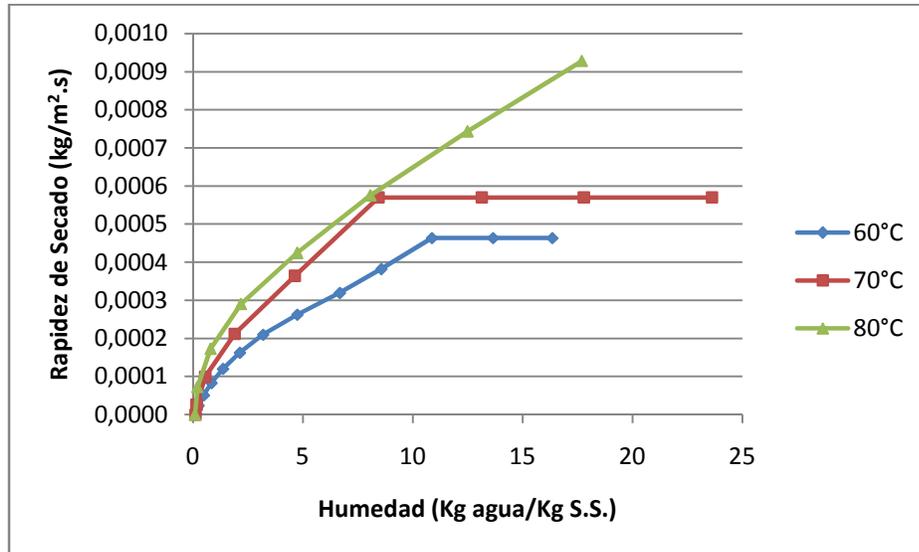


Figura N°25: Curvas de velocidad de secado de calabacín a las temperaturas de 60, 70 y 80°C, para un espesor de 5mm y un diámetro de 4cm.

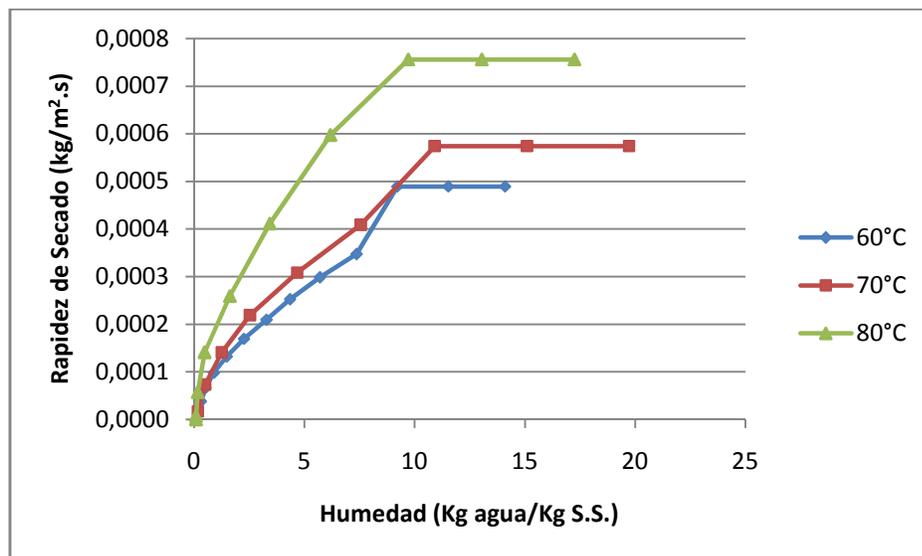


Figura N°26: Curvas de velocidad de secado de calabacín a las temperaturas de 60, 70 y 80°C, para un espesor de 5mm y un diámetro de 4,5cm.

En líneas generales en dichas curvas también se aprecia una disminución de la velocidad de secado a medida que disminuye la concentración de agua en el sólido, y a su vez para una misma concentración la velocidad disminuye a medida que lo hace la temperatura.

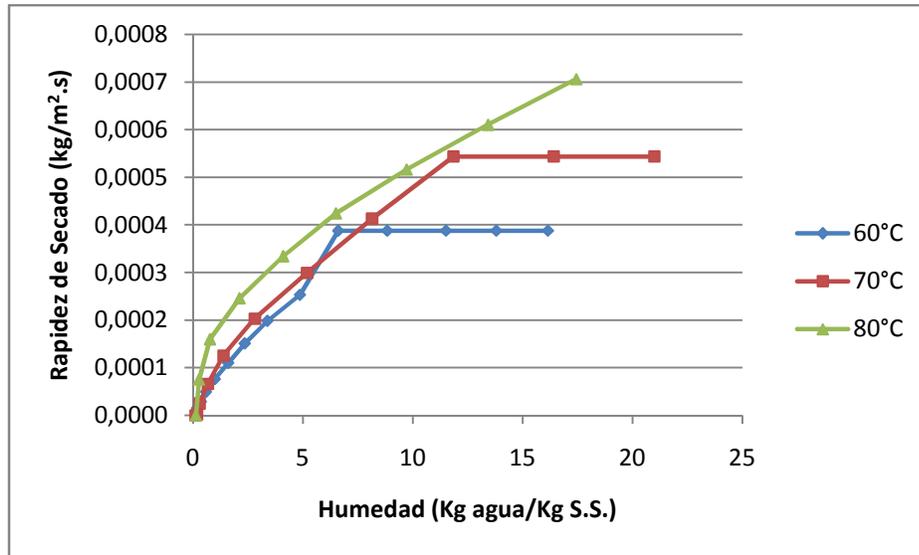


Figura N°27: Curvas de velocidad de secado de calabacín a las temperaturas de 60, 70 y 80°C, para un espesor de 5mm y un diámetro de 5cm.

Las figuras de la N°28 a la 30 representan las curvas de velocidad de secado a las temperaturas de aire de secado de 60, 70 y 80°C para los un diámetro de rodajas de calabacín de 4, 4,5 y 5cm y un espesor fijo de 10mm. Para todas las curvas es posible apreciar un período de velocidad secado constante dominado por la transferencia de masa por convección y un período de velocidad de secado decreciente donde el mecanismo controlante del proceso de secado es la difusión interna del agua contenida en el sólido, como se ha explicado anteriormente. Las tres curvas presentan una tendencia similar, donde la velocidad de secado en función de la cantidad de humedad siempre es proporcional a la temperatura, por lo que la curva representante de una temperatura de secado de 80°C presenta los valores más altos de velocidad de evaporación mientras que la de 60°C los menores. Una discordancia el

momento de analizar las gráficas es que el período de velocidad de secado constante se encuentra más acentuado en el proceso para una temperatura de 70°C, que puede ser explicado basándose que para esta temperatura la velocidad de evaporación superficial no es tan alta como para los 80°C por lo que resulta fácil para el sólido reponer dicha humedad evaporada en la superficie.

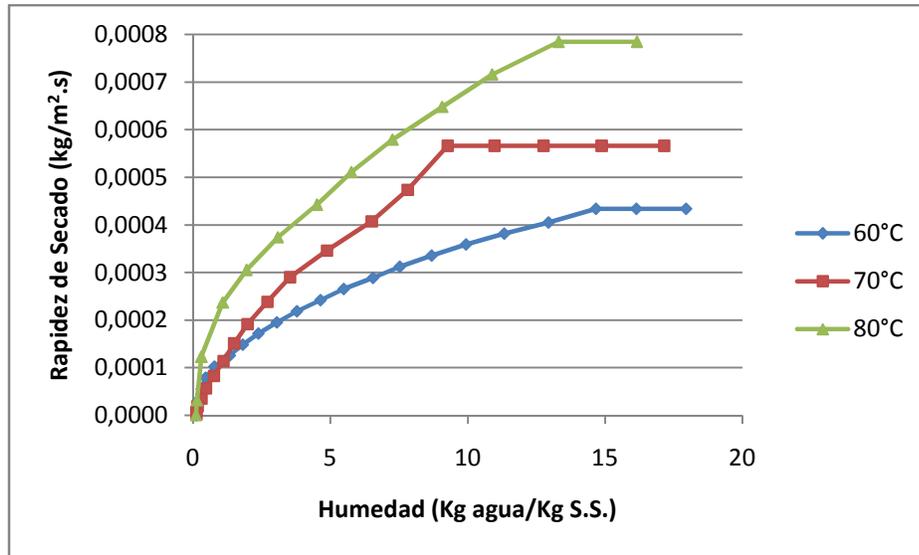


Figura N°28: Curvas de velocidad de secado de calabacín a las temperaturas de 60, 70 y 80°C, para un espesor de 10mm y un diámetro de 4cm.

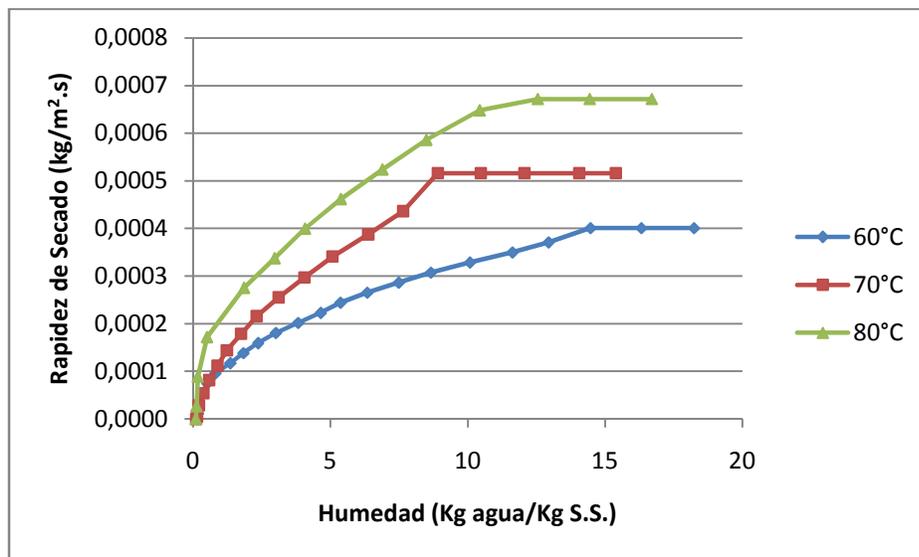


Figura N°29: Curvas de velocidad de secado de calabacín a las temperaturas de 60, 70 y 80°C, para un espesor de 10mm y un diámetro de 4,5cm.

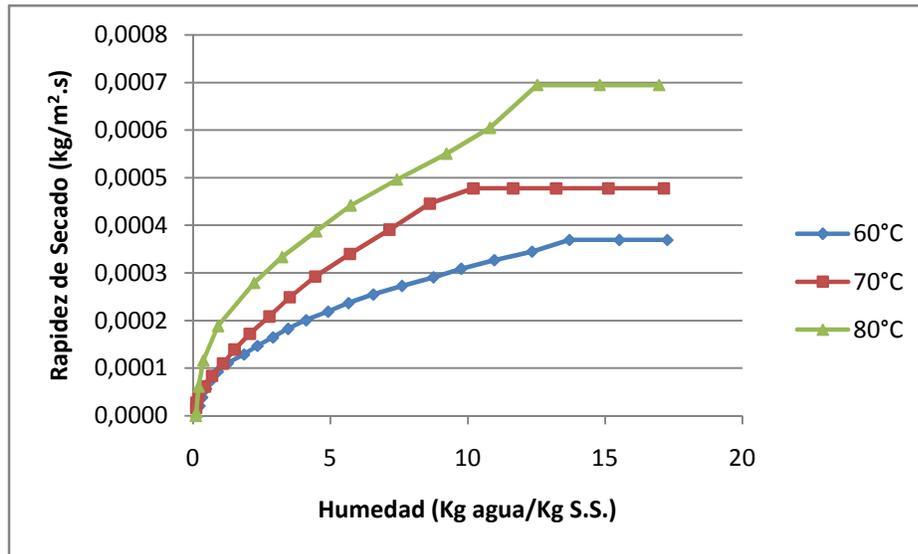


Figura N°30: Curvas de velocidad de secado de calabacín a las temperaturas de 60, 70 y 80°C, para un espesor de 10mm y un diámetro de 5cm.

Al momento de comparar la influencia del espesor sobre la velocidad de secado en función de la humedad en base seca se nota que en general es mínima, ya que para distintos espesores la velocidad es similar para un mismo valor de temperatura y diámetro, este comportamiento se explica sobre el hecho que la rapidez de secado en función del contenido de agua depende principalmente de los gradientes de concentración de la misma, las curvas para distintos espesores a una temperatura de secado y un diámetro fijos se pueden observar de la figura N°40 a la 48 en la sección Apéndice B

Cabe resaltar que el comportamiento de la curva en el período de velocidad de secado presenta una tendencia exponencial, lo cual puede ser ocasionado por la naturaleza fibrosa del vegetal para la cual resulta difícil hacer una predicción matemática, además la naturaleza del mismo cambia a medida que evoluciona el proceso de secado, ya que se evidenciaron cambios en la plasticidad del material, de momentos tomando la contextura de un corcho y finalmente endureciéndose debido a

la falta de agua, lo que trae como consecuencia una variación en la manera como difunde la humedad a través del tejido celular del calabacín .

2.- Efecto de las condiciones de temperatura del aire, espesor y diámetro de las rodajas de calabacín para el secado por convección forzada sobre el contenido de humedad final, actividad de agua y cantidad de minerales en calabacín en polvo.

2.1- Efecto de la temperatura de secado por convección forzada sobre el contenido de humedad final y actividad de agua en calabacín.

En la Tabla N°3 se presentan los valores de la humedad y actividad de agua determinados para las rodajas de calabacín al final de cada uno de los experimentos a las distintas condiciones de temperatura (60, 70 y 80°C), espesor (1, 5 y 10mm) y diámetro (4, 4,5 y 5cm).

Para el caso de la humedad final se aprecia que está disminuye aproximadamente 0,01 Kg de agua/Kg, a medida que se incrementan las condiciones de temperatura, lo cual se debe al equilibrio que se alcanza entre la humedad del sólido y la humedad relativa presente en el ambiente de secado, ya que a medida que aumenta la temperatura, para un mismo valor de humedad total, la humedad relativa disminuye. Para el caso del espesor no existe una tendencia en específico, y al tomar en cuenta que la naturaleza de las muestras de calabacín no es exactamente la misma, las oscilaciones en los valores pueden ser atribuidos a dicho factor.

Al momento de visualizar los valores de actividad de agua se nota que todos se encuentran por debajo de 0,6, lo que garantiza la inhibición de crecimiento microbiano, como lo son hongos, levaduras y bacterias; a su vez, presentan una tendencia similar a los del contenido de humedad final, lo cual es lógico, ya que al disminuir la cantidad de agua disminuye la presión de vapor y por lo tanto la actividad de la misma, siendo estos valores de actividad inversamente proporcionales a la temperatura de secado (Coultate, 2001).

| Temperatura | Espesor | Diámetro | Humedad final (Kg agua/Kg totales) | Actividad de agua |
|-------------|---------|----------|---------------------------------------|-------------------|
| 60°C | 1mm | 4cm | 0,096 | 0,37 |
| | | 4,5cm | 0,101 | 0,38 |
| | | 5cm | 0,106 | 0,41 |
| | 5mm | 4cm | 0,101 | 0,35 |
| | | 4,5cm | 0,090 | 0,35 |
| | | 5cm | 0,095 | 0,34 |
| | 10mm | 4cm | 0,110 | 0,38 |
| | | 4,5cm | 0,114 | 0,40 |
| | | 5cm | 0,126 | 0,45 |
| 70°C | 1mm | 4cm | 0,083 | 0,27 |
| | | 4,5cm | 0,086 | 0,29 |
| | | 5cm | 0,085 | 0,28 |
| | 5mm | 4cm | 0,112 | 0,28 |
| | | 4,5cm | 0,105 | 0,29 |
| | | 5cm | 0,108 | 0,27 |
| | 10mm | 4cm | 0,106 | 0,39 |
| | | 4,5cm | 0,107 | 0,43 |
| | | 5cm | 0,107 | 0,40 |
| 80°C | 1mm | 4cm | 0,080 | 0,27 |
| | | 4,5cm | 0,080 | 0,28 |
| | | 5cm | 0,079 | 0,28 |
| | 5mm | 4cm | 0,072 | 0,28 |
| | | 4,5cm | 0,077 | 0,28 |
| | | 5cm | 0,076 | 0,27 |
| | 10mm | 4cm | 0,092 | 0,33 |
| | | 4,5cm | 0,094 | 0,35 |
| | | 5cm | 0,092 | 0,34 |

Tabla N°3: Valores de humedad final y actividad de agua obtenidos para las rodajas de calabacín.

2.2.- Contenido de fósforo y potasio a las distintas condiciones de temperatura y espesor.

El objetivo de la determinación de los minerales era conocer la cantidad presente en el producto final y si ésta se veía afectada por el secado a distintas temperaturas.

En la tabla N°4 se evidencia el contenido porcentual de los minerales presentes en el mayor proporción en el calabacín, los cuales son fósforo y potasio. Se observa que para ambos no existe relación alguna para las condiciones de temperatura y espesor utilizadas y que las variaciones en los valores se pueden atribuir a la naturaleza propia de cada fruto.

| Temperatura | Espesor | Fósforo (%) | Potasio (%) |
|-------------|---------|-------------|-------------|
| 60°C | 1mm | 1,17 | 4,17 |
| | 5mm | 1,26 | 3,78 |
| | 10mm | 1,72 | 4,38 |
| 70°C | 1mm | 1,71 | 3,99 |
| | 5mm | 1,47 | 4,27 |
| | 10mm | 1,44 | 3,84 |
| 80°C | 1mm | 1,64 | 4,17 |
| | 5mm | 1,32 | 4,73 |
| | 10mm | 1,40 | 3,43 |

Tabla N°4: Valores de porcentaje de fósforo y potasio.

3.- Condiciones óptimas de temperatura y tamaño de las rodajas de calabacín para llevar a cabo el proceso de secado por cargas mediante el método de convección forzada.

Del análisis de las curvas de secado para las rodajas de calabacín se pueden obtener ciertas características en común, como lo son:

a) El descarte en cada uno de los casos de una posible utilización de 60°C como temperatura de operación, debido a la diferencia entre la curva de secado a

dicha temperatura al ser comparada con las otras dos y la cantidad de tiempo requerido para alcanzar la humedad de equilibrio,

b) La similitud en el comportamiento de las curvas de secado para 70 y 80°C para los espesores de 1 y 5mm, donde a pesar de llegar a tener una hora de diferencia en el momento que se alcanzan las condiciones de humedad de equilibrio, o lo que es lo mismo el punto para tres valores consecutivos iguales, los puntos anteriores presentan valores prácticamente iguales, esto puede atribuirse a la similitud del gradiente de temperatura entre el aire de secado y la superficie, para el periodo de velocidad de secado constante a las temperaturas de 70 y 80°C, que fue en promedio, de 20 y 24°C respectivamente; y además al encostramiento de las rodajas de calabacín, que supone una resistencia a la difusión dentro del sólido, por lo que cualitativamente se podría sugerir el uso de 70°C como temperatura de operación debido al ahorro energético que ésta supone en lugar de utilizar 80°C, no obstante queda abierto el uso de una posible temperatura intermedia.

c) Siempre es recomendable trabajar a los valores de espesor más bajos posibles, ya que una variación de un milímetro reduce los tiempos de secado en aproximadamente 60 minutos para el secado a 60°C, 45 minutos para el secado a 70°C y 37 minutos para el secado a 80°C. Además, también se puede apreciar cierta variación en los valores de humedad inicial, los cuales dependen principalmente de la naturaleza del calabacín antes de ser sometido al experimento, aunque esta fluctuación no afecta el desarrollo del proceso de secado.

d) El proceso es independiente del diámetro utilizado en las rodajas, debido a que para una misma temperatura y un mismo espesor el momento en el que se alcanzan las condiciones de humedad de equilibrio es el mismo para la mayoría de los casos.

En conclusión se decidió que las condiciones óptimas de operación son una temperatura de aire de secado de 70°C y el menor espesor posible (1mm) independientemente del diámetro utilizado, debido a que factores como el contenido de humedad final y la actividad de agua presentes en las muestras molidas de calabacín, no tienen influencia considerable en la selección de las condiciones de

secado, porque si bien es cierto que a medida que aumenta la temperatura de secado disminuye el contenido de humedad final, esta variación es muy pequeña como para ser determinante al momento de decidir por una condición de operación u otra y los valores de actividad de agua que no sobrepasan 0,45 garantizan la inhibición de cualquier tipo de crecimiento microbiano siempre y cuando el producto final, dígase polvo o harina, esté bien almacenado. Otros factores como el contenido de minerales no afectan al momento de tomar una decisión respecto a que condiciones de secado utilizar, sin embargo es sabido que a medida que aumenta la temperatura ocurre una degradación de vitaminas, por lo cual este es otro factor que influye al momento de seleccionar una temperatura de secado a 70°C antes que 80°C.

Al comparar los resultados obtenidos con otros estudios similares ciertos resultados contrastan, como por ejemplo el estudio realizado por Fioreze y Morini (2000) sobre rebanadas de ñame, en dicho estudio se consideró como temperatura óptima de secado 50°C, debido que a pesar de que a 70°C (temperatura máxima a la que fue realizado el experimento) el tiempo necesario para secar las muestras fue 42% menor el gasto energético fue 53% mayor, pero en dicho experimento se trabajó con espesores considerados descartados al momento de secar las rodajas de calabacín (10 y 25mm), lo cual podría ser la causa del alto gasto energético reportado. Otro estudio con el que puede ser comparado los resultados obtenidos es el realizado por Carranza y Sánchez (2002) sobre plátano y yuca, donde los coeficientes de transferencia de calor por convección son mayores a los obtenidos en este estudio, sin embargo el dichos resultados son lógicos porque la velocidad de aire de secado utilizada también es mayor, aproximadamente en la misma proporción que el coeficiente; dichos autores también sugieren no utilizar valores de velocidad de aire de secado superiores a 9m/s, ya que a estas condiciones la fuerza del aire arrastra las rodajas del alimento.

4.- Coeficiente de transferencia de masa por convección en el período de velocidad de secado constante y la difusividad efectiva en el período de velocidad de secado decreciente

4.1.- Coeficientes de transferencia de calor por convección (h_c), conducción-convección (U_k), conducción-convección lateral (U_{kl}) y radiación (h_r) para el período de secado a velocidad constante para las distintas condiciones de temperatura, espesor y diámetro.

En la Tabla N°5 se observan los distintos coeficientes de transferencia de calor calculados para el proceso de secado. Para el caso del coeficiente de transferencia de calor por convección (h_c), se observa que es independiente de los valores de espesor y diámetro, o lo que es lo mismo, depende únicamente de la temperatura, disminuyendo a medida que esta última aumenta; sin embargo la variación de la magnitud del coeficiente no es muy alta.

El coeficiente que resultó presentar el mayor valor fue el de transferencia de calor por conducción (U_k) y a diferencia del coeficiente de transferencia de calor por convección éste depende de las condiciones de diámetro y espesor, aumentando su magnitud a medida que dichos valores disminuyen, debido a que al reducirse el diámetro, la relación entre las áreas de secado (superficie de la rodaja de calabacín/bandeja) disminuye, y como dicha relación es un factor que representa una resistencia a la transferencia de calor, al ésta disminuir, el valor del coeficiente aumenta. Análogamente, ocurre lo mismo con el espesor.

Si se observan los coeficientes de transferencia de calor por conducción lateral (U_{kl}) y por radiación (h_r) se puede decir que éstos son muy bajos en comparación con los coeficientes de transferencia de calor por convección y conducción y no tienen una influencia relevante en el coeficiente global de transferencia de calor. A pesar de ello se observa que el coeficiente de transferencia de calor por conducción lateral posee un comportamiento contrario al coeficiente de transferencia de calor por convección, esto ocurre porque al aumentar el espesor y el diámetro, también lo hace

el área lateral, lo cual permite una mayor recepción de calor del aire. Para el caso del coeficiente de calor por radiación este depende prácticamente de la diferencia entre la temperatura de secado y la temperatura superficial, por lo que al aumentar la temperatura de secado también lo hace el valor de dicho coeficiente.

| Temperatura | Espesor | Diámetro | hc (W/m ² .K) | Uk (W/m ² .K) | Ukl (W/m ² .K) | hr (W/m ² .K) | U _G (W/m ² .K) |
|-------------|---------|----------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|---|
| 60°C | 1mm | 4cm | 12,7 | 94,6 | 0,62 | 6,20 | 114 |
| | | 4.5cm | 12,7 | 77,7 | 0,56 | 6,20 | 97,1 |
| | | 5cm | 12,7 | 64,8 | 0,50 | 6,20 | 84,1 |
| | 5mm | 4cm | 12,7 | 54,8 | 2,98 | 6,13 | 76,5 |
| | | 4.5cm | 12,7 | 48,6 | 2,65 | 6,13 | 70,1 |
| | | 5cm | 12,7 | 43,2 | 2,39 | 6,13 | 64,4 |
| | 10mm | 4cm | 12,7 | 35,9 | 5,64 | 6,30 | 60,5 |
| | | 4.5cm | 12,7 | 33,1 | 5,01 | 6,30 | 57,1 |
| | | 5cm | 12,7 | 30,5 | 4,51 | 6,30 | 54,0 |
| 70°C | 1mm | 4cm | 12,5 | 93,6 | 0,62 | 6,54 | 113 |
| | | 4.5cm | 12,5 | 76,9 | 0,55 | 6,54 | 96,4 |
| | | 5cm | 12,5 | 64,0 | 0,49 | 6,54 | 83,6 |
| | 5mm | 4cm | 12,5 | 54,4 | 2,95 | 6,75 | 76,3 |
| | | 4.5cm | 12,5 | 48,3 | 2,62 | 6,75 | 69,9 |
| | | 5cm | 12,5 | 42,9 | 2,36 | 6,75 | 64,2 |
| | 10mm | 4cm | 12,5 | 35,7 | 5,58 | 6,42 | 60,2 |
| | | 4.5cm | 12,5 | 33,0 | 4,96 | 6,42 | 56,9 |
| | | 5cm | 12,5 | 30,4 | 4,46 | 6,42 | 53,8 |
| 80°C | 1mm | 4cm | 12,3 | 92,6 | 0,61 | 6,84 | 112 |
| | | 4.5cm | 12,3 | 76,0 | 0,54 | 6,84 | 95,7 |
| | | 5cm | 12,3 | 63,3 | 0,49 | 6,84 | 83,0 |
| | 5mm | 4cm | 12,3 | 54,1 | 2,91 | 6,78 | 76,1 |
| | | 4.5cm | 12,3 | 48,0 | 2,59 | 6,78 | 69,7 |
| | | 5cm | 12,3 | 42,6 | 2,33 | 6,78 | 64,0 |
| | 10mm | 4cm | 12,3 | 35,6 | 5,51 | 6,70 | 60,1 |
| | | 4.5cm | 12,3 | 32,8 | 4,90 | 6,70 | 56,8 |
| | | 5cm | 12,3 | 30,2 | 4,41 | 6,70 | 53,7 |

Tabla N°5: Coeficientes de transferencia de calor por convección, conducción, conducción lateral y radiación.

En conclusión el coeficiente global de transferencia de calor (U_G) depende principalmente del coeficiente de transferencia de calor por conducción-convección, y como éste presenta los mayores valores para las condiciones donde el diámetro y el espesor son menores, entonces se puede decir que dichas condiciones son las que benefician el proceso de transferencia de calor, independientemente de la temperatura de secado, la cual afecta a la cantidad de calor transferido y por lo tanto la velocidad de evaporación de la humedad del sólido.

4.2.- Coeficientes de transferencia de masa por convección (k_y) y del factor de relación entre los valores experimentales y teóricos (f_c).

El coeficiente de transferencia de masa por convección fue calculado con el fin de conocer si éste se ve afectado por la variación de la temperatura del aire y el diámetro y espesor del calabacín y así justificar la utilización de una de estas condiciones para llevar a cabo el proceso. También fue determinado un factor de relación para realizar una mejor predicción del proceso a distintas condiciones de humedad total y velocidad de aire de secado cuando no se cuentan con los valores experimentales de velocidad de secado de la humedad.

Para el caso de los coeficientes de transferencia de masa por convección no se observa una tendencia marcada respecto a alguna de las variables en estudio. Teóricamente la única dependencia posible sería con respecto a la temperatura de secado, ya que al ésta aumentar también lo hace la temperatura de la superficie de secado y por consiguiente la humedad superficial, lo que conllevaría a una disminución en el gradiente de concentración y a su vez a un aumento de la magnitud del coeficiente. Sin embargo dicha variación no es lo suficientemente elevada como para marcar un comportamiento definido respecto a la temperatura y por lo tanto se concluye que el coeficiente depende principalmente de la velocidad de evaporación del agua del sólido, la cual fue medida experimentalmente.

| Temperatura | Espesor | Diámetro | k_y (Kg/m ² .s) |
|-------------|---------|----------|------------------------------|
| 60°C | 1mm | 4cm | 1,22E-2 |
| | | 4,5cm | 8,84E-3 |
| | | 5cm | 6,84E-3 |
| | 5mm | 4cm | 9,32E-3 |
| | | 4,5cm | 1,18E-2 |
| | | 5cm | 7,74E-3 |
| | 10mm | 4cm | 1,10E-2 |
| | | 4,5cm | 9,92E-3 |
| | | 5cm | 8,80E-3 |
| 70°C | 1mm | 4cm | 9,65E-3 |
| | | 4,5cm | 8,71E-3 |
| | | 5cm | 9,04E-3 |
| | 5mm | 4cm | 7,12E-3 |
| | | 4,5cm | 8,15E-3 |
| | | 5cm | 8,09E-3 |
| | 10mm | 4cm | 9,46E-3 |
| | | 4,5cm | 8,16E-3 |
| | | 5cm | 7,29E-3 |
| 80°C | 1mm | 4cm | 9,56E-3 |
| | | 4,5cm | 8,06E-3 |
| | | 5cm | 1,06E-3 |
| | 5mm | 4cm | 1,30E-2 |
| | | 4,5cm | 5,08E-3 |
| | | 5cm | 8,06E-3 |
| | 10mm | 4cm | 1,56E-2 |
| | | 4,5cm | 8,15E-3 |
| | | 5cm | 1,02E-2 |

Tabla N°6: Coeficientes de transferencia de masa por convección.

Como ya se mencionó, fue posible determinar un factor de relación entre los valores teóricos y experimentales para el secado de calabacín, dicho factor se nombró como f_c y se fundamenta en la corrección de la relación de Lewis, donde para el caso en estudio este número adimensional (Le) no es necesariamente igual a uno, por lo que f_c será utilizado como un coeficiente adicional en la relación de Lewis (ecuación

Nº29). El promedio de los valores de f_c obtenidos para los experimentos fue el siguiente:

$$f_c = 0,8094$$

La utilización de dicho valor garantizará una mayor aproximación en el cálculo del coeficiente de transferencia de masa por convección teórico para el calabacín.

4.3.- Difusividad efectiva (D) para el período de velocidad de secado decreciente a las distintas condiciones de temperatura, espesor y diámetro.

La determinación de la difusividad efectiva es considerado como uno de los objetivos más importantes del estudio, aparte del análisis cualitativo de las curvas de secado y velocidad de secado, ya que el período donde la predomina la difusión de humedad dentro del sólido sobre la evaporación del agua en el la superficie resulta ser el paso controlante del proceso de secado.

En la Tabla Nº7 se presentan los valores promedios de difusividad efectiva calculados para el período de velocidad de secado decreciente, dichos valores aumentan a medida que lo hace la temperatura de secado, posiblemente debido al hecho de que a mayores temperaturas se facilita el movimiento del agua dentro del tejido celular del sólido. También se aprecia, pese a lo que a priori se podría pensar, que la difusividad efectiva está ligada de forma directamente proporcional al espesor, pero esta conclusión puede llegar a ser engañosa, ya que el espesor no es constante a medida que se desarrolla el experimento y por el contrario, disminuye conjuntamente con la cantidad de agua presente en el interior del sólido.

| Temperatura | Espesor | Diámetro | D (m ² /s) |
|-------------|---------|----------|-------------------------|
| 60°C | 1mm | 4cm | 9,13E-11 |
| | | 4,5cm | 1,03E-10 |
| | | 5cm | 1,32E-10 |
| | 5mm | 4cm | 5,06E-11 |
| | | 4,5cm | 2,40E-11 |
| | | 5cm | 3,28E-11 |
| | 10mm | 4cm | 3,32E-10 |
| | | 4,5cm | 2,66E-10 |
| | | 5cm | 1,35E-10 |
| 70°C | 1mm | 4cm | 1,50E-10 |
| | | 4,5cm | 1,32E-10 |
| | | 5cm | 1,37E-10 |
| | 5mm | 4cm | 2,08E-10 |
| | | 4,5cm | 8,42E-11 |
| | | 5cm | 7,51E-11 |
| | 10mm | 4cm | 2,34E-10 |
| | | 4,5cm | 1,91E-10 |
| | | 5cm | 1,91E-10 |
| 80°C | 1mm | 4cm | 1,90E-10 |
| | | 4,5cm | 2,71E-10 |
| | | 5cm | 2,60E-10 |
| | 5mm | 4cm | 6,33E-10 |
| | | 4,5cm | 1,55E-10 |
| | | 5cm | 2,05E-10 |
| | 10mm | 4cm | 6,33E-10 |
| | | 4,5cm | 1,55E-10 |
| | | 5cm | 2,05E-10 |

Tabla N°7: Difusividad efectiva.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

En función de los resultados obtenidos se concluye:

- Las curvas de secado permiten comparar el proceso realizado a distintas condiciones de temperatura, espesor y diámetro.
- Mediante la construcción de las curvas de velocidad de secado es posible evidenciar para ciertos casos, en especial para aquellos de mayor espesor, una zona de velocidad de secado constante y otra de velocidad de secado decreciente.
- Los valores de humedad de equilibrio cercanos al 10% y de actividad de agua no superiores a 0,45, garantizan la conservación del calabacín en polvo obtenido luego del proceso de secado.
- Las variaciones de temperatura y espesor no afectan el contenido de minerales posterior a la experiencia de secado.
- La temperatura indicada para llevar a cabo el proceso de secado por lotes, por el mecanismo de convección forzada es de 70°C.
- Se debe trabajar a los valores de espesor más bajos posibles.
- Las dimensiones del diámetro de las rodajas de calabacín no presentan influencia en el proceso de secado.
- No se debe descartar la influencia de los procesos de transferencia de calor por conducción-convección y radiación.
- Fue posible obtener un factor de relación (f_c) para los coeficientes de transferencia de masa por convección.
- Los valores de la difusividad efectiva para las distintas condiciones de secado se encuentran entre el orden de $1E-11$ y $1E-10$ m²/s.

CAPÍTULO VI

RECOMENDACIONES

Luego de realizar el proceso de obtención y análisis de los datos se pueden enumerar las siguientes recomendaciones:

- A fin de facilitar la medición del valor de humedad del aire se recomienda contar con un instrumento para medir dicha humedad, en lugar de realizar dicha medición indirectamente a través de la temperatura de bulbo húmedo de dicho aire.
- Contar con un instrumento para medir la velocidad del aire de secado, con el fin de no depender directamente con el valor de indicado en el manual del equipo secador y garantizar un menor error humano en los resultados finales.
- Si se ha de repetir el procedimiento experimental para algún otro tipo de fruto o vegetal en general, considerar que para espesores elevados se puede llegar a necesitar paralizar el proceso de secado durante una noche, por lo que se recomienda tomar las previsiones necesarias.

CAPÍTULO VII

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abril J. y Casp A. (2003), Procesos de conservación de alimentos. 2ª Edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Association of Official Analytical Chemists (A.O.A.C.) (1995). 16th edition. Washington. D.C. (U.S.A.).
- Botanical-online SL. Calabacines. Obtenida el 14 de Junio de 2009, de <http://www.botanical-online.com/calabacines.htm>
- Carranza J. y Sánchez M. (2002), Cinética de secado de *Musa paradisiaca* L. “Plátano” y *Manihot esculenta* Grantz “Yuca”. Revista Amazónica de Investigación Alimentaria. V.2, n°1, p. 15-25.
- Chaves M., Sgroppo S. y Avanza J. (2003), Cinética de secado de berenjenas (*Solanum, melongena, L.*) Universidad nacional del nordeste. Comunicaciones científicas y tecnológicas. Corrientes, Argentina. Resumen E-60.
- Coultate T. (2001), Food – The chemistry of its components. 4ª Edición. Royal Society of Chemistry. Londres, Reino Unido.
- Fioreze R. y Morini Bruno. (2000), Yam (*Discordea* sp) drying with different cuts and temperatures: experimental and simulated results. Ciência e Tecnologia de Alimentos Vol. 20 N°2 Campinas May/Aug. 2000.
- Incropera F. y DeWitt D. (1999), Fundamentos de transferencia de calor. 4ª Edición. Prentice Hall. México.
- Kolawole F., Taiwo O., Ebenezer I y Ogugua A. (2007), Effect of pretreatment and temperature on air-drying of *Dioscorea rotunda* slices. Journal of Food Engineering N°80, p. 1002-1010.

- Lindorf H., Rodríguez P. y De Parisca L. (1991), Botánica: Clasificación – Estructura – Reproducción. 2^{da} Edición. Universidad Central de Venezuela, Ediciones de la Biblioteca. Caracas, Venezuela.
- Maldonado R. y Pacheco E. (2003), Curvas de deshidratación del brócoli (*Brassica oleraceae* L var. *Talica Plenck*) y coliflor (*Brassica oleraceae* L var. *Botrylis* L). Rev. Fac. Agron. (LUZ). N° 20, p. 306-319.
- Nonhebel G. (1979), El secado de los sólidos en la industria química. Editorial Reverté. Barcelona, España.
- PERRY, Robert (1992), Manual del Ingeniero Químico, Editorial Mc Graw Hill, México.
- Salazar R. (1995), Caracterización de la maduración de semillas de calabacín (*Cucurbita Pepo*) producidos en época de secano. Maracay, Venezuela.
- Treybal R.E. (1988). Operaciones de transferencia de masa. 2^a Edición. McGraw-Hill, México D.F., México.
- Welty J. (2002), Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa. 2^a Edición. Editorial Limusa. México.

CAPÍTULO VIII

APÉNDICE A

Datos recolectados.

Los valores de espesor y diámetro fueron medidos utilizando un vernier con un error asociado de $\pm 0,01$ cm y la balanza utilizada para realizar las pesadas de las distintas muestras posee un error de $\pm 0,1$ g.

A continuación se muestran las tablas de recolección de datos obtenidos para cada pesada medidos en gramos, a las diferentes condiciones de secado. En la primera columna se encuentra el número de muestra y en la primera fila el tiempo medido en minutos.

| N° de muestra | Vacío | 0 | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 | 210 | 240 |
|---------------|-------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | 6,1 | 22,7 | 14,3 | 9,9 | 7,7 | 7,3 | 7,2 | 7,2 | 7,2 | 7,2 |
| 2 | 6,1 | 21,5 | 13,9 | 10,6 | 8,6 | 7,8 | 7,5 | 7,4 | 7,4 | 7,4 |
| 3 | 6,4 | 21,8 | 14,5 | 10,8 | 8,8 | 8,0 | 7,7 | 7,6 | 7,6 | 7,6 |
| 4 | 6,1 | 22,0 | 16,6 | 11,7 | 9,0 | 7,9 | 7,5 | 7,4 | 7,4 | 7,4 |
| 5 | 6,1 | 21,8 | 15,7 | 10,7 | 8,4 | 7,5 | 7,2 | 7,2 | 7,2 | 7,2 |
| 6 | 6,2 | 25,9 | 18,5 | 12,0 | 9,0 | 8,0 | 7,8 | 7,7 | 7,7 | 7,7 |
| 7 | 6,1 | 24,8 | 18,0 | 12,0 | 8,7 | 8,0 | 7,6 | 7,6 | 7,6 | 7,6 |
| 8 | 6,2 | 25,6 | 17,9 | 13,0 | 9,5 | 8,3 | 7,9 | 7,8 | 7,8 | 7,8 |
| 9 | 6,0 | 27,2 | 16,2 | 11,3 | 9,0 | 8,2 | 7,8 | 7,8 | 7,8 | 7,8 |
| 10 | 6,0 | 25,4 | 17,2 | 10,9 | 8,7 | 8,0 | 7,7 | 7,6 | 7,6 | 7,6 |
| 11 | 6,2 | 30,0 | 20,0 | 13,3 | 9,7 | 8,4 | 8,1 | 8,0 | 8,0 | 8,0 |
| 12 | 6,1 | 29,6 | 20,1 | 13,8 | 10,1 | 8,5 | 8,0 | 7,9 | 7,9 | 7,9 |
| 13 | 6,3 | 28,2 | 20,6 | 13,3 | 9,4 | 8,3 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 |
| 14 | 6,3 | 29,0 | 19,8 | 12,9 | 9,3 | 8,3 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 |
| 15 | 6,1 | 30,2 | 20,4 | 13,4 | 9,7 | 8,3 | 7,9 | 7,9 | 7,9 | 7,9 |

Tabla N°8: Peso (g) de las bandejas con 6 rodajas de calabacín cada una para una temperatura de aire de secado de 60°C y un espesor de 1mm.

| N° de muestra | Vacio | 0 | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 | 210 | 240 |
|---------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 6,2 | 43,9 | 37,2 | 30,6 | 25,1 | 19,9 | 15,1 | 11,8 | 9,7 | 8,6 |
| 2 | 6,0 | 51,1 | 44,5 | 36,9 | 32,3 | 27,8 | 22,6 | 19,1 | 16,3 | 14,2 |
| 3 | 6,1 | 46,8 | 41,1 | 36,1 | 30,7 | 27,2 | 23,2 | 19,2 | 16,3 | 13,7 |
| 4 | 6,1 | 41,8 | 36,0 | 29,7 | 24,1 | 20,0 | 16,2 | 12,7 | 10,8 | 9,6 |
| 5 | 6,1 | 61,6 | 52,8 | 45,5 | 39,2 | 32,2 | 28,2 | 24,0 | 19,7 | 16,9 |
| 6 | 6,1 | 54,0 | 42,9 | 35,9 | 28,9 | 23,6 | 19,3 | 15,9 | 12,8 | 11,1 |
| 7 | 6,1 | 56,8 | 48,4 | 40,1 | 34,2 | 29,0 | 24,7 | 21,2 | 17,8 | 14,7 |
| 8 | 6,2 | 59,6 | 52,5 | 43,3 | 37,2 | 31,9 | 25,8 | 22,2 | 19,0 | 15,8 |
| 9 | 6,1 | 66,2 | 59,3 | 50,9 | 42,4 | 36,6 | 30,9 | 26,3 | 22,9 | 19,6 |
| 10 | 6,1 | 61,6 | 55,8 | 47,3 | 36,0 | 28,9 | 22,8 | 17,1 | 14,2 | 12,1 |
| 11 | 6,2 | 68,7 | 60,0 | 53,3 | 43,6 | 33,8 | 27,4 | 21,8 | 17,9 | 15,2 |
| 12 | 6,0 | 62,4 | 51,6 | 44,0 | 36,9 | 29,1 | 23,5 | 19,2 | 15,3 | 13,1 |

Tabla N°9: Peso (g) de las bandejas con 6 rodajas de calabacín cada una para una temperatura de aire de secado de 60°C y un espesor de 5mm.

| N° de muestra | 270 | 300 | 330 | 360 | 390 | 420 | 450 | 480 |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 8,2 | 8,1 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 |
| 2 | 12,6 | 11,3 | 10,1 | 9,6 | 9,4 | 9,4 | 9,4 | 9,4 |
| 3 | 11,7 | 10,4 | 9,6 | 9,3 | 9,2 | 9,2 | 9,2 | 9,2 |
| 4 | 8,8 | 8,3 | 8,2 | 8,1 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 |
| 5 | 14,3 | 12,6 | 11,6 | 10,8 | 10,3 | 10,3 | 10,3 | 10,3 |
| 6 | 9,9 | 9,2 | 9,0 | 8,8 | 8,7 | 8,7 | 8,7 | 8,7 |
| 7 | 12,6 | 11,3 | 10,4 | 10,1 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 |
| 8 | 13,7 | 12,2 | 11,4 | 10,9 | 10,6 | 10,6 | 10,6 | 10,6 |
| 9 | 16,4 | 14,4 | 12,8 | 11,7 | 11,2 | 11,0 | 11,0 | 11,0 |
| 10 | 10,8 | 10,0 | 9,7 | 9,4 | 9,4 | 9,4 | 9,4 | 9,4 |
| 11 | 12,9 | 11,4 | 10,5 | 10,0 | 9,8 | 9,7 | 9,7 | 9,7 |
| 12 | 11,5 | 10,4 | 9,9 | 9,7 | 9,5 | 9,4 | 9,4 | 9,4 |

Tabla N°9 cont.: Peso (g) de las bandejas con 6 rodajas de calabacín cada una para una temperatura de aire de secado de 60°C y un espesor de 5mm.

| Nº de muestra | Vacio | 0 | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 | 210 | 240 |
|----------------------|--------------|----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | 6,3 | 75,0 | 69,3 | 62,9 | 56,1 | 50,8 | 45,4 | 41,6 | 37,4 | 33,2 |
| 2 | 6,0 | 78,4 | 73,6 | 68,1 | 60,0 | 54,6 | 49,3 | 43,6 | 39,5 | 35,9 |
| 3 | 6,0 | 77,9 | 71,0 | 66,0 | 60,4 | 54,1 | 49,2 | 44,8 | 40,0 | 36,8 |
| 4 | 6,1 | 79,9 | 69,8 | 64,4 | 58,8 | 51,5 | 46,0 | 41,0 | 36,6 | 32,8 |
| 5 | 6,0 | 93,6 | 84,6 | 75,4 | 69,4 | 62,9 | 55,2 | 49,6 | 44,3 | 39,4 |
| 6 | 6,0 | 93,0 | 84,6 | 76,8 | 70,1 | 64,4 | 56,3 | 50,7 | 45,4 | 39,6 |
| 7 | 6,1 | 95,3 | 86,7 | 78,1 | 70,0 | 64,5 | 58,2 | 51,1 | 45,7 | 40,3 |
| 8 | 6,2 | 90,0 | 81,3 | 73,4 | 66,7 | 60,7 | 54,8 | 47,4 | 42,3 | 37,6 |
| 9 | 6,1 | 115,5 | 103,2 | 93,8 | 85,4 | 76,7 | 70,9 | 64,3 | 57,7 | 52,3 |
| 10 | 6,1 | 118,4 | 107,2 | 97,6 | 89,8 | 82,2 | 75,2 | 69,3 | 60,8 | 55,3 |
| 11 | 6,2 | 111,3 | 101,4 | 90,3 | 82,4 | 74,0 | 67,0 | 61,7 | 55,4 | 48,6 |
| 12 | 6,2 | 113,6 | 105,4 | 92,4 | 84,1 | 76,2 | 67,3 | 61,0 | 55,3 | 48,1 |

Tabla N°10: Peso (g) de las bandejas con 6 rodajas de calabacín cada una para una temperatura de aire de secado de 60°C y un espesor de 10mm.

| Nº de muestra | 270 | 300 | 330 | 360 | 390 | 420 | 450 | 480 | 510 | 540 |
|----------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | 29,3 | 26,4 | 23,4 | 20,5 | 18,5 | 16,4 | 14,5 | 12,1 | 11,0 | 10,6 |
| 2 | 31,4 | 28,3 | 25,2 | 22,2 | 19,1 | 17,1 | 15,1 | 12,7 | 11,6 | 11,1 |
| 3 | 33,0 | 29,6 | 26,2 | 23,5 | 21,1 | 18,9 | 17,1 | 14,5 | 12,7 | 11,6 |
| 4 | 28,9 | 25,4 | 21,9 | 19,5 | 16,8 | 14,5 | 13,2 | 12,0 | 11,2 | 11,0 |
| 5 | 35,6 | 31,3 | 28,1 | 24,2 | 21,6 | 19,1 | 17,2 | 14,7 | 13,3 | 12,4 |
| 6 | 35,3 | 32,8 | 28,2 | 24,2 | 21,5 | 19,1 | 16,7 | 14,2 | 12,7 | 11,8 |
| 7 | 35,8 | 33,1 | 29,1 | 25,8 | 22,5 | 20,1 | 18,0 | 15,2 | 13,9 | 13,2 |
| 8 | 32,6 | 29,1 | 26,1 | 22,6 | 19,6 | 17,1 | 15,1 | 12,9 | 11,8 | 11,4 |
| 9 | 47,3 | 43,0 | 38,9 | 35,4 | 31,8 | 28,0 | 25,1 | 21,5 | 18,9 | 17,4 |
| 10 | 49,3 | 44,7 | 38,4 | 34,5 | 31,3 | 27,0 | 24,6 | 20,5 | 18,0 | 16,6 |
| 11 | 43,6 | 39,4 | 35,2 | 31,5 | 28,5 | 25,5 | 22,2 | 18,9 | 16,7 | 15,4 |
| 12 | 42,7 | 38,1 | 33,7 | 29,2 | 25,9 | 23,5 | 20,7 | 17,6 | 15,9 | 14,7 |

Tabla N°10 cont.: Peso (g) de las bandejas con 6 rodajas de calabacín cada una para una temperatura de aire de secado de 60°C y un espesor de 10mm.

| N° de muestra | 570 | 600 | 630 | 660 | 690 | 720 |
|---------------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 10,2 | 10,1 | 10,1 | 10,1 | 10,1 | 10,1 |
| 2 | 10,6 | 10,5 | 10,4 | 10,4 | 10,4 | 10,4 |
| 3 | 10,8 | 10,4 | 10,3 | 10,3 | 10,3 | 10,3 |
| 4 | 10,7 | 10,6 | 10,6 | 10,6 | 10,6 | 10,6 |
| 5 | 11,7 | 11,4 | 11,2 | 11,1 | 11,1 | 11,1 |
| 6 | 11,2 | 11,0 | 10,9 | 10,9 | 10,9 | 10,9 |
| 7 | 12,4 | 12,2 | 11,9 | 11,9 | 11,9 | 11,9 |
| 8 | 10,9 | 10,9 | 10,8 | 10,8 | 10,8 | 10,8 |
| 9 | 15,9 | 14,8 | 14,1 | 13,5 | 13,1 | 13,1 |
| 10 | 15,3 | 14,3 | 13,7 | 13,4 | 13,3 | 13,3 |
| 11 | 14,3 | 13,6 | 13,1 | 12,9 | 12,6 | 12,6 |
| 12 | 13,8 | 13,5 | 13,1 | 12,9 | 12,8 | 12,8 |

Tabla N°10 cont.: Peso (g) de las bandejas con 6 rodajas de calabacín cada una para una temperatura de aire de secado de 60°C y un espesor de 10mm.

| N° de muestra | Vacio | 0 | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 | 210 |
|---------------|-------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | 6,3 | 20,4 | 11,7 | 8,4 | 7,3 | 7,2 | 7,2 | 7,2 | 7,2 |
| 2 | 6,3 | 19,1 | 10,8 | 7,8 | 7,2 | 7,1 | 7,1 | 7,1 | 7,1 |
| 3 | 6,2 | 20,7 | 12,1 | 7,5 | 7,0 | 6,9 | 6,9 | 6,9 | 6,9 |
| 4 | 6,0 | 21,8 | 14,3 | 7,9 | 6,8 | 6,8 | 6,8 | 6,8 | 6,8 |
| 5 | 6,2 | 19,5 | 11,5 | 6,9 | 6,7 | 6,7 | 6,7 | 6,7 | 6,7 |
| 6 | 6,1 | 27,1 | 18,8 | 11,7 | 8,5 | 7,6 | 7,5 | 7,5 | 7,5 |
| 7 | 6,1 | 23,6 | 12,2 | 7,9 | 7,0 | 7,0 | 7,0 | 7,0 | 7,0 |
| 8 | 6,0 | 24,0 | 15,3 | 9,1 | 6,9 | 6,8 | 6,8 | 6,8 | 6,8 |
| 9 | 6,1 | 24,0 | 14,6 | 9,1 | 7,2 | 7,0 | 6,9 | 6,9 | 6,9 |
| 10 | 6,1 | 21,7 | 12,3 | 7,8 | 6,8 | 6,8 | 6,8 | 6,8 | 6,8 |
| 11 | 6,0 | 30,8 | 19,8 | 10,6 | 7,5 | 7,2 | 7,1 | 7,1 | 7,1 |
| 12 | 6,2 | 28,1 | 17,2 | 8,5 | 7,3 | 7,2 | 7,1 | 7,1 | 7,1 |
| 13 | 6,0 | 27,1 | 16,3 | 9,3 | 7,4 | 7,1 | 7,1 | 7,1 | 7,1 |
| 14 | 6,1 | 29,9 | 19,1 | 10,8 | 7,5 | 7,1 | 7,1 | 7,1 | 7,1 |
| 15 | 6,1 | 29,0 | 16,6 | 9,1 | 7,1 | 7,0 | 7,0 | 7,0 | 7,0 |

Tabla N°11: Peso (g) de las bandejas con 6 rodajas de calabacín cada una para una temperatura de aire de secado de 70°C y un espesor de 1mm.

| Nº de muestra | Vacio | 0 | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 | 210 | 240 |
|----------------------|--------------|----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | 6,2 | 51,7 | 40,1 | 31,5 | 24,6 | 17,6 | 13,5 | 10,7 | 9,2 | 8,8 |
| 2 | 6,3 | 54,6 | 44,1 | 35,5 | 28,1 | 21,8 | 16,8 | 13,0 | 10,5 | 9,3 |
| 3 | 6,2 | 52,3 | 42,1 | 32,8 | 25,1 | 19,0 | 13,6 | 11,1 | 9,5 | 8,8 |
| 4 | 6,1 | 51,7 | 42,6 | 31,6 | 23,6 | 17,2 | 12,5 | 10,2 | 9,0 | 8,4 |
| 5 | 6,2 | 43,6 | 36,4 | 28,0 | 20,0 | 14,2 | 10,2 | 8,5 | 8,1 | 8,0 |
| 6 | 6,1 | 43,8 | 35,6 | 28,6 | 21,2 | 15,4 | 11,1 | 8,8 | 8,0 | 7,9 |
| 7 | 6,1 | 44,4 | 33,1 | 27,0 | 20,1 | 14,5 | 10,4 | 8,4 | 7,9 | 7,8 |
| 8 | 6,0 | 44,6 | 35,3 | 28,1 | 21,4 | 15,1 | 10,6 | 8,3 | 7,6 | 7,6 |
| 9 | 6,1 | 61,6 | 50,1 | 36,7 | 29,1 | 21,1 | 15,2 | 11,9 | 10,4 | 9,6 |
| 10 | 6,1 | 64,1 | 52,8 | 41,4 | 32,3 | 24,6 | 18,5 | 14,8 | 12,4 | 10,5 |
| 11 | 6,0 | 61,5 | 49,9 | 39,2 | 27,8 | 20,6 | 14,2 | 10,4 | 8,9 | 8,4 |
| 12 | 6,2 | 59,4 | 47,5 | 36,9 | 27,6 | 20,6 | 15,0 | 11,4 | 9,6 | 9,0 |

Tabla N°12: Peso (g) de las bandejas con 6 rodajas de calabacín cada una para una temperatura de aire de secado de 70°C y un espesor de 5mm.

| Nº de muestra | 270 | 300 | 330 | 360 | 390 |
|----------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | 8,7 | 8,7 | 8,7 | 8,7 | 8,7 |
| 2 | 9,1 | 9,1 | 9,1 | 9,1 | 9,1 |
| 3 | 8,7 | 8,7 | 8,7 | 8,7 | 8,7 |
| 4 | 8,3 | 8,3 | 8,3 | 8,3 | 8,3 |
| 5 | 7,9 | 7,9 | 7,9 | 7,9 | 7,9 |
| 6 | 7,9 | 7,9 | 7,9 | 7,9 | 7,9 |
| 7 | 7,8 | 7,8 | 7,8 | 7,8 | 7,8 |
| 8 | 7,6 | 7,6 | 7,6 | 7,6 | 7,6 |
| 9 | 9,2 | 9,0 | 8,9 | 8,9 | 8,9 |
| 10 | 9,8 | 9,5 | 9,3 | 9,3 | 9,3 |
| 11 | 8,4 | 8,3 | 8,3 | 8,3 | 8,3 |
| 12 | 8,9 | 8,8 | 8,8 | 8,8 | 8,8 |

Tabla N°12 cont: Peso (g) de las bandejas con 6 rodajas de calabacín cada una para una temperatura de aire de secado de 70°C y un espesor de 5mm.

| Nº de muestra | Vacio | 0 | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 | 210 | 240 |
|---------------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 6,2 | 80,0 | 69,5 | 60,7 | 53,8 | 46,0 | 40,7 | 34,8 | 27,9 | 22,9 |
| 2 | 6,0 | 82,4 | 72,9 | 65,1 | 58,3 | 51,6 | 46,1 | 40,6 | 33,2 | 28,0 |
| 3 | 6,1 | 78,5 | 69,2 | 59,8 | 51,9 | 45,1 | 38,5 | 33,6 | 27,2 | 22,1 |
| 4 | 6,1 | 77,3 | 69,9 | 61,4 | 54,1 | 47,8 | 41,9 | 37,0 | 31,1 | 24,7 |
| 5 | 6,1 | 96,4 | 88,4 | 79,3 | 69,9 | 62,3 | 55,2 | 48,6 | 41,8 | 35,8 |
| 6 | 6,1 | 96,0 | 87,1 | 77,6 | 67,5 | 59,4 | 52,1 | 43,9 | 37,7 | 31,5 |
| 7 | 6,1 | 98,1 | 95,5 | 77,0 | 68,8 | 59,4 | 52,6 | 46,2 | 37,9 | 32,4 |
| 8 | 6,2 | 97,1 | 87,1 | 80,0 | 72,6 | 63,0 | 56,3 | 49,3 | 41,8 | 36,8 |
| 9 | 6,1 | 114,9 | 103,6 | 92,8 | 85,7 | 76,4 | 66,3 | 59,1 | 50,6 | 41,9 |
| 10 | 6,1 | 115,3 | 103,0 | 90,7 | 81,9 | 73,2 | 62,3 | 54,5 | 46,0 | 39,0 |
| 11 | 6,2 | 111,0 | 99,0 | 88,4 | 77,3 | 69,8 | 61,1 | 51,5 | 43,0 | 36,1 |
| 12 | 6,0 | 117,1 | 104,4 | 92,6 | 82,2 | 73,0 | 64,9 | 54,3 | 45,5 | 37,8 |

Tabla N°13: Peso (g) de las bandejas con 6 rodajas de calabacín cada una para una temperatura de aire de secado de 70°C y un espesor de 10mm.

| Nº de muestra | 270 | 300 | 330 | 360 | 390 | 420 | 450 | 480 | 510 | 540 |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 19,6 | 16,5 | 14,9 | 13,4 | 12,5 | 11,9 | 11,6 | 10,8 | 10,6 | 10,6 |
| 2 | 24,1 | 20,9 | 18,9 | 16,9 | 14,9 | 13,3 | 12,2 | 11,3 | 11,0 | 11,0 |
| 3 | 19,0 | 16,5 | 14,5 | 13,2 | 12,1 | 11,1 | 10,6 | 10,5 | 10,2 | 10,2 |
| 4 | 21,6 | 18,9 | 16,6 | 14,9 | 13,3 | 11,8 | 11,2 | 10,7 | 10,7 | 10,7 |
| 5 | 30,3 | 26,4 | 23,1 | 20,1 | 18,2 | 15,9 | 14,3 | 13,0 | 12,8 | 12,6 |
| 6 | 25,8 | 22,1 | 19,0 | 16,0 | 14,4 | 13,1 | 12,4 | 11,9 | 11,8 | 11,8 |
| 7 | 27,8 | 23,0 | 20,0 | 17,8 | 16,3 | 15,1 | 14,1 | 13,0 | 12,6 | 12,3 |
| 8 | 31,9 | 26,6 | 23,3 | 20,1 | 17,5 | 15,7 | 14,5 | 13,5 | 12,9 | 12,6 |
| 9 | 37,2 | 32,3 | 27,4 | 24,3 | 21,5 | 18,3 | 16,4 | 14,6 | 14,0 | 13,7 |
| 10 | 33,9 | 29,4 | 24,9 | 21,7 | 19,0 | 16,5 | 15,0 | 13,2 | 12,4 | 12,4 |
| 11 | 29,7 | 25,9 | 22,5 | 19,3 | 17,2 | 15,2 | 13,8 | 12,8 | 12,7 | 12,6 |
| 12 | 31,9 | 27,3 | 23,1 | 19,3 | 16,8 | 15,1 | 13,8 | 12,7 | 12,5 | 12,5 |

Tabla N°13 cont: Peso (g) de las bandejas con 6 rodajas de calabacín cada una para una temperatura de aire de secado de 70°C y un espesor de 10mm.

| N° de muestra | 570 | 600 |
|----------------------|------------|------------|
| 1 | 10,6 | 10,6 |
| 2 | 11,0 | 11,0 |
| 3 | 10,2 | 10,2 |
| 4 | 10,7 | 10,7 |
| 5 | 12,6 | 12,6 |
| 6 | 11,8 | 11,8 |
| 7 | 12,3 | 12,3 |
| 8 | 12,6 | 12,6 |
| 9 | 13,7 | 13,7 |
| 10 | 12,4 | 12,4 |
| 11 | 12,6 | 12,6 |
| 12 | 12,5 | 12,5 |

Tabla N°13 cont: Peso (g) de las bandejas con 6 rodajas de calabacín cada una para una temperatura de aire de secado de 70°C y un espesor de 10mm.

| N° de muestra | Vacio | 0 | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 |
|----------------------|--------------|----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| 1 | 6,2 | 22,3 | 9,5 | 7,1 | 7,1 | 7,1 | 7,1 | 7,1 |
| 2 | 6,4 | 25,5 | 13,4 | 8,0 | 7,4 | 7,3 | 7,3 | 7,3 |
| 3 | 6,4 | 23,4 | 12,8 | 8,2 | 7,6 | 7,6 | 7,6 | 7,6 |
| 4 | 6,2 | 21,5 | 13,4 | 8,0 | 7,1 | 7,0 | 7,0 | 7,0 |
| 5 | 6,3 | 22,1 | 12,6 | 7,6 | 7,2 | 7,1 | 7,1 | 7,1 |
| 6 | 6,2 | 28,6 | 16,6 | 8,7 | 7,4 | 7,3 | 7,3 | 7,3 |
| 7 | 6,2 | 25,7 | 15,9 | 8,8 | 7,2 | 7,2 | 7,2 | 7,2 |
| 8 | 6,1 | 30,4 | 15,6 | 9,9 | 8,0 | 7,9 | 7,9 | 7,9 |
| 9 | 6,1 | 20,6 | 10,3 | 7,0 | 6,9 | 6,9 | 6,9 | 6,9 |
| 10 | 6,1 | 22,6 | 11,6 | 7,2 | 7,0 | 7,0 | 7,0 | 7,0 |
| 11 | 6,2 | 30,5 | 16,5 | 9,7 | 7,7 | 7,6 | 7,6 | 7,6 |
| 12 | 6,2 | 30,1 | 16,9 | 9,9 | 7,8 | 7,7 | 7,7 | 7,7 |
| 13 | 6,1 | 39,9 | 18,7 | 10,2 | 8,0 | 7,9 | 7,9 | 7,9 |
| 14 | 6,3 | 28,8 | 15,8 | 9,6 | 7,9 | 7,9 | 7,9 | 7,9 |
| 15 | 6,2 | 24,6 | 12,1 | 7,9 | 7,4 | 7,4 | 7,4 | 7,4 |

Tabla N°14: Peso (g) de las bandejas con 6 rodajas de calabacín cada una para una temperatura de aire de secado de 80°C y un espesor de 1mm.

| N° de muestra | Vacio | 0 | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 | 210 | 240 |
|----------------------|--------------|----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | 6,1 | 42,6 | 30,9 | 22,4 | 16,2 | 10,8 | 9,0 | 8,6 | 8,4 | 8,4 |
| 2 | 6,1 | 46,7 | 35,7 | 27,1 | 20,0 | 14,4 | 11,1 | 9,2 | 8,6 | 8,6 |
| 3 | 6,4 | 43,6 | 32,8 | 23,1 | 16,3 | 11,6 | 9,1 | 8,4 | 8,4 | 8,4 |
| 4 | 6,1 | 46,3 | 36,8 | 27,1 | 19,7 | 14,2 | 10,4 | 8,4 | 8,3 | 8,2 |
| 5 | 6,1 | 55,4 | 46,5 | 36,4 | 25,6 | 18,9 | 14,1 | 10,9 | 9,7 | 9,4 |
| 6 | 6,1 | 55,4 | 45,0 | 36,0 | 25,6 | 18,4 | 13,0 | 9,8 | 9,2 | 9,0 |
| 7 | 6,1 | 57,2 | 42,9 | 34,9 | 25,7 | 18,0 | 13,2 | 10,1 | 9,3 | 9,2 |
| 8 | 6,2 | 53,5 | 41,7 | 32,8 | 25,1 | 17,0 | 12,5 | 9,6 | 8,8 | 8,6 |
| 9 | 6,1 | 65,7 | 52,8 | 37,9 | 28,6 | 21,0 | 15,0 | 11,8 | 10,5 | 10,2 |
| 10 | 6,1 | 68,0 | 54,6 | 43,8 | 34,6 | 26,6 | 18,5 | 13,5 | 10,7 | 9,8 |
| 11 | 6,2 | 63,8 | 51,4 | 41,0 | 28,1 | 20,9 | 15,1 | 10,7 | 9,8 | 9,6 |
| 12 | 6,1 | 65,4 | 52,2 | 40,4 | 30,2 | 22,0 | 16,1 | 11,4 | 10,0 | 9,5 |

Tabla N°15: Peso (g) de las bandejas con 6 rodajas de calabacín cada una para una temperatura de aire de secado de 80°C y un espesor de 5mm.

| N° de muestra | 270 | 300 | 330 |
|----------------------|------------|------------|------------|
| 1 | 8,4 | 8,4 | 8,4 |
| 2 | 8,6 | 8,6 | 8,6 |
| 3 | 8,4 | 8,4 | 8,4 |
| 4 | 8,2 | 8,2 | 8,2 |
| 5 | 9,4 | 9,4 | 9,4 |
| 6 | 9,0 | 9,0 | 9,0 |
| 7 | 9,2 | 9,2 | 9,2 |
| 8 | 8,6 | 8,6 | 8,6 |
| 9 | 10,1 | 10,1 | 10,1 |
| 10 | 9,6 | 9,6 | 9,6 |
| 11 | 9,5 | 9,5 | 9,5 |
| 12 | 9,3 | 9,3 | 9,3 |

Tabla N°15 cont: Peso (g) de las bandejas con 6 rodajas de calabacín cada una para una temperatura de aire de secado de 80°C y un espesor de 5mm.

| Nº de muestra | Vacio | 0 | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 | 210 | 240 |
|---------------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 6,1 | 84,5 | 69,7 | 60,7 | 53,0 | 43,6 | 38,3 | 32,3 | 25,4 | 20,6 |
| 2 | 5,9 | 82,9 | 68,3 | 58,8 | 50,0 | 42,2 | 35,6 | 29,7 | 22,3 | 17,6 |
| 3 | 6,0 | 83,6 | 72,7 | 61,0 | 53,1 | 45,5 | 38,6 | 33,4 | 27,6 | 21,5 |
| 4 | 6,0 | 84,7 | 73,2 | 59,4 | 50,9 | 42,8 | 34,4 | 28,7 | 22,9 | 17,8 |
| 5 | 6,1 | 103,1 | 93,9 | 81,6 | 68,4 | 58,7 | 49,6 | 41,0 | 35,0 | 28,5 |
| 6 | 6,0 | 104,0 | 93,1 | 82,7 | 69,3 | 60,0 | 51,0 | 42,0 | 35,6 | 29,3 |
| 7 | 6,0 | 100,1 | 84,0 | 75,7 | 65,7 | 54,4 | 46,2 | 38,4 | 31,8 | 26,2 |
| 8 | 6,1 | 103,4 | 90,3 | 80,0 | 70,5 | 58,3 | 49,8 | 42,1 | 32,6 | 26,9 |
| 9 | 6,0 | 121,8 | 107,4 | 89,0 | 79,9 | 68,8 | 55,7 | 46,6 | 38,6 | 31,0 |
| 10 | 6,1 | 122,3 | 108,6 | 95,0 | 84,7 | 73,8 | 60,2 | 51,2 | 42,7 | 33,1 |
| 11 | 6,0 | 124,6 | 110,8 | 96,6 | 84,7 | 75,4 | 64,7 | 51,9 | 43,6 | 35,6 |
| 12 | 6,0 | 123,4 | 109,0 | 96,0 | 82,4 | 72,5 | 62,9 | 50,0 | 42,0 | 34,8 |

Tabla N°16: Peso (g) de las bandejas con 6 rodajas de calabacín cada una para una temperatura de aire de secado de 80°C y un espesor de 10mm.

| Nº de muestra | 270 | 320 | 360 | 390 | 420 | 450 | 480 | 510 | 270 |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 16,9 | 12,6 | 11,5 | 11,2 | 11,2 | 11,2 | 11,2 | 11,2 | 16,9 |
| 2 | 13,5 | 10,8 | 10,5 | 10,4 | 10,4 | 10,4 | 10,4 | 10,4 | 13,5 |
| 3 | 17,4 | 12,6 | 11,5 | 11,4 | 11,4 | 11,4 | 11,4 | 11,4 | 17,4 |
| 4 | 14,1 | 11,8 | 11,2 | 11,1 | 11,0 | 11,0 | 11,0 | 11,0 | 14,1 |
| 5 | 21,5 | 14,4 | 12,3 | 12,1 | 12,0 | 12,0 | 12,0 | 12,0 | 21,5 |
| 6 | 22,5 | 15,5 | 13,3 | 13,0 | 12,8 | 12,8 | 12,8 | 12,8 | 22,5 |
| 7 | 20,8 | 12,9 | 11,5 | 11,4 | 11,3 | 11,3 | 11,3 | 11,3 | 20,8 |
| 8 | 21,8 | 14,4 | 12,6 | 12,3 | 12,2 | 12,2 | 12,2 | 12,2 | 21,8 |
| 9 | 25,3 | 16,6 | 13,5 | 12,9 | 12,7 | 12,7 | 12,7 | 12,7 | 25,3 |
| 10 | 27,1 | 18,7 | 15,3 | 14,2 | 13,8 | 13,6 | 13,6 | 13,6 | 27,1 |
| 11 | 28,5 | 19,3 | 15,4 | 14,2 | 13,5 | 13,3 | 13,3 | 13,3 | 28,5 |
| 12 | 27,2 | 19,3 | 15,7 | 14,2 | 13,4 | 13,2 | 13,2 | 13,2 | 27,2 |

Tabla N°16 cont: Peso (g) de las bandejas con 6 rodajas de calabacín cada una para una temperatura de aire de secado de 80°C y un espesor de 10mm.

APÉNDICE B

Figuras.

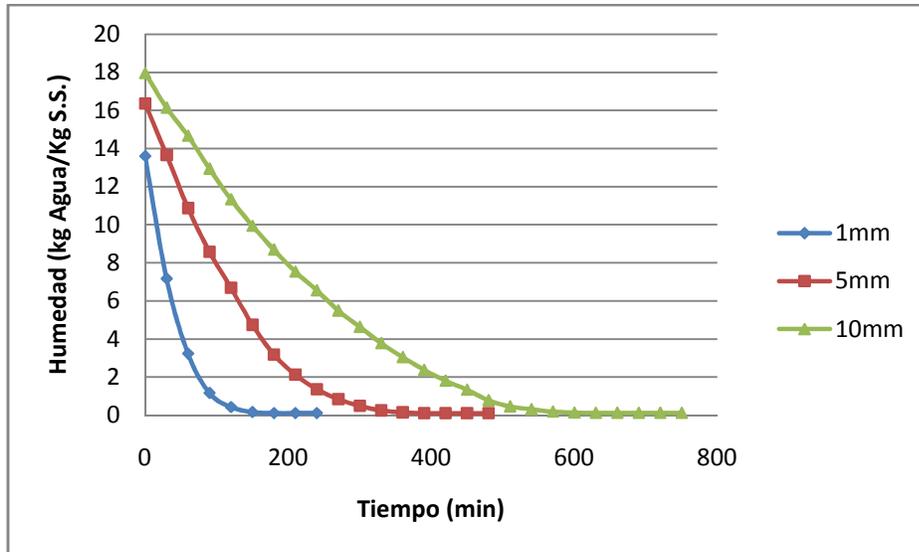


Figura N°31: Curvas de secado de calabacín cortado en rodajas con espesores de 1, 5 y 10mm, para una temperatura de 60°C y un diámetro de 4cm.

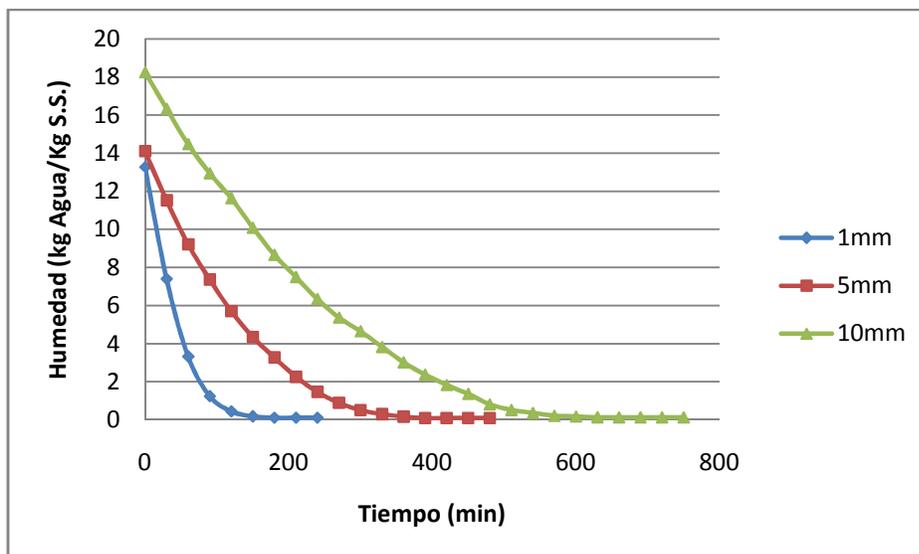


Figura N°32: Curvas de secado de calabacín cortado en rodajas con espesores de 1, 5 y 10mm, para una temperatura de 60°C y un diámetro de 4,5cm.

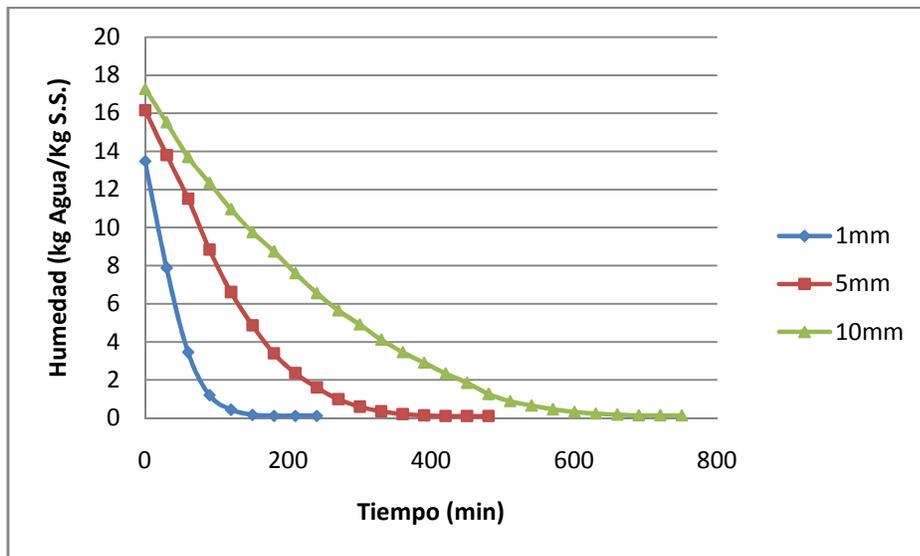


Figura N°33: Curvas de secado de calabacín cortado en rodajas con espesores de 1, 5 y 10mm, para una temperatura de 60°C y un diámetro de 5cm.

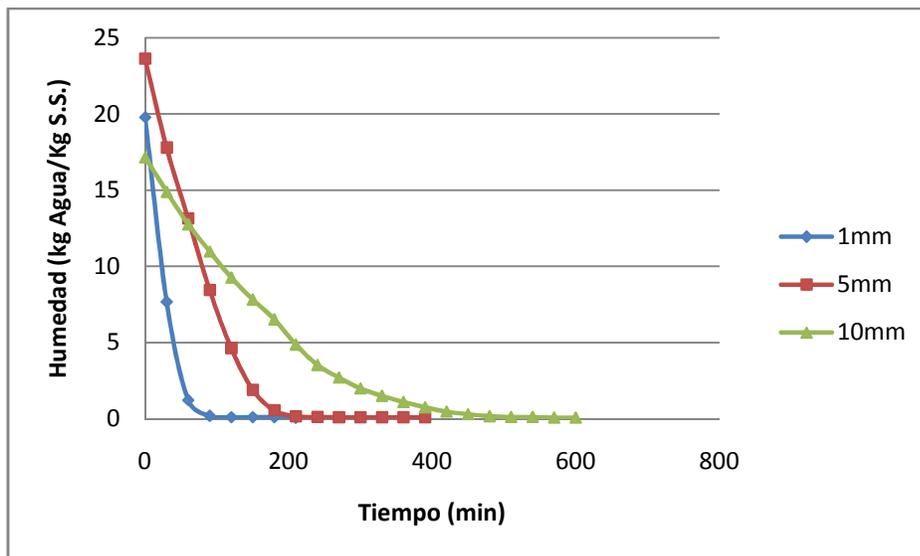


Figura N°34: Curvas de secado de calabacín cortado en rodajas con espesores de 1, 5 y 10mm, para una temperatura de 70°C y un diámetro de 4cm.

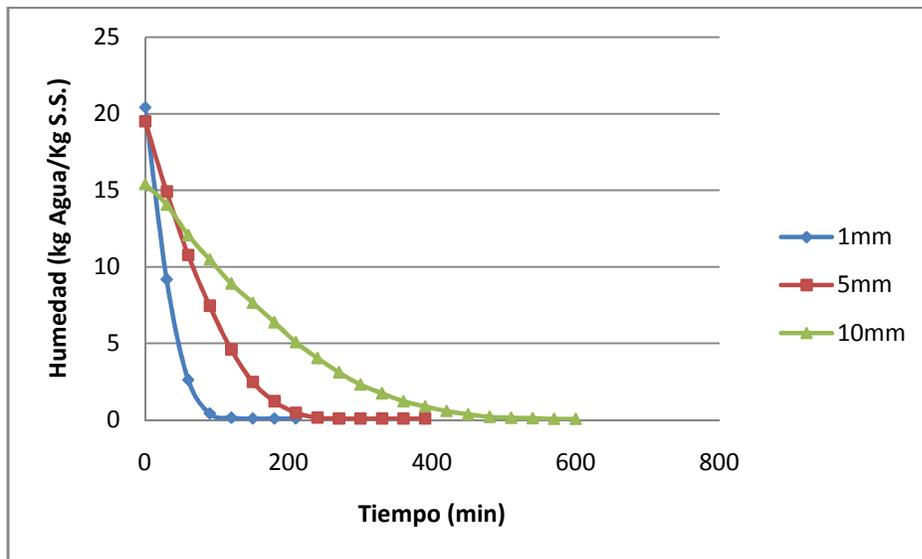


Figura N°35: Curvas de secado de calabacín cortado en rodajas con espesores de 1, 5 y 10mm, para una temperatura de 70°C y un diámetro de 4,5cm.

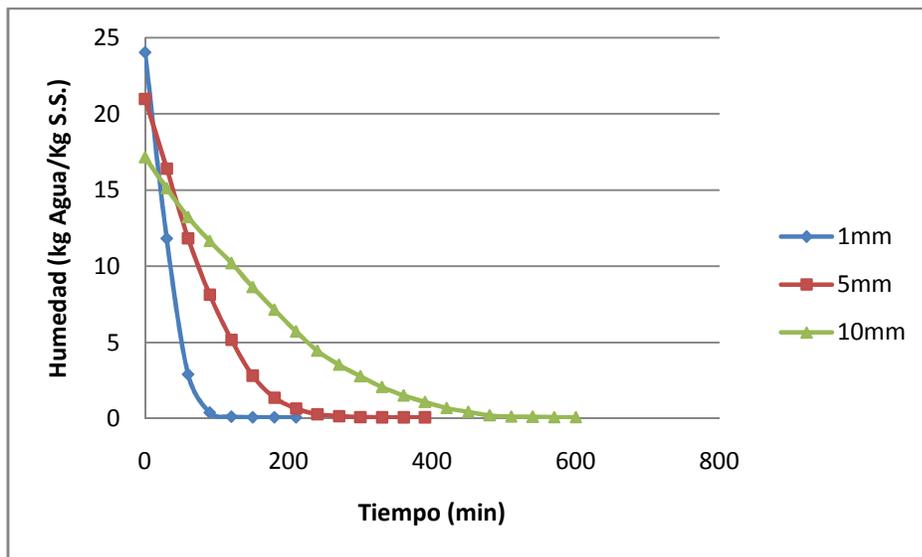


Figura N°36: Curvas de secado de calabacín cortado en rodajas con espesores de 1, 5 y 10mm, para una temperatura de 70°C y un diámetro de 5cm.

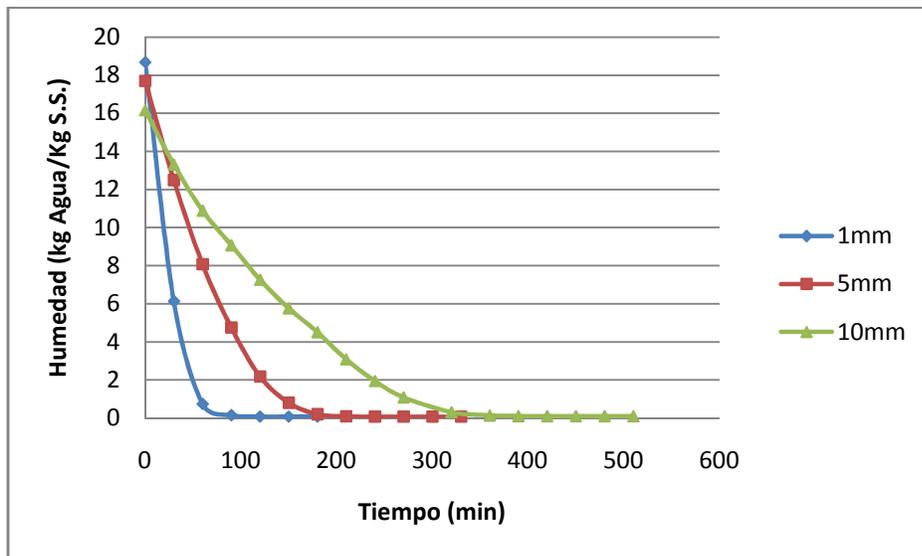


Figura N°37: Curvas de secado de calabacín cortado en rodajas con espesores de 1, 5 y 10mm, para una temperatura de 80°C y un diámetro de 4cm.

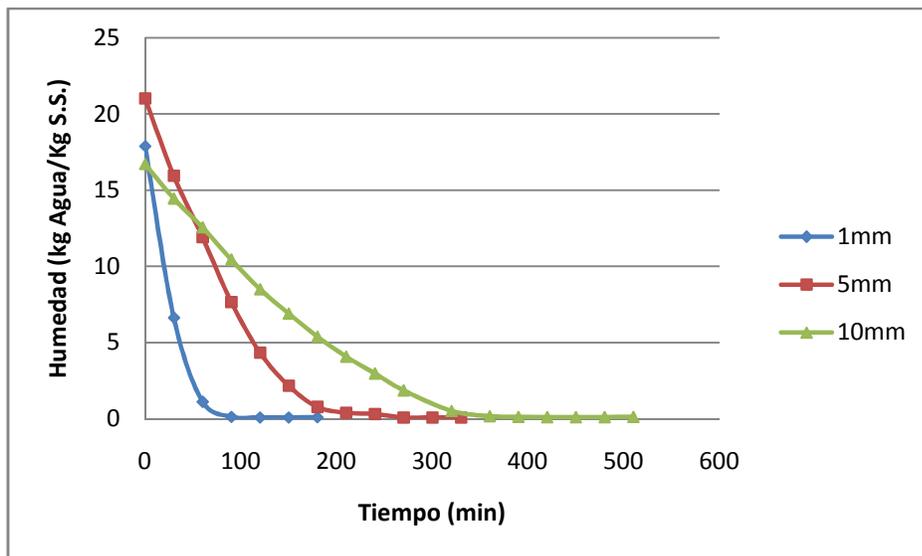


Figura N°38: Curvas de secado de calabacín cortado en rodajas con espesores de 1, 5 y 10mm, para una temperatura de 80°C y un diámetro de 4,5cm.

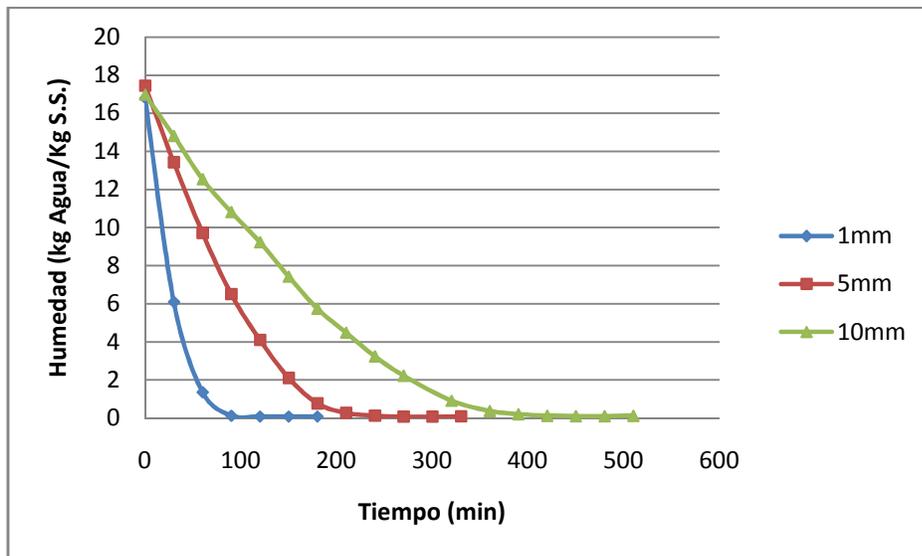


Figura N°39: Curvas de secado de calabacín cortado en rodajas con espesores de 1, 5 y 10mm, para una temperatura de 80°C y un diámetro de 5cm.

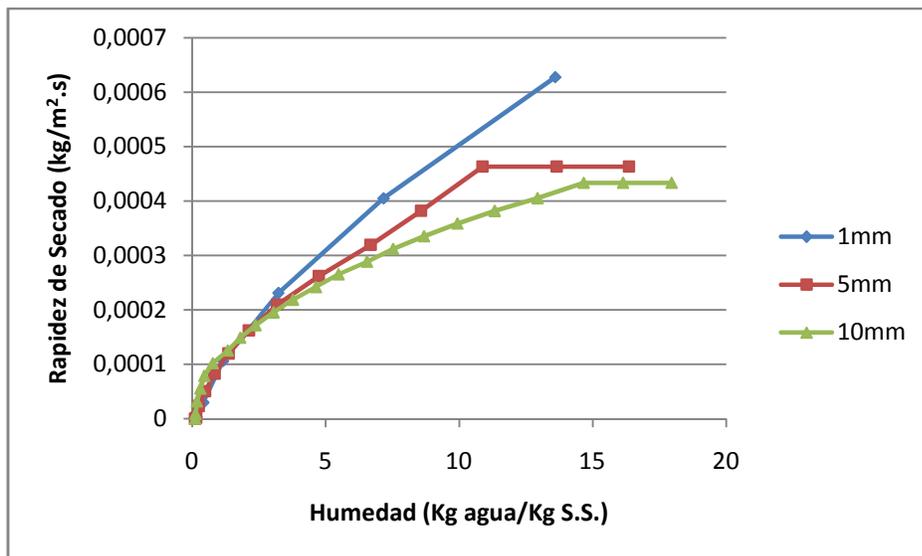


Figura N°40: Curvas de velocidad de secado de calabacín cortado en rodajas con espesores de 1, 5 y 10mm, para una temperatura de 60°C y un diámetro de 4cm.

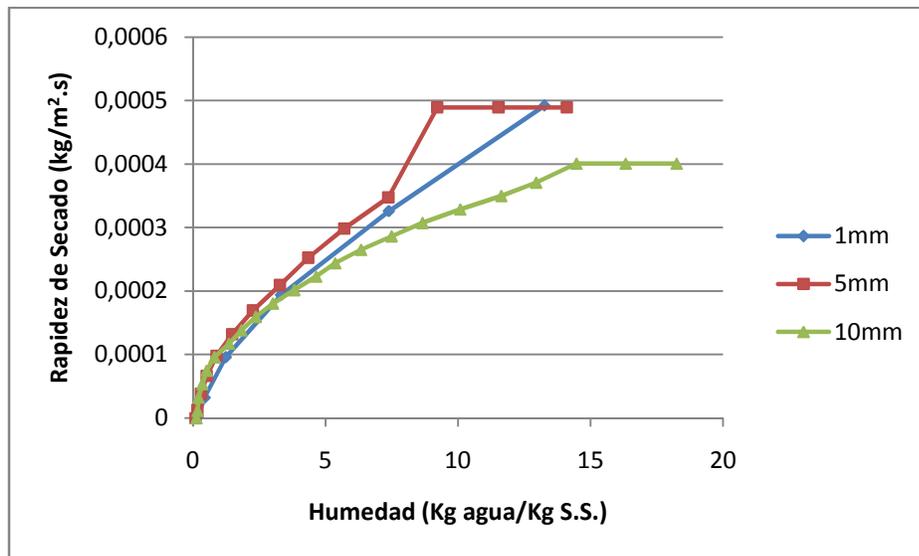


Figura N°41: Curvas de velocidad de secado de calabacín cortado en rodajas con espesores de 1, 5 y 10mm, para una temperatura de 60°C y un diámetro de 4,5cm.

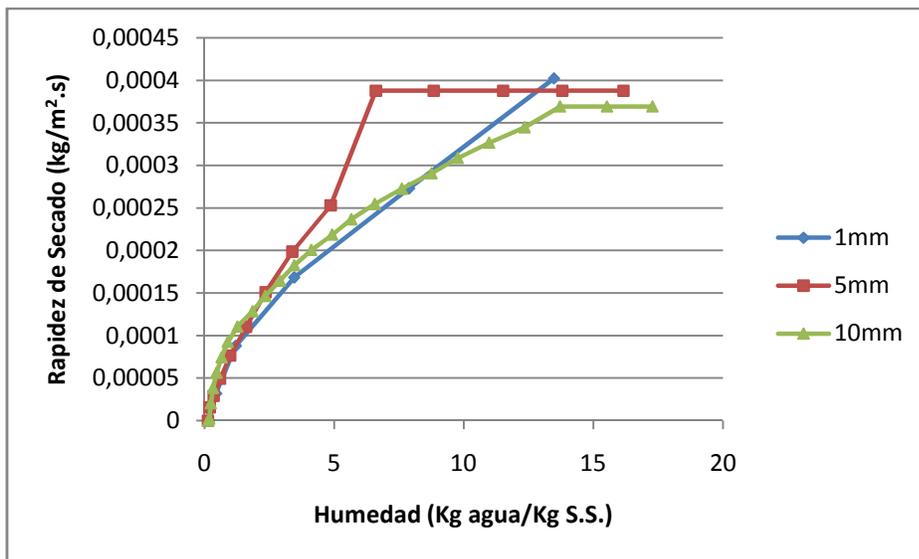


Figura N°42: Curvas de velocidad de secado de calabacín cortado en rodajas con espesores de 1, 5 y 10mm, para una temperatura de 60°C y un diámetro de 5cm.

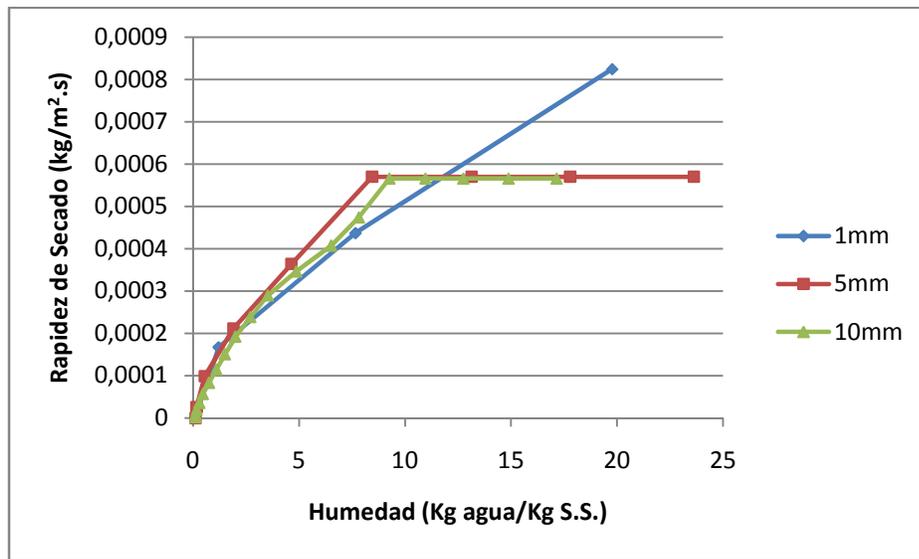


Figura N°43: Curvas de velocidad de secado de calabacín cortado en rodajas con espesores de 1, 5 y 10mm, para una temperatura de 70°C y un diámetro de 4cm.

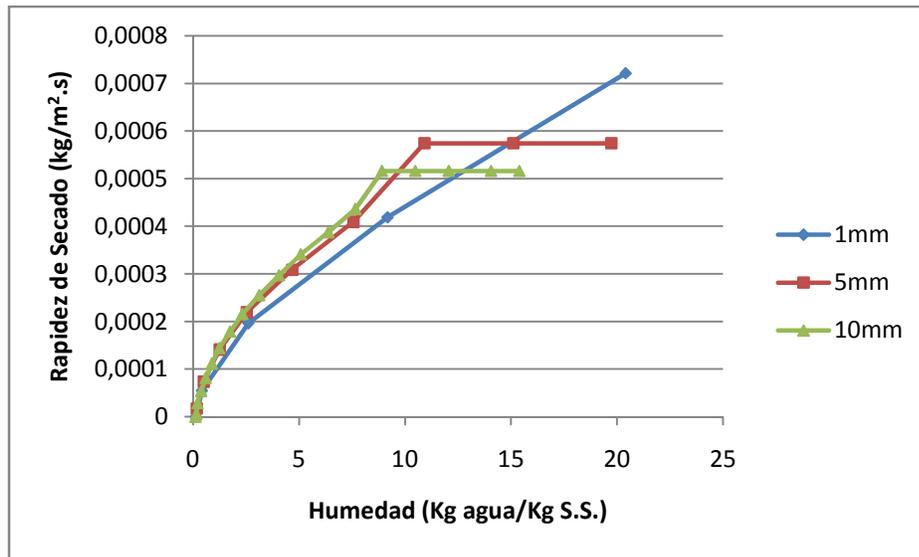


Figura N°44: Curvas de velocidad de secado de calabacín cortado en rodajas con espesores de 1, 5 y 10mm, para una temperatura de 70°C y un diámetro de 4,5cm.

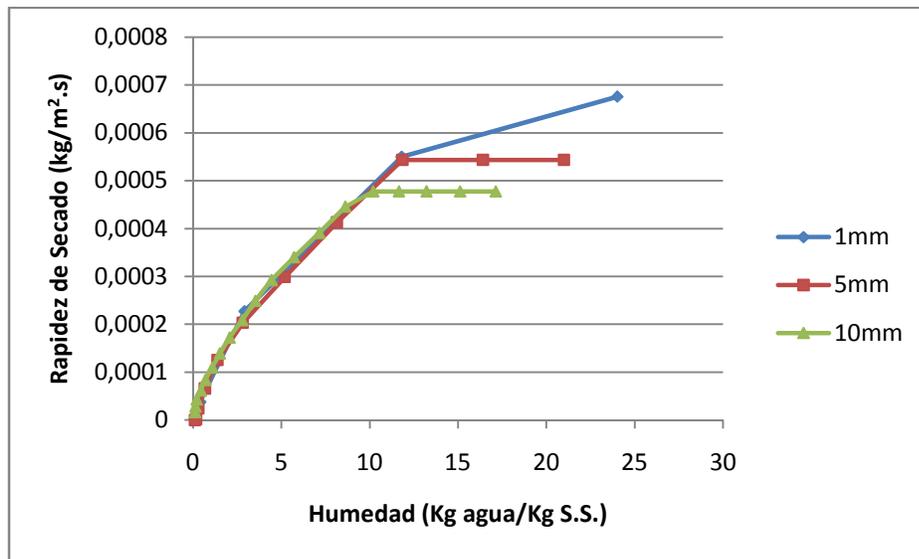


Figura N°45: Curvas de velocidad de secado de calabacín cortado en rodajas con espesores de 1, 5 y 10mm, para una temperatura de 70°C y un diámetro de 5cm.

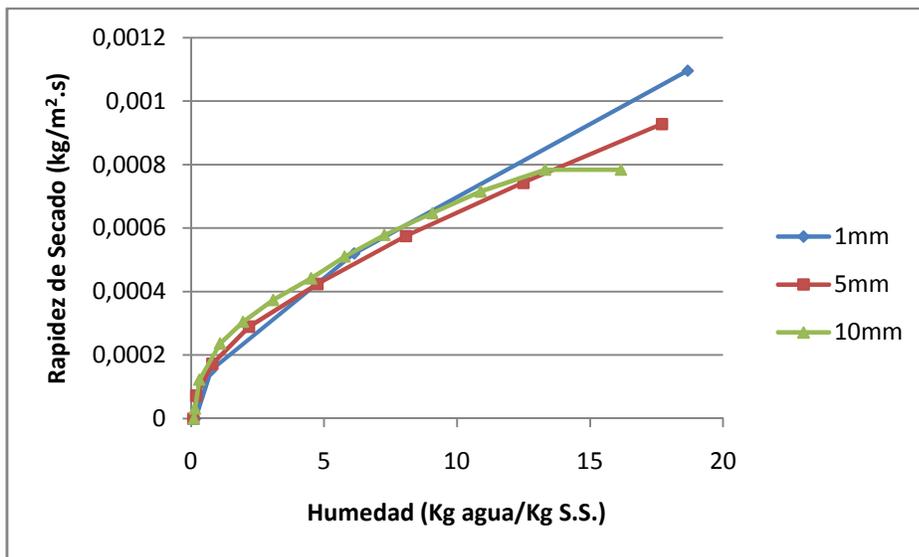


Figura N°46: Curvas de velocidad de secado de calabacín cortado en rodajas con espesores de 1, 5 y 10mm, para una temperatura de 80°C y un diámetro de 4cm.

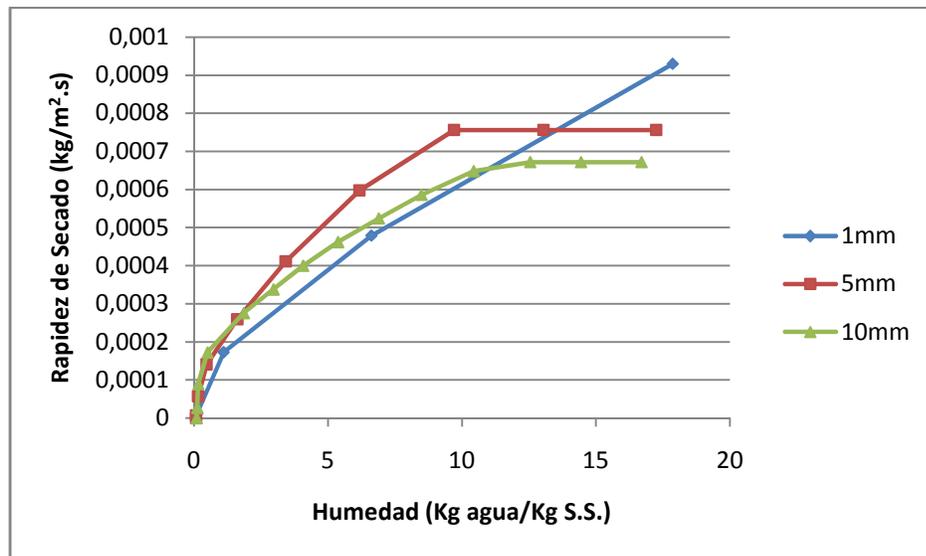


Figura N°47: Curvas de velocidad de secado de calabacín cortado en rodajas con espesores de 1, 5 y 10mm, para una temperatura de 80°C y un diámetro de 4,5cm.

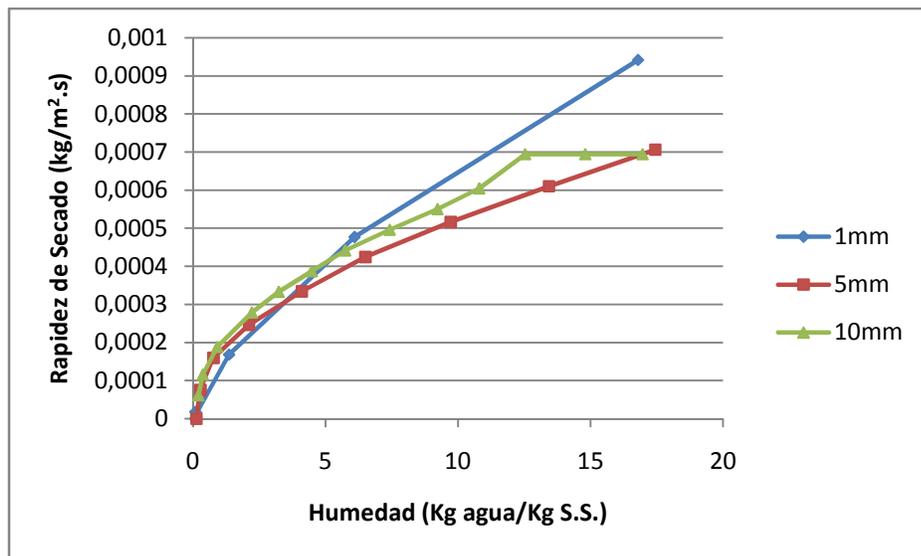


Figura N°48: Curvas de velocidad de secado de calabacín cortado en rodajas con espesores de 1, 5 y 10mm, para una temperatura de 80°C y un diámetro de 5cm.



Figura N°49: Calabacines usados para ser cortados en rodajas.



Figura N°50: Instrumento utilizado para garantizar espesores fijos en las rodajas de calabacín.



Figura N°51: Rodajas frescas de calabacín.



Figura N°52: Rodajas secas de calabacín.



Figura N°53: Secador de bandejas utilizado.

APÉNDICE C

Cálculos tipo.

Para demostrar la secuencia de los cálculos realizados se utilizarán los valores de las muestras secadas a 70°C con un espesor inicial de 5mm y un diámetro de 4,5cm.

- **Peso neto de la muestra N°1 ($PN1$).**

$$PN1_{t=0} = \text{Peso de la muestra}_{t=0} - \text{Peso del recipiente vacío}$$

$$PN1_{t=0} = 51,7g - 6,2g$$

$$PN1_{t=0} = 45,5g$$

- **Peso neto promedio de cada rodaja para las muestras de la 1 a la 4 ($PN_{4,5}$).**

$$PN_{4,5,t=0} = \frac{PN1_{t=0} + PN2_{t=0} + PN3_{t=0} + PN4_{t=0}}{6}$$

$$PN_{4,5,t=0} = \frac{45,5g + 48,3g + 46,1g + 45,6g}{6}$$

$$PN_{4,5,t=0} = 7,7g$$

Donde:

$PN1_{t=0}$ = Peso neto de la muestra 1 para un tiempo igual a 0 minutos.

$PN2_{t=0}$ = Peso neto de la muestra 2 para un tiempo igual a 0 minutos.

$PN3_{t=0}$ = Peso neto de la muestra 3 para un tiempo igual a 0 minutos.

$PN4_{t=0}$ = Peso neto de la muestra 4 para un tiempo igual a 0 minutos.

- **Humedad final (X^*)**

$$X^* = \frac{\left(\frac{P_{h1} - P_{s1}}{P_{h1} - P_{R1}} + \frac{P_{h2} - P_{s2}}{P_{h2} - P_{R2}}\right)}{2}$$

Donde:

P_{h1} : Peso húmedo 1 de la muestra previamente sometida al proceso de secado a 70°C.

P_{s1} : Peso seco 1 de la muestra previamente sometida al proceso de secado a 70°C.

P_{R1} : Peso del recipiente 1.

P_{h2} : Peso húmedo 2 de la muestra previamente sometida al proceso de secado a 70°C.

P_{s2} : Peso seco 2 de la muestra previamente sometida al proceso de secado a 70°C.

P_{R2} : Peso del recipiente 2.

$$X^* = \frac{\left(\frac{33,0354g - 33,0229g}{33,0354g - 32,9221g} + \frac{33,0397g - 33,0282g}{33,0397g - 32,9244g}\right)}{2}$$

$$X^* = 0,1050$$

- **Peso seco (P_S).**

$$P_S = PN_{4,5,t=\infty} \cdot (1 - X^*)$$

Donde:

$PN_{4,5,t=\infty}$: Peso neto promedio de cada rodaja para las muestras de la 1 a la 4 para un el final del proceso de secado a 70°C.

P_S : Peso seco promedio de cada rodaja para las muestras de la 1 a la 4 para un el final del proceso de secado a 70°C.

$$P_S = 0,416g \cdot (1 - 0,1050)$$

$$P_S = 0,3729g$$

- **Humedad en base seca por intervalo.**

$$X = \frac{PN_{4,5t=\infty} - P_S}{P_S}$$

Donde:

X: Humedad en base seca presente en el sólido.

$$X = \frac{7,7g - 0,3729g}{0,3729g}$$

$$X = 19,7270 \frac{Kg \text{ agua}}{Kg \text{ S.S.}}$$

Luego de obtenidos los valores de humedad en base seca para cada intervalo de tiempo se prosiguió a construir la curva de secado utilizando el programa EXCEL 2007, dicha curva se dividió en 2 partes, una para la cual los valores reducían su magnitud de manera uniforme y otra donde dicha disminución era cada vez era menor, para ambos casos se calculó la ecuación de la línea de tendencia utilizando también el programa EXCEL 2007. Las ecuaciones fueron las siguientes:

- Ecuación de humedad en función del tiempo para el periodo de velocidad de secado constante:

$$X = -0,1469 \cdot \theta + 19,654$$

$$R^2 = 0,9992$$

- Ecuación de humedad en función del tiempo para el periodo de velocidad de secado decreciente:

$$X = -5,1939E-07 \cdot \theta^3 + 5,9090E-04 \cdot \theta^2 - 1,9837E-01 \cdot \theta + 2,0865E+01$$

$$R^2 = 0,9996$$

Al derivar ambas ecuaciones es posible obtener la ecuación de velocidad de secado en función del tiempo ($dX/d\theta$), necesaria para el cálculo de el flux de secado.

- Ecuación de velocidad de secado en función del tiempo para el periodo de velocidad de secado constante:

$$dX/d\theta = -0,1469$$

- Ecuación de velocidad de secado en función del tiempo para el período de velocidad de secado decreciente:

$$dX/d\theta = -1,5581E-06 \cdot \theta^2 + 1,1818E-03 \cdot \theta - 1,9837E-01$$

- **Flux de secado (N).**

$$N = -\frac{P_S}{A_S} \cdot \frac{dX}{d\theta}$$

Donde:

N : Flux de secado.

P_S : Peso seco promedio de cada rodaja para las muestras de la 1 a la 4 para un el final del proceso de secado a 70°C.

A_S : Superficie de secado.

$dX/d\theta$: Velocidad de secado.

$$N = -\frac{0,3729g \cdot 0,001\frac{Kg}{g}}{\pi \cdot \frac{(0,045m)^2}{4}} \cdot -0,1469s^{-1}$$

$$N = 5,7405E-04\frac{Kg}{m^2 \cdot s}$$

- **Coficiente de transferencia de calor por convección (h_c).**

$$h_c = \frac{0,11 \cdot Cp \cdot G}{Pr^{0,67} \cdot Re^{0,29}}$$

$$Cp = 28960 + 9390 \cdot \left(\frac{\frac{3012}{T_G}}{\text{Senh}\left(\frac{3012}{T_G}\right)} \right)^2 + 7,58E-07 \cdot \left(\frac{\frac{1484}{T_G}}{\text{Cosh}\left(\frac{1484}{T_G}\right)} \right)^2$$

$$G = V_A \cdot \rho$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot Cp}{k}$$

$$Re = \frac{G \cdot de}{\mu}$$

Donde:

h_c : Coficiente de transferencia de calor por convección.

Cp : Capacidad calorífica.

G: Velocidad másica del aire.

Pr: Número de Prandtl.

Re: Número de Reynolds.

$$Cp = 28960 + 9390 \cdot \left(\frac{\frac{3012}{343,15}}{\text{Senh} \left(\frac{3012}{343,15} \right)} \right)^2 + 7,58E-07 \cdot \left(\frac{\frac{1484}{343,15}}{\text{Cosh} \left(\frac{1484}{343,15} \right)} \right)^2$$

tomado del Perry (1992)

$$Cp = 1003,74 \frac{J}{Kg \cdot K}$$

$$G = 1,5 \frac{m}{s} \cdot 1,002 \frac{Kg}{m^3}$$

$$G = 1,503 \frac{Kg}{m^2 \cdot s}$$

$$Pr = \frac{2,05E-05 \frac{Kg}{m \cdot s} \cdot 1003,74 \frac{J}{Kg \cdot K}}{0,02957 \frac{W}{m \cdot K}}$$

$$Pr = 0,6956$$

$$Re = \frac{1,503 \frac{Kg}{m^2 \cdot s} \cdot 0,2338m}{2,05E-05 \frac{Kg}{m \cdot s}}$$

$$Re = 17143$$

$$h_c = \frac{0,11 \cdot 1003,74 \frac{J}{Kg \cdot K} \cdot 1,503 \frac{Kg}{m^2 \cdot s}}{0,6956^{0,67} \cdot 17143^{0,29}}$$

$$h_c = 12,507 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

- **Coefficiente de transferencia de calor por conducción-convección (U_k).**

$$U_k = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_c} \cdot \frac{A_s}{A_{B2}} \right) + \left(\frac{z_{B2}}{k_{B2}} \cdot \frac{A_s}{A_{B2}} \right) + \left(\frac{z_{B1}}{k_{B1}} \cdot \frac{A_s}{A_{B1}} \right) + \frac{z_C}{k_C}}$$

Donde:

A_S : Superficie de secado.

A_{B1} : Superficie de la bandeja pequeña.

A_{B2} : Superficie de la bandeja del secador.

k_{B1} : Conductividad térmica de la bandeja pequeña.

k_{B2} : Conductividad térmica de la bandeja del secador.

k_C : Conductividad térmica del calabacín.

z_{B1} : Espesor de la bandeja pequeña.

z_{B2} : Espesor de la bandeja del secador.

z_C : Espesor del calabacín.

$$U_k = \frac{1}{\left(\frac{1}{12,507 \frac{W}{m^2 \cdot K}} + \frac{0,003m}{230 \frac{W}{m \cdot K}}\right) \cdot 0,0226m^2 + \left(\frac{0,00015m}{230 \frac{W}{m \cdot K}} \cdot 0,0226m^2\right) + \frac{0,005m}{0,52 \frac{W}{m \cdot K}}}$$
$$U_k = 48,3305 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

- **Coefficiente de transferencia de calor por conducción-convección lateral (U_{kl}).**

$$U_{kl} = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_c} \cdot \frac{A_s}{A_L}\right) + \left(\frac{z_C}{2k_C} \cdot \frac{A_s}{A_L}\right)}$$

Donde:

A_L : Superficie lateral de la rodaja d calabacín.

$$U_{kl} = \frac{1}{\left(\frac{1}{12,507 \frac{W}{m^2 \cdot K}} + \frac{0,005m}{2 \cdot 0,52 \frac{W}{m \cdot K}}\right) \cdot 0,0226m^2}$$
$$U_{kl} = 2,6218 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

- **Coefficiente de transferencia de calor por radiación (h_r).**

$$h_r = \frac{\varepsilon \cdot 5,73E-08(T_R^4 - T_S^4)}{T_R - T_S}$$

Donde:

ε : Emisividad de la superficie radiante.

T_R : Temperatura de la superficie radiante.

Para el cálculo de este coeficiente se hacen un par de suposiciones, la primera es que la temperatura de la superficie radiante es igual a la temperatura del aire de secado y la segunda que la temperatura superficial es igual a la temperatura de bulbo húmedo, ésta última suposiciones será corregida posteriormente.

$$h_r = \frac{0,79411 \cdot 5,73E-08(343,15^4 - 300,65^4)}{343,15 - 300,65}$$

$$h_r = 6,0974 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Con este primer valor de h_r se recalcula T_S a partir de la siguiente ecuación:

$$T_S = T_G - \frac{N \cdot \lambda}{h_c + U_k + U_{kl} + h_r}$$

$$T_S = 343,15K - \frac{5,7405E-04 \frac{Kg}{m^2 \cdot s} \cdot 2,430E06 \frac{J}{Kg}}{12,507 \frac{W}{m^2 \cdot K} + 48,3305 \frac{W}{m^2 \cdot K} + 2,6218 \frac{W}{m^2 \cdot K} + 6,0974 \frac{W}{m^2 \cdot K}}$$

$$T_S = 323,09K$$

Con este último valor de T_S se repite la operación realizada hasta que la variación en T_S sea despreciable entonces:

$$T_S = 323,67K \text{ y } h_r = 6,7515 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

- **Coefficiente de transferencia de masa por convección (k_y).**

$$k_y = \frac{N}{Y_S - Y}$$

$$Y_S = \frac{P^V}{P - P^V} \cdot \frac{M_{Agua}}{M_{Aire}}$$

$$P^V = P_C \cdot e^{6,53241 - \frac{3985,439}{(T_S - 38,9974)}}$$

Donde:

k_y : Coeficiente de transferencia de masa por convección.

Y_S : Humedad en la superficie del sólido.

Y : Humedad absoluta del aire.

P^V : Presión de vapor.

P : Presión atmosférica.

M_{Agua} : Peso molecular del agua.

M_{Aire} : Peso molecular del aire.

P_C : Presión crítica del agua.

$$P^V = 22039275 Pa \cdot e^{6,53241 - \frac{3985,439}{(323,67 - 38,9974)}}$$

$$P^V = 12572 Pa$$

$$Y_S = \frac{12572 Pa}{98700 - 12572 Pa} \cdot \frac{18,015 \frac{Kg}{Kmol}}{28,964 \frac{Kg}{Kmol}}$$

$$Y_S = 0,0908$$

$$k_y = \frac{5,7405E-04 \frac{Kg}{m^2 \cdot s}}{0,0908 - 0,02036}$$

$$k_y = 8,1504E-03 \frac{Kg}{m^2 \cdot s}$$

- **Coeficiente de transferencia de masa por convección calculado teóricamente ($k_{y(teo)}$).**

$$k_{Y(teo)} = \frac{h_C}{1055 + 1884 \cdot Y}$$

$$k_{Y(teo)} = \frac{12,51}{1055 + 1884 \cdot 0,02036}$$

Debido a que P^V está expresado en función de T_S , ésta resulta ser una ecuación trascendental y se resolvió mediante un ciclo iterativo utilizando el programa EXCEL 2007. Posteriormente se repite el cálculo realizado anteriormente para el coeficiente de transferencia de masa por convección (k_y) y se obtiene el llamado coeficiente de transferencia de masa por convección teórico ($k_{y(teo)}$).

$$k_{y(teo)} = 11,439E-03 \frac{Kg}{m^2 \cdot s}$$

- **Factor de corrección del coeficiente de masa por convección teórico (f_C).**

$$f_C = \frac{k_y}{k_{y(teo)}}$$

$$f_C = \frac{8,1504E-03 \frac{Kg}{m^2 \cdot s}}{11,439E-03 \frac{Kg}{m^2 \cdot s}}$$

$$f_c = 0,7125$$

- **Difusividad efectiva (D).**

El cálculo de la difusividad efectiva se realizó utilizando la gráfica de la Figura N°11 a partir del valor de Ea calculable mediante la siguiente ecuación:

$$Ea = \frac{Ca_{\theta} - Ca_{\infty}}{Ca_0 - Ca_{\infty}}$$

Donde:

Ca_{θ} : Concentración de agua para un instante de tiempo (Kg agua/Kg sólido).

Ca_0 : Concentración de agua inicial (Kg agua/Kg sólido).

Ca_{∞} : Concentración de agua al final del proceso de secado (Kg agua/Kg sólido).

Como el volumen de las rodajas variaba en función del tiempo, fueron realizadas mediciones de la variación del espesor y relacionadas en función del peso de la rodaja para cada instante. Así también se decidió calcular una difusividad efectiva para cada instante de tiempo y luego utilizar un promedio de las mismas.

Entonces, tomando como referencia los valores medidos a los 150 minutos luego de iniciado el proceso de secado a 70°C para un espesor inicial de 5mm y un diámetro de 4,5cm:

$$Ea = \frac{Ca_{150min} - Ca_{\infty}}{Ca_{120min} - Ca_{\infty}}$$

$$Ea = \frac{0,713 \frac{Kg \text{ agua}}{Kg \text{ totales}} - 0,094 \frac{Kg \text{ agua}}{Kg \text{ totales}}}{0,822 \frac{Kg \text{ agua}}{Kg \text{ totales}} - 0,094 \frac{Kg \text{ agua}}{Kg \text{ totales}}}$$

$$Ea = 0,851$$

Observando el valor correspondiente a $D \cdot \theta/a^2$ en la Figura N°11

$$\frac{D \cdot \theta}{a^2} = 0,016$$

$$D = \frac{0,016 \cdot a^2}{\theta}$$

Donde:

D : Difusividad efectiva para un instante de tiempo.

a : Espesor de la rodaja de calabacín para un instante de tiempo.

θ : Diferencia de tiempo entre el momento que fue medido Ca_θ con el que fue medido Ca_0 .

$$D = \frac{0,016 \cdot (0,00145m)^2}{(150min - 120min) \cdot 60 \frac{s}{min}}$$
$$D = 1,921E-11 \frac{m^2}{s}$$

Este valor de difusividad efectiva es el existente para el momento entre 120 y 150 minutos luego de iniciado el proceso de secado a 70°C, 5mm de espesor y 4,5 cm de diámetro.